

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año **1. Datos generales del Proyecto**

Código del proyecto: 2910			
Título del proyecto: Aerogeles de nanosílice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles			
Facultad o Instituto Académico: INGENIERIA			
Departamento o Escuela: INGENIERIA DE MATERIALES			
Grupo (s) de investigación: GRUPO MATERIALES COMPUESTOS y GRUPO DE TERMODINÁMICA APLICADA Y FLUIDOS SUPERCRÍTICOS			
Entidades: UNIVERSIDAD DEL VALLE			
Palabras claves: Aerogeles, nanosílice, recubrimiento superaislante, cascarilla de arroz, material ecosostenible.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Silvio Delvasto Arjona	10 h/s – 30 meses	10 h/s – 30 meses
Coinvestigadores	Gustavo Bolaños	5 h/s – 12 meses	

Otros participantes	Juan David Pardo (Maestría, finalizada, actualmente en doctorado)	40 h/semana- 24 meses	40 h/semana- 24 meses
	Eliana Rodríguez Cabrera (joven investigadora, finalizada, y maestría, se retiró)	40 h/s- 12 meses	40 h/s- 12 meses
	Michael Andrés Gómez Rivera (Doctorado, se retiró)	15 h/s- 12 meses	15 h/s- 8 meses
	John Alexander Torres León (Doctorado, en curso)	15 h/s- 12 meses	15 h/s- 6 meses
	Gustavo Gómez (maestría, en curso)	10 h/s- 12 meses	10 h/s- 6 meses
	Diana Carolina Zuluaga Rosero (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)	20 h/s- 12 meses	20 h/s- 12 meses
	Miller Alexis Fernández Ruiz (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)	20 h/s- 12 meses	20 h/s- 12 meses
	David Steven Calambas Galvis (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)	20 h/s- 12 meses	20 h/s- 12 meses
	Laura Marcela Bernal Medaglia (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)	20 h/s- 12 meses	20 h/s- 12 meses

2. Resumen ejecutivo

En esta investigación se obtuvieron partículas de nanosílice, hidrogeles, xerogeles y aerogeles síliceas a partir de un residuo agroindustrial (cascarilla de arroz), a través de un tratamiento termoquímico, una síntesis sol gel y secado supercrítico. Los procesos seguidos se diferencian de los métodos convencionales porque la materia prima es un desecho agroindustrial, la cascarilla de arroz, y no emplean reactivos de elevada toxicidad y costo como los alcóxidos metálicos. La fase experimental fue desarrollada en los laboratorios del grupo Materiales Compuestos y en el laboratorio del Grupo de Termodinámica Aplicada y Fluidos Supercríticos para obtener las aerogeles mediante una fase final de secado supercrítico.

Se obtuvo y caracterizó una ceniza de cascarilla de arroz (CCA) óptima mediante un tratamiento termoquímico de la CA. Se obtuvieron dos precursores síliceos de silicato de sodio (SS), el primero SS1 (por calcinación de la CA) y el SS2 (obtenido directamente de la CA mediante un tratamiento químico). Se obtuvieron hidrogeles síliceos a partir de la cascarilla de arroz con 14 días de gelificación y con una resistencia mecánica capaz de soportar el secado supercrítico y con una apariencia traslúcida.

Se hizo una combinación de tratamientos hidrotermales y de sol-gel que permitieron un mayor control de la porosidad final. Los materiales y reactivos implicados en el proceso fueron, entre otros: H_2SO_4 , TEOS, CO_2 , N_2 , TEPA, HCl, Etanol, CETAB, etc. La síntesis seguida es un proceso amigable al ambiente con parámetros de operación económicos, tales como bajos tiempos de envejecimiento (no superiores a las 18 horas) y una temperatura de gelificación de 25 °C. Se obtuvieron aerogeles síliceas con una densidad de 0,08 g/cm³ y un volumen de poros del 96 %, comparable a las aerogeles obtenidas por precursores tóxicos y costosos como el TMOS y TEOS.

Las xerogeles obtenidas mostraron una capacidad de fisisorción importante del CO_2 debido a su elevado valor de área específica (AE) con valores superiores a los 40 mg CO_2 /g ads obtenido en la termobalanza, un resultado similar a capacidades de captación de materiales sintéticos como el SBA-15.

El método planteado para el intercambio de solvente fue efectivo al poder realizarse un secado supercrítico con CO_2 , que permitió obtener aerogeles síliceas con una densidad de 0,08

g/cm³ y un volumen de poros del 96 %, comparable a las aerogeles obtenidas por precursores tóxicos y costosos como el TMOS y TEOS.

La aplicación de nanosílice (nS) en morteros de cemento portland generó en estos valores resistente superiores en un 30% en edades tempranas, siendo la muestra con 0,5 de adición con mejores resistencias a los 7 días de curado, en comparación con morteros sin adición. También fue posible emplear microsílice obtenida del proceso químico como material de recubrimiento. La principal característica evaluada fue la conductividad térmica presentando una reducción del 45,8% respecto a la placa sin recubrimiento, con lo cual se comprobó su propiedad de aislamiento térmico.

3. Síntesis del proyecto

Tema

El tema desarrollado en este proyecto fue la obtención de aerogeles silíceas y productos intermedios a partir una fuente renovable, como lo es el residuo agroindustrial de la cascarilla de arroz. En el proyecto se planteó la producción, bajo condiciones óptimas, de los precursores de sílice (silicato de sodio) hasta el estudio del proceso sol-gel y la extracción del solvente a las condiciones y variables necesarias para la obtención de aerogeles ultra porosas para su aplicación funcional en materiales de recubrimiento en elementos constructivos para construcciones denominadas “verdes”.

Objetivos

Objetivo General

Obtener aerogeles silíceas nano estructuradas ultra porosas a través de un tratamiento termoquímico de la cascarilla de arroz (CA) y una síntesis sol-gel para su aplicación en un recubrimiento superaislante sobre sustratos de cemento portland para uso en elementos constructivos.

Objetivos específicos

- Obtener ceniza de cascarilla de arroz (CCA) con la mayor reactividad posible (elevado contenido de sílice amorfa) a través de un tratamiento termoquímico de CA.
- Obtener el precursor silicato de sodio (SS) optimo a partir de la cascarilla de arroz sometida a un tratamiento termoquímico.

- Desarrollar y probar un proceso de obtención de un gel silíceo ultra poroso (GSU) mediante un proceso químico de sol-gel a partir del SS obtenido.
- Obtener aerogeles silíceos mediante la extracción en condiciones supercríticas del solvente en las GSU.
- Caracterizar estructural, física y químicamente los derivados silíceos obtenidos.
- Desarrollar y probar un recubrimiento aislante basado en las partículas de aerogeles silíceos (RAS) obtenidas con la mayor capacidad de aislamiento.
- Evaluar las propiedades térmicas y acústicas del recubrimiento aplicado sobre sustratos de cemento portland.

Obtención de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

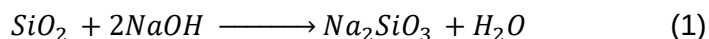
Se utilizó cascarilla de arroz (CA) como fuente de sílice. La cascarilla de arroz (CA) provino de los silos de almacenamiento de la planta de producción de la arrocería Esmeralda S.A, localizada en el municipio de Jamundí (Valle del Cauca, Colombia). La caracterización realizada a la cascarilla abarcó: análisis químico, microscopía electrónica y óptica, y análisis térmico. Estos análisis permitieron conocer la estructura y composición de la CA cuyos porcentajes de sílice fueron mayores al 20 %.

El efecto del tratamiento químico con ácido a la CA reveló menor presencia de óxidos metálicos como K_2O , MnO ; MgO , CaO entre otros, los cuales tienen incidencia en el color de la ceniza; por ejemplo, el MnO comunica un color amarillo en pequeñas proporciones (1 %) hasta marrón oscuro en órdenes del 15 %, y con el proceso de limpieza CCA se reduce cerca del 94 % con respecto a la cantidad de MnO presente en la muestra sin tratar. También, la presencia de estos óxidos tiene efecto en la disminución del contenido de sílice amorfa, como es el caso de K_2O , que al ser superior en la muestra CCA sin tratar favorece su actuación como fundente y en consecuencia la aparición de fases cristalinas como la cristobalita. Por efecto de este tratamiento, los resultados revelaron una CCA con contenidos de sílice superiores al 90 %, valores que permitieron la obtención de precursores silíceos. La CCA fue homogenizada en un molino de bolas y caracterizada mediante ensayos de contenido de sílice amorfa, contenido de inquemados y humedad, densidad, granulometría, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y análisis térmico.

Se obtuvieron dos precursores silíceos de silicato de sodio (SS), el primero SS1 (por calcinación de la CA) y el SS2 (obtenido directamente de la CA mediante un tratamiento químico) para usarse como precursor silíceo en la síntesis sol-gel de materiales mesoporosos.

Obtención del precursor de sílice (SS)

A partir de la CCA con contenidos de sílice amorfa superiores al 95 % y un tamaño de partícula menor a 30 μm se establecieron los parámetros de síntesis del SS óptimo (grado de conversión de la ceniza) con base en otros trabajos realizados en el Grupo de Materiales Compuestos (G. Cerón et al., 2009, Garzón C., 2010, Bejarano, J. 2010, Bejarano, J. et al., 2010^b) quienes establecieron que a relaciones molares: $\text{NaOH}/\text{SiO}_2 \approx 2$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ mayores a 15, con temperaturas de tratamiento de 100 °C, y un tiempo de sostenimiento mayor a 90 minutos se producen grados de conversión importantes con respecto al contenido de sílice total presente en una muestra de CCA siguiendo la ecuación 1.



Tomando como base una muestra de 100 g de CCA, que corresponde a 97,81 g de SiO_2 de acuerdo con los resultados del análisis químico, se procedió a disolver en 800 ml de agua una cantidad de NaOH equivalente a 127,8 g. Después de alcanzar la temperatura ambiente, el sobrenadante, silicato de sodio (SS), fue filtrado al vacío y utilizado como precursor silíceo en la síntesis sol-gel; el sólido filtrado se utilizó para medir el rendimiento o porcentaje de conversión a las condiciones dadas el cual fue del 94 %, que es un rendimiento comparable con investigaciones anteriores del grupo de materiales compuestos (G. Cerón et al., 2009, Garzón C., 2010, Bejarano, J. 2010, Bejarano, J. et al., 2010^b), este comportamiento es asociado al grado de amorficidad elevado de la CCA, así como por el efecto de la temperatura, la cual puede promover incluso la conversión de sílice cristalina (Bejarano, J. 2010).

De acuerdo con los resultados obtenidos el contenido de SiO_2 de 14,21% es apreciable, así como el porcentaje de sólidos totales de 29,74% en el SS obtenido, sugiriendo que la metodología empleada produce grados de conversión adecuados para un precursor a ser utilizado como fuente de sílice en una síntesis sol-gel.

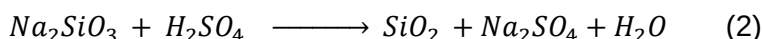
Proceso de obtención de un gel silíceo ultra poroso (GSU)

El método seguido en la investigación fue una combinación de tratamientos hidrotermales y de sol-gel que permitieron un mayor control de la porosidad final. Se siguieron un tratamiento termoquímico a la cascarilla, que se comparó con otro de pirolisis, que dejaron expuesta la sílice para la obtención de silicatos de sodio. Luego, a partir de estos se hizo síntesis sol gel y finalmente secado supercrítico para obtener aerogeles silíceas. Así, al desarrollar una serie de procesos catalíticos heterogéneos sobre sólidos inorgánicos se minimiza el uso de materias primas y el consumo de energía, y se obtienen, selectivamente, productos con una generación mínima de residuos. Los materiales y reactivos implicados en el proceso fueron, entre otros: H_2SO_4 , TEOS, CO_2 , N_2 , TEPA, HCl, Etanol, CETAB, entre otros.

Se optimizó un proceso sol gel para la obtención de xerogeles silíceas con elevada área específica e hidrogeles translucidos a partir de la catálisis ácida de los SS, de la misma manera se adecuó un sistema basado en una chaqueta soxhlet para el intercambio del solvente del agua en los geles por etanol, esto previo al secado supercrítico con CO_2 líquido. Se realizó una curva parcial de gelificación mediante el uso de un viscosímetro viscolead ONE (L) y se ha estudiado la resistencia a la penetración de los hidrogeles, estableciéndose un tiempo óptimo de 14 días de envejecimiento. Se estudió la influencia de las relaciones H_2SO_4/SiO_2 y SiO_2/H_2O en los hidrogeles obtenidos. Con esta experimentación se buscó la optimización del área específica (AE) bajo la MSR en un diseño central compuesto, en el cual además de la factorial 2^4 se tienen factoriales, más los puntos centrados. A través del programa Minitab 16 se creó el diseño experimental cuya aleatorización partió de los tratamientos asignados a cada una de las unidades experimentales (xerogeles). La idoneidad de este modelo fue demostrada por medio de las pruebas de hipótesis. Cada una de las unidades experimentales (xerogel silíceo) es homogénea.

Los factores y niveles que definieron al diseño factorial 2^4 completo fueron seleccionados a partir de la formación del gel, siendo que el precursor iniciaba con un pH de 13,7 la formación del sólido se observaba en un pH de 11,5 tanto para la escogencia del límite de inferior así como los valores para el tiempo de gelificación (tg) se tuvo en cuenta la información disponible en la literatura (Zhao Xiu S. et al., 1996, Terrés E., 2000, Zaky, R.R. et al., 2008, Belmabkhout Y. et al., 2009, Farook A., 2010, Qu Y. et al., 2010, Balu A., 2012, Simanjuntak, W., et al., 2013, Zeng, W., 2014, Maretto, M., et al., 2015).

La reacción de la catálisis ácida del precursor silíceo se muestra en la ecuación 2.



Iniciando con un pH de 13,7 el precursor silíceo no gelificaba sino hasta disminuir su pH por debajo de 12 (aproximadamente 11,5). Para esto se adicionó ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración de 4N y con un tiempo de mezclado de 2 horas en concordancia con algunas investigaciones (Balú A., 2012, Simanjuntak, W., et al., 2013, Zeng, W., 2014, Maretto, M., et al., 2015, entre otras). Una vez se alcanzaba el pH planteado en el diseño experimental registrado con un pHmetro, los geles se dejaron en reposo hasta cumplir el tiempo de gelificación (tg) indicado en el diseño. Posteriormente los geles fueron lavados con agua destilada y centrifugados para remover los sulfatos formados en la síntesis, la velocidad de centrifugación fue de 5.000 rpm durante 5 min, el lavado continuó hasta que el sobrenadante no tuviera reacción con una solución de BaCl_2 al 2 % (5 lavados) esto para garantizar xerogeles sin la presencia de las sales formadas.

La optimización se hizo definiendo como variable principal el área específica (AE) obtenida mediante la técnica BET (Brunauer, Emmett and Teller), que es más apropiado para sólidos no porosos, macro and mesoporous, y el método BJH (Barrett, Joyner, and Halenda), que es un procedimiento para calcular en sólidos porosos las distribuciones de tamaños de poro de isothermas experimentales e isothermas de adsorción-desorción en los materiales silíceos obtenidos. La variable de respuesta, el área específica (AE) fue obtenida mediante el ensayo de BET usando N_2 a 77 K a través un analizador de área y tamaño de poro Nova 1000e. Todas las muestras fueron desgasificadas durante 6 horas a 300 °C con un vacío de 10^{-5} mbar. Con la optimización de una superficie de respuesta que reveló las condiciones que generan los xerogeles con mayor AE (muestra X1) y con esto se procedió a gelificar haciendo uso del agente direccionador de estructura CTAB[SDA1] (Bromuro de hexadeciltrimetilamonio o Bromuro de cetiltrimetilamonio (($\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$), una sal de amonio cuaternaria que se conoce por las siglas CTAB, del inglés Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide) a los valores óptimos de pH y tg, muestra a la cual se le llamó X1S mientras que la muestra gelificada sin el agente direccionador se denominó X1.

La cantidad de agente direccionador de estructura adicionada fue superior a la concentración micelar crítica con una relación molar en concordancia con algunos investigadores

de: 1 SiO₂: 0.16 CTAB: 0.67 H₂SO₄: 120 H₂O (Zeng, W., 2014). Finalmente, X1 fue secada a 110 °C por 24 horas, mientras que X2S se calcinó a 600 °C durante 8 horas, con posterioridad a su secado para la remoción del surfactante presente dentro de la estructura del xerogel. Al analizar su efecto a través de BET, BJH e isothermas de adsorción-desorción en los materiales silíceos obtenidos, los resultados revelaron que el CTAB incrementó notoriamente el AE de las xerogeles obtenidas hasta valores de 1.057 m²/g, que es un resultado promisorio para ser considerado como material funcional para la captura de los gases de efecto invernadero y aplicaciones en materiales aislantes.

Las muestras fueron funcionalizadas mediante impregnación con una solución de TEPA, que es la amina tetraetilenpentamina, llamada también 1,4,7,10,13-pentaazatridecano y tetren,3, que es una poliamina de fórmula molecular C₈H₂₃N₅. Lo anterior, para darle la selectividad al CO₂, y analizar la captura de estos gases mediante el uso de una termobalanza a un flujo constante de CO₂ a temperatura ambiente.

Las xerogeles direccionadas de estructura fueron funcionalizadas con una solución de aminas alifáticas (TEPA), para darle selectividad a estos materiales en la captura de CO₂ donde posteriormente el efecto del TEPA en la capacidad de captación fue comparado a través un análisis con una termobalanza.

El uso de un agente direccionador de estructura como el CTAB incrementó promisoriamente el AE (SBET > 800 m²/g), desarrollándose xerogeles que tienen un importante potencial de funcionalización, puesto que también poseen un volumen de poros elevado (mayor 0,7 cm³/g) y con una estructura de poros similar a la a la observada en materiales catalíticos como el MCM-41. Con base en estos resultados se infiere que los xerogeles, como el X2S obtenido puedan ser aplicados en un amplio rango de usos con la valorización consiguiente de un desecho como la CA.

Las xerogeles obtenidas poseen una capacidad de fisiadsorción de CO₂ importante debido a su elevado valor de AE, con valores superiores a los 40 mg CO₂/g de ads obtenido en la termobalanza, un resultado similar a capacidades de captación de materiales sintéticos como el SBA-15.

Obtención de aerogeles mediante secado supercrítico

El secado supercrítico de los geles obtenidas del SS1 y SS2 se llevó a cabo en el laboratorio de Termodinámica Aplicada y Fluidos Supercríticos. Previamente se realizó el

intercambio de solvente en los geles en un sistema de recirculación soxhlet durante 8 horas para su posterior almacenamiento en etanol durante tres días. La extracción del solvente se hizo con CO₂ líquido llevándolo hasta condiciones supercríticas dentro de un autoclave. En el proceso inicialmente el gel y el solvente fueron depositados en una cámara, la cual se llenó con CO₂ líquido y se incrementó la presión a 2500 psi para un posterior calentamiento a 45 °C durante de 8 horas de recirculación de CO₂ supercrítico. Finalmente se despresuriza garantizando la ausencia de etanol en la muestra.

Aplicaciones de los productos obtenidos

La incorporación de aerogeles silíceas en diferentes matrices y la inclusión de estos geles en los materiales de construcción permiten obtener recubrimientos que proveen altas condiciones de confort como lo son el aislamiento acústico y térmico, ya sea en la fabricación de compuestos o en la utilización de recubrimientos multicapa para paredes entre otros elementos de construcción. El recubrimiento por ejemplo implementado para paredes (interiores o exteriores) se trata de mortero altamente liviano que puede ser aplicado a las superficies externas de un edificio por ejemplo para producir un revestimiento térmicamente aislante. Este material como tal consiste de un mineral y/o aglutinante hidráulico, un aislante de relleno que comprende los gránulos de aerogel de sílice hidrófobo, un relleno, y aditivos [42]. Cuando estos recubrimientos basados en aerogeles silíceas son fabricados con cerca del 60% en volumen de aerogel pueden llegar a tener densidades de 1,0 g/cm³, con una conductividad térmica de 0,26 W/m K y resistencias a la compresión del orden de los 8,3 MPa [37] entre otras aplicaciones.

Obtención de aerogeles silíceas mediante secado supercrítico rápido (SSR)

Se funcionalizaron las xerogeles silíceas con tetraetil pentamina, una solución de aminas alifáticas que permitió obtener un material funcional con capacidad de captura de CO₂ pasando de 43 a 148 mg de CO₂/g ads (adsorbido), lo cual es un resultado promisorio al comparar con el de sólidos comúnmente utilizados en la captación de gases de efecto invernadero en tecnologías post-combustión.

El método planteado para el intercambio de solvente fue efectivo al poder realizarse un secado supercrítico con CO₂, que permitió obtener aerogeles silíceas con una densidad de 0,08 g/cm³ y un volumen de poros del 96 %, comparable a las aerogeles obtenidas por precursores tóxicos y costosos como el TMOS y TEOS.

La aplicación de nanosílice (nS) en morteros de cemento portland genera en estos valores resistente superiores en un 30% en edades tempranas, siendo la muestra con 0,5 de adición con mejores resistencias a los 7 días de curado, en comparación con morteros sin adición. También fue posible emplear microsílíce obtenida del proceso químico como material de recubrimiento. La principal característica evaluada fue la conductividad térmica presentando una reducción del 45,8% respecto a la placa sin recubrimiento, con lo cual se comprobó su propiedad de aislamiento térmico.

Las Xerogeles obtenidas poseen una capacidad de fisiadsorción del CO_2 importante debido a su elevado valor de AE con valores superiores a los 40 mg CO_2 /g ads obtenido en la termobalanza, un resultado similar a capacidades de captación de materiales sintéticos como el SBA-15. La incorporación física de un compuesto orgánico mediante impregnación del TEPA, aunque redujo el área específica, los efectos combinados de absorción y adsorción confirieron a las xerogeles una gran capacidad de captación de CO_2 , alcanzándose un máximo de capacidad adsorbente de 148 mg de CO_2 /g ads a bajas temperaturas y presiones, lo que indica que estos valores son comparables a sólidos sintéticos funcionalizados como el MCM-41, que son empleados en tecnologías post-combustión de captación de gases de efecto invernadero y pueden ser utilizados en aplicaciones que ayuden a mitigar la gran problemática actual que estos gases generan.

La fase experimental fue desarrollada en los laboratorios del grupo Materiales Compuestos y en el laboratorio del Grupo de Termodinámica Aplicada y Fluidos Supercríticos para obtener las aerogeles mediante una fase final de secado supercrítico.

Publicaciones

Un trabajo titulado "Aerogel sílicea ecosostenible a partir de la cascarilla de arroz" el cual fue aprobado y presentado en modalidad de ponencia en el X Simposio de Investigaciones 2018, Universidad del Valle.

Publicado Silva, Y.F., Gordillo, M. and Delvasto, S., Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante. DYNA, 86(208), pp. 307-315, January - March, 2019. ISSN 0012-7353. DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73103>

Publicado. Silva, Y.F., Izquierdo, S.R. and Delvasto, S. Effect of masonry residue on the hydration of Portland cement paste. DYNA, 86(209), pp. 367-377, April - June, 2019 ISSN 0012-7353, DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77286>.

Yimmy F. Silva, David A. Lange and Silvio Delvasto. The setting time, linear length change, autogenous shrinkage and mechanical properties of mortars containing residue of masonry. Recibido para evaluación y publicación por la revista *Construction and Building Materials* de Elsevier. Junio 2019. En proceso de evaluación.

Aerogel sílicea ecosostenible a partir de la cascarilla de arroz. Ponencia en evento universitario nacional. X Simposio de investigaciones 2018. Cali, 2 a 4 de mayo de 2018

Tesis de Maestría concluida: Juan David Pardo Estrada. Tesis de Maestría. obtención de materiales síliceos a partir de ceniza de cascarilla arroz por procesos hidrotermales y de sol-gel con capacidad de captura de CO₂. Concluida

Informe final Joven Investigador: Eliana Rodríguez Cabrera. Convocatoria Nacional para Jóvenes Investigadores 2015 COLCIENCIAS. Obtención de nanosílice a partir de la cascarilla de arroz por método sol- gel para aplicación en morteros de cemento. Concluida

Documentos de Trabajos de grado ingeniería de materiales finalizados:

Diana Carolina Zuluaga Rosero (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)

Miller Alexis Fernández Ruiz (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)

David Steven Calambas Galvis (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)

Laura Marcela Bernal Medaglia (Trabajo de grado ingeniería de materiales, finalizado)

Principales conclusiones y/o recomendaciones

La significativa producción del residuo agroindustrial de CA la hace fuente de sílice importante, con más de un 20% de cenizas, esta debe ser tratada químicamente y quemada controladamente para obtener una mayor pureza y elevados contenidos de sílice reactiva (alrededor del 96% de SiO₂ amorfa), libres de contaminantes y óxidos.

El tratamiento químico con H₂SO₄ es adecuado para eliminar las impurezas presentes en la cascarilla de arroz (Na, K, Ca, y Al, principalmente), y además afecta levemente la parte

orgánica lo cual se pudo comprobar con el difractograma de rayos X, mostrando menos contenido de impurezas en la muestra de CCA limpia.

El difractograma de rayos X de la ceniza de cascarilla de arroz obtenida después de someter la cascarilla a un tratamiento con H_2SO_4 -1 N y calcinarla a 600 °C durante 2 horas, indica que es casi totalmente amorfa. Se recomienda comparar la solubilidad de esta sílice amorfa con la obtenida usando ceniza de cascarilla directamente obtenida de un combustor industrial.

Con el lavado de la CA y la posterior calcinación a 600°C se obtiene una ceniza blanca constituida principalmente de SiO_2 , con un alto valor de superficie específica. Esto permite la obtención de precursores silíceos con un grado de conversión entre el 93 y 95%, que son óptimos para la utilización de ellos en síntesis de materiales mesoporosos como el sol-gel.

El área superficial específica de la sílice se determinó mediante el método BET utilizando la absorción de nitrógeno a 77°K, se observan valores elevados de superficies específicas por Sol-Gel 774,96 m²g. La nanosílice se caracteriza por presentar valores altos de superficie específica lo cual se pudo comprobar. Sin embargo, se recomienda tener una tecnología de dispersión previa más energética antes de hacer el ensayo de BET.

Para la obtención de partículas de sílice se deben tener en cuenta parámetros como pH, tiempo de envejecimiento, temperatura de envejecimiento, concentración del silicato de sodio, tipo de ácido empleado para la precipitación de la sílice, entre otros. Debido a que estas variables desempeñan un papel importante en las características de la sílice como área superficial, tamaño y volumen de poro, pureza de la sílice y tamaño de partícula. Al realizar un adecuado manejo de estos factores se pueden tener diferentes tamaños de sílice.

Realizar un lavado con agua antes de la limpieza con ácido clorhídrico ayuda a tener cascarilla de arroz más libre de impurezas. Al realizar el proceso de filtración por bomba de vacío, podría resultar mejor emplear filtros de tela en vez de papel, dado que estos últimos, provocan que en algunos casos resulte fibras pertenecientes al filtro en la pasta de sílice.

Se comprobó que al ser mezclada la cascarilla de arroz con hidróxido de sodio (NaOH) se obtuvo silicato de sodio el cual es la base para la precipitación de sílice. En estudios posteriores se recomienda caracterizar el silicato de sodio realizando un análisis del contenido de sílice por medio de la norma ASTM D501 y el grado de alcalinidad por la norma NTC 1622, ya que

dependiendo de la concentración del silicato pueden variar las características de la sílice, como por ejemplo el área superficial. Al momento de precipitar la sílice adicionando el HCl a la solución de silicato de sodio, se recomienda realizarlo con agitación para evitar la formación de aglomerados.

A bajas condiciones de operación (tg: 18h y T: 25 °C) y siguiendo un proceso amigable con el ambiente, puesto que no se usan precursores tóxicos y costosos como los TMOS o TEOS, es posible obtener materiales silíceos con micro y mesoporosidad bimodal (Isotermas tipo IV: H1 y H4), que son altamente catalíticos (SBET > 800 m²/g), y que tienen un importante potencial de funcionalización debido al alto volumen de poros mayor 0.7 cm³/g. Con base en estos resultados se infiere que los xerogeles, especialmente el X2S obtenido puede ser aplicado en un amplio rango de usos con la valorización consiguiente de un desecho como la CA.

La resistencia a la compresión de los morteros adicionados con nS demuestran valores 30% debido a su tamaño nano y su elevada área específica sin olvidar su estado amorfo.

Los parámetros del proceso sol-gel (temperatura de calcinación, pH, etc.). De la nS calcinada a la temperatura de 600 ° C tiene mayor eficiencia en la mezcla de cemento en términos de resistencia a la temprana edad.

Al añadir nanosílice se beneficia el material en términos de estabilidad, gracias a su microestructura densa y homogénea, pero desde el punto de vista de resistencia no se obtienen resistencias tan elevadas a edades mayores como para justificar el elevado precio de este tipo de nanopartícula.

Fue posible emplear la microsílíce obtenida del proceso químico como material de recubrimiento. La principal característica evaluada fue la conductividad térmica presentando una reducción del 45,8% respecto a la placa sin recubrimiento, con lo cual se comprobó su propiedad aislante.

Se obtuvieron hidrogeles silíceas a partir de la cascarilla de arroz con 14 días de gelificación y con una resistencia mecánica capaz de soportar el secado supercrítico y con una apariencia traslúcida.

El método planteado para el intercambio de solvente fue efectivo al poder realizarse un secado supercrítico con CO₂, que permitió obtener aerogeles silíceas con una densidad de 0,08

g/cm³ y un volumen de poros del 96 %, comparable a las aerogeles obtenidas por precursores tóxicos y costosos como el TMOS y TEOS.

4. Impactos actual o potencial

Se desarrolló la capacidad de realizar ensayos de laboratorio hacia la obtención de aerogeles de silicio. Esto será útil en el proyecto que se aprobó en la convocatoria 808- 2018, contrato 141 de COLCIENCIAS.

Se identificaron las variables optimas de obtención de los precursores silíceos y de la gelificación para obtener aerogeles a partir de la CA.

Se formó capital humano, a niveles de pregrado y postgrado, en un proceso de tecnología innovadora, que probablemente agenciará futuros procesos de desarrollo tecnológico en la valorización de la sílice obtenida del desecho cascarilla de arroz.

Un efecto colateral del uso de la sílice es su empleo como filler y puzolana en concretos autocompactantes, que, entre otros beneficios, trae la eliminación del empleo de equipos vibradores en la colocación y compactación de mezclas de concreto autocompactante.

Los pasos dados en este proyecto apalancarán al nuevo proyecto apoyado por Colciencias y sus resultados en cuanto los impactos futuros en el desarrollo y comercialización de nuevos productos de recubrimientos superaislantes con el consecuente incremento del ingreso de los cultivadores de arroz por la valorización de uno de los tipos de residuos de su cultivo. Este logro importante, que resultó de este proyecto, fue la capacidad del grupo para formular una propuesta, que logró la máxima calificación en su categoría en la convocatoria 808- 2018 de Colciencias.

Los resultados del proyecto han motivado a industrias del sector arrocero a un mayor interés por participar en las investigaciones, cuyas aplicaciones brinden un valor agregado elevado al incorporar en la cadena de productos, aquellos derivados de la aplicación de tecnologías elevadas. Con base en las conversaciones con el gerente y copropietario de Arrocería La Esmeralda de Jamundí es probable que tomen la decisión de participar en el proyecto aprobado por Colciencias.

Desarrollos futuros

Los aerogeles son materiales que parten de fuentes o recursos renovables como la CA y serán productos obtenidos con criterios de sostenibilidad ambiental mediante química verde y con características fuertemente innovadoras y de alto valor agregado como lo son las aerogeles síliceas. En el caso específico del área de la construcción se generará un impacto desarrollar aplicaciones con propiedades de superaislamiento térmico de alto confort, amigables con el ambiente (eco materiales), y que además serán de fácil empleo en edificaciones. El empleo de la cascarilla de arroz -que es un residuo que genera grandes problemáticas al ambiente por su difícil biodegradación, manipulación y su alto volumen producido-, en la elaboración de aerogeles síliceas, generará un gran impacto en el ámbito ambiental, en el social y en el de la construcción, dándole un alto valor económico agregado muy superior al que tiene actualmente. Adicionalmente las aplicaciones basadas en aerogel que se pretenden obtener permitirán valores de aislamiento superiores en espacios menores que los materiales de aislamiento convencionales; esto por las características extraordinarias de las aerogeles. Los mejores productos de construcción de base de aerogel, como las tablas rígidas, revoques aislantes y revestimientos de aislamiento térmico, pueden presentar un rendimiento térmico hasta tres veces superior a los productos similares. A la hora de renovar con espacio limitado, las soluciones de base de aerogel pueden ayudar a alcanzar requisitos estrictos de eficiencia energética. En construcciones nuevas los arquitectos ganan una flexibilidad superior cuando diseñan edificios modernos lo que se traduce en un menor consumo de material, a la hora de producir aislamiento y en una mayor eficiencia de los recubrimientos. De la misma manera estos recubrimientos superaislantes en elementos de construcción contribuirán con el ahorro de energía, siendo en la actualidad el consumo de energía una problemática importante que afecta no solo el panorama ambiental si no también aspectos económicos y sociales de nuestra región. Se disminuirá el consumo de energía eléctrica por reducción de la intensidad de los aires acondicionados o sistemas de climatización en hogares o en procesos industriales que requieran temperaturas de trabajo específicas, y brindará mejores condiciones de salud al aumentar la sensación de confort en el hábitat humano y disminuir la contaminación auditiva.

5. Productos

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
					1			
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
	1					2		
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
☐ Prototipos y patentes								
☐ Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado	2		-		4		2	
Semillero de Investigación								
Estudiantes de maestría	1		1		1		1	
Estudiantes de doctorado	-		-		3			
Joven investigador					1			
Productos de divulgación								
Publicaciones en revistas no indexadas								

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1		1	
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.		1	1	

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante. DYNA, 86(208), pp. 307-315, January - March, 2019. ISSN 0012-7353. DOI: http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73103
Nombre Particular:	Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante.
Ciudad y fechas:	Medellín, January - March, 2019
Participantes:	Silva, Y.F., Gordillo, M. and Delvasto, S.,
Sitio de información:	DOI: http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73103 . Open journal
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Effect of masonry residue on the hydration of Portland cement paste. DYNA, 86(209), pp. 367-377, April - June, 2019. ISSN 0012-7353
Nombre Particular:	Effect of masonry residue on the hydration of Portland cement paste.
Ciudad y fechas:	Medellín, April - June, 2019
Participantes:	Silva, Y.F., Izquierdo, S.R. and Delvasto, S.
Sitio de información:	DOI: http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77286 . Open journal

Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle
-----------------------	--

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Recibido para evaluación y publicación por la revista Construction and Building Materials de Elsevier en junio 2019
Nombre Particular:	The setting time, linear length change, autogenous shrinkage and mechanical properties of mortars containing residue of masonry
Ciudad y fechas:	Ciudad y fecha de publicación o presentación del resultado.
Participantes:	Yimmy F. Silva, David A. Lange and Silvio Delvasto
Sitio de información:	Biblioteca, bases de datos, Science Direct
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Ponencia en evento universitario nacional
Nombre General:	X Simposio de investigaciones 2018
Nombre Particular:	Aerogel sílicea ecosostenible a partir de la cascarilla de arroz
Ciudad y fechas:	Cali, 2 a 4 de mayo de 2018
Participantes:	Michael Andrés Gómez Rivera, Juan David Pardo, David Calambas, Silvio Delvasto, PhD, Gustavo Bolaños, PhD, Isabel Mejía, PhD
Sitio de información:	Memorias del evento- Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Trabajo de Investigación de Magister en Ingeniería Área de Énfasis en Ingeniería de Materiales (Tesis de Maestría)
Nombre General:	Magister en Ingeniería Área de Énfasis en Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle
Nombre Particular:	Obtención de materiales síliceos a partir de ceniza de cascarilla arroz por procesos hidrotermales y de sol-gel con capacidad de captura de CO ₂
Ciudad y fechas:	Enero, 2019
Participantes:	Juan David Pardo Estrada
Sitio de información:	Biblioteca Central de la Universidad del Valle

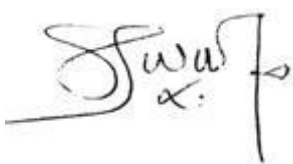
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle
-----------------------	--

Tipo de producto:	Informe final
Nombre General:	Joven Investigador, Convocatoria Nacional para Jóvenes Investigadores 2015 COLCIENCIAS.
Nombre Particular:	Obtención de nanosílice a partir de la cascarilla de arroz por método sol- gel para aplicación en morteros de cemento. Concluida
Ciudad y fechas:	Cali, abril 2017
Participantes:	Eliana Rodríguez Cabrera
Sitio de información:	Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Trabajo de grado
Nombre General:	Trabajo de grado, ingeniería de materiales, Universidad del Valle
Nombre Particular:	Estudio de un recubrimiento elaborado a partir de microsílíce para placas de fibrocemento
Ciudad y fechas:	Septiembre, 2017
Participantes:	Diana Carolina Zuluaga Rosero y Miller Alexis Fernández Ruiz
Sitio de información:	Biblioteca Central de la Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Trabajo de grado
Nombre General:	Trabajo de grado, ingeniería de materiales, Universidad del Valle
Nombre Particular:	Utilización de la cáscara de huevo como material base en la síntesis de whiskers de carbonato de calcio por sol-gel
Ciudad y fechas:	Cali, agosto de 2018
Participantes:	David Steven Calambas Galvis y Laura Marcela Bernal Medaglia
Sitio de información:	Biblioteca Central de la Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle

Tipo de producto:	Proyecto de investigación
Nombre General:	COLCIENCIAS código 110680863720. Contrato de Financiamiento de Recuperación Contingente 141.
Nombre Particular:	Aerogeles silíceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en superaislamiento térmico de edificaciones"
Ciudad y fechas:	Cali, iniciación junio 10 de 2019 por tres años
Participantes:	Silvio Delvasto, investigador principal, coinvestigador: Gustavo Bolaños, y estudiantes de postgrado y pregrado.
Sitio de información:	COLCIENCIAS y VRI Univalle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación Materiales Compuestos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, y Grupo de Termodinámica Aplicada y Fluidos Supercríticos, Escuela de Ingeniería Química



Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones



ANEXOS: DOCUMENTOS DE SOPORTE

Valorization and optimization of residue of masonry for the production of self-compacting concrete

Yimmy Fernando Silva ^a, Marisol Gordillo ^b & Silvio Delvasto ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co, Silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

^b Facultad de Ciencias básicas, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. mgordillo@uao.edu.co

Received: June 26th, 2018. Received in revised form: December 7th, 2018. Accepted: December 28th, 2018.

Abstract

The use of different supplementary cementitious materials (SCM) in the production of self-compacting concretes (SCCs) is an increasingly common practice. In this paper, results of a research about the use of residue of masonry (RM) as SCM are presented. Frattini test, resistance activity index and thermogravimetry testing were carried out. The influence of RM on the fresh and hardened properties of the SCC was studied by replacing the Portland cement in percentages of 0 to 50% by volume. The fresh properties of the SCCs were measured by slump flow test, L-box and V-funnel. The test results showed that the RM has pozzolanic activity and can be used as SCM. The SCC manufactured with RM presented good performance in terms of self-compactability; however, the RM, because of its low reactivity at early ages, showed a decrease in the compressive strength, that was directly proportional to the percentage of replacement.

Keywords: residue of masonry; pozzolanic activity; supplementary cementitious material; self-compacting concrete; compressive strength.

Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante

Resumen

El empleo de diferentes materiales cementicios suplementarios (MCS) en la elaboración de concretos autocompactantes (CACs) es una práctica cada vez más frecuente. En este artículo se presentan resultados de una investigación acerca de la utilización del residuo de mampostería (RM) como MCS. El material se caracterizó utilizando la prueba de Frattini, índice de actividad de resistencia y termogravimetría. La influencia del RM en las propiedades del CAC se evaluó reemplazando el cemento Portland en porcentajes de 0 a 50% en volumen. Las propiedades en estado fresco de los CAC se evaluaron mediante los ensayos de flujo de asentamiento con cono de Abrams, caja en L y embudo en V. Los resultados muestran que el RM presenta actividad puzolánica y puede ser empleado como MCS. El CAC elaborado con RM presentó buen comportamiento en términos de autocompactabilidad; sin embargo, el RM, al presentar baja reactividad a edades tempranas, mostró disminución en la resistencia a la compresión en forma directamente proporcional al porcentaje de reemplazo.

Palabras clave: residuo de mampostería; actividad puzolánica; material cementicio suplementario, concreto autocompactante; resistencia a la compresión.

1. Introducción

La forma tradicional de edificación que ha sido empleada desde la antigüedad para construir estructuras e infraestructura, es la construcción en mampostería de ladrillo de arcilla [1]. Estos materiales de construcción se siguen empleando en este campo por sus buenas propiedades, como

son un buen aislamiento térmico y acústico, resistencia mecánica, facilidad de disponibilidad, durabilidad, costo y reducción en los tiempos de construcción [2,3].

La mampostería puede verse como un compuesto de dos constituyentes, ladrillo y mortero [4] y constituye un porcentaje importante del volumen de los residuos de construcción y demolición (RCD). Los ladrillos generalmente se producen a partir



Figura 1. Ejemplo de viviendas unifamiliar construidas con muros de mampostería de ladrillo de arcilla
Fuente: propia.

de arcilla como material plástico, con adición de arena y comúnmente son cocidos en un horno a una temperatura que oscila entre 850 °C y 950 °C, por lo que se puede esperar en ellos alguna actividad puzolánica. La producción anual de ladrillos en el mundo se encuentra en 1391 billones de unidades con un aumento continuo de la demanda debido al continuo incremento del proceso de construcción [5]. Además de la fabricación de ladrillos de arcilla, se generan desechos de ladrillos cocidos los cuales son producidos en el proceso de fabricación de los mismos. Por ejemplo, en Egipto la cantidad de desechos de ladrillos de la producción total es de aproximadamente 3-7%, lo que sugiere que millones de toneladas de residuos de ladrillos son generados y dispuestos en enormes rellenos sanitarios en las fábricas de ladrillos [6]; en China se generan aproximadamente 400 millones de toneladas de residuos de ladrillo cada año, y en Portugal se estima que el 37% de los productos tratados térmicamente de la industria cerámica son residuos [7]. En otros países como Brasil, India y Rusia grandes cantidades de residuos de ladrillos también se producen [8,9].

Por otra parte, la urbanización en los últimos años, ha generado grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) [10], los cuales están constituidos por residuos de mampostería en gran parte. En algunos países de Europa como España, más del 50% de los RCD está formado por residuo de mampostería (ladrillo de arcilla cocido y mortero-RM) [11]. En Colombia, la mayoría de las casas unifamiliares son construidas empleando muros de mampostería de ladrillos de arcilla (Fig. 1), que al momento de una remodelación generan grandes cantidades de RM. Por ejemplo en Cali, Colombia, de los 2480 m³ de RCD que se generan por día, el 23,4% lo aportan las remodelaciones de particulares en viviendas [12].

El uso de los RM molidos o de ladrillo de arcilla cocido como reemplazo del cemento en la producción de concreto traería beneficios ambientales derivados de la reducción de cemento Portland empleado para la fabricación de este material compuesto [13]. Por otra parte, el empleo de este tipo de RCD aportaría a la solución de los problemas de polución generados en la producción de ladrillos, además de una alternativa para la reducción de muchos problemas ambientales debidos a su disposición final.

Otra de las ventajas de emplear los RM como adición en el cemento Portland es debido a que los ladrillos de arcilla al calcinarse entre 600-1000 °C exhiben alguna actividad puzolánica, en parte equivalente a la de la ceniza volante

[14,15]. En las arcillas al calcinarse entre 500-900 °C se produce deshidroxilación de los minerales de la arcilla formando el metacaolín y materiales amorfos con reactividad puzolánica [13,16].

Generalmente las arcillas contienen cantidades significativas de caolinita que se transforman en metacaolín durante la cocción [17]. Entre las variables para conseguir una buena actividad puzolánica de las arcillas se encuentra la temperatura, y en el caso del caolín, la temperatura óptima de quema es de 700 °C. Si la quema es por debajo de esta temperatura se forma un producto menos reactivo debido a la caolinita remanente, cuya cantidad depende del tiempo de cocción. Por el contrario, si la temperatura de combustión es mayor que 850 °C, la reactividad del metacaolín disminuye [18]. Otro parámetro que influencia en la puzolanidad es el tamaño de partícula que también presenta efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla.

Normalmente, los RM o los ladrillos de arcilla triturados se emplean como agregado en el concreto. Los efectos de estos residuos como agregado en las propiedades en estado fresco y endurecido se han estudiado ampliamente [19-21]. El empleo de este material como adición a mezclas de concreto autocompactante (CAC) es todavía limitado. Actualmente se reportan investigaciones del uso de polvo de ladrillo de arcilla en concretos convencionales y del residuo de mampostería como reemplazo de cemento Portland en menor grado [22,23]. La incorporación del RM proveniente de RCD en los CACs ayudaría a resolver problemas ambientales, mediante la reducción del uso de cemento Portland, la disminución de la explotación de recursos naturales y una menor necesidad de vertederos para su disposición final. Por otra parte, el uso del CAC ha ido ganando terreno en Colombia en los últimos años debido a sus ventajas en comparación con el concreto convencional. Las ventajas que presenta el CAC son: Menor tiempo de construcción, eliminación del vibrado, mayor libertad de diseño arquitectónico, entre otros. Las características del CAC se atribuyen a su poca resistencia al flujo, por lo que puede colocarse y compactarse bajo su propio peso sin ningún esfuerzo de vibración.

Motivado por las propiedades puzolánicas que puede presentar el residuo de mampostería como material cementicio suplementario y las ventajas que ofrece el CAC, el objetivo de este estudio fue investigar el efecto del RM en las propiedades en estado fresco del CAC mediante el reemplazo en diferentes porcentajes de volumen del cemento Portland. Además de determinar el porcentaje óptimo de reemplazo de RM para obtener una resistencia a la compresión de 38 MPa a 28 días de curado (edad de referencia) y estudiar el efecto de su incorporación en las mezclas investigadas.

2. Metodología experimental

2.1. Materiales

2.1.1. Cemento

El cemento Portland (OPC) de uso general empleado en este estudio se adquirió de una planta local de Colombia. La

Tabla 1.

Composición química y propiedades físicas del OPC y RM.

Características	RM	OPC
Caracterización química		
SiO ₂	56,86	19,39
Al ₂ O ₃	15,53	4,13
Fe ₂ O ₃	7,63	4,70
CaO	7,88	55,66
MgO	2,95	1,70
K ₂ O	1,36	0,28
TiO ₂	0,75	0,25
SO ₃	0,55	3,90
Na ₂ O	2,49	0,31
Pedidas por ignición	3,39	9,21
Propiedades físicas		
Densidad (kg/m ³)	2630	3100
Tamaño medio de partícula (μm)	24,08	20,67

Fuente: propia.

composición química se determinó mediante fluorescencia de rayos X empleando un Espectrómetro Phillips MagiX-Pro PW-2440, y el tamaño de partícula se determinó empleando un granulómetro laser Mastersizer-2000 de Malvern Instruments. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

2.1.2. Residuo de mampostería

El residuo de mampostería empleado como material cementicio suplementario procedió de la demolición de varias viviendas unifamiliares. Para su empleo el RM se separó de los otros residuos de demolición como plástico, papel y baldosas (Fig. 2). Posterior a ello, la reducción de tamaño del residuo se desarrolló en dos etapas; en primera instancia los trozos de RM se introdujeron en una trituradora de mandíbula y posterior a ello, se molieron en un molino de bolas. Cuando el RM se adecuó para su empleo, se procedió a determinar la composición química y tamaño de partícula, los cuales se presentan en la Tabla 1

La actividad puzolánica del RM se evaluó por dos métodos químicos como son la prueba Frattini y el consumo de la portlandita por medio de termogravimetría [24]; y por método físico mediante el índice de actividad de resistencia (*Strength activity index* (SAI)) de acuerdo a la ASTM C311 [25]. El SAI se calculó según la ec. 1.

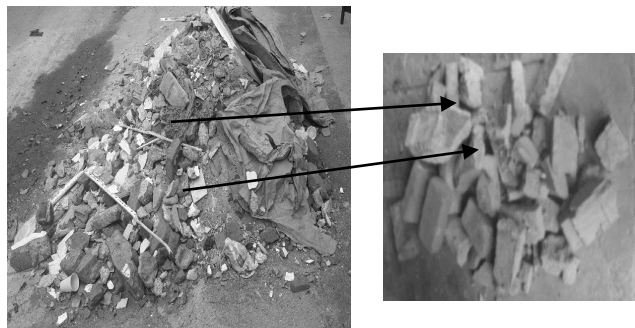


Figura 2. Residuo de mampostería (RM) proveniente de residuo de demolición.

Fuente: propia.

Tabla 2.

Distribución del tamaño de partícula y propiedades físicas de los agregados.

Porcentaje que pasa acumulado (%)		
Tamaño del Tamiz (mm)	Agregado fino	Agregado grueso
12,5	-	100
9,5	-	42,76
4,75	94,36	0,64
2,36	88,59	0,4
1,18	81,36	0,38
0,6	68,5	0,35
0,3	37,32	-
0,15	4,47	-
módulo de finura	2,25	-
Propiedades físicas		
Densidad Aparente (kg/m ³)	2.421	2.784
Densidad SSS ^a (kg/m ³)	2.468	2.827
Absorción de agua (%)	1,92	1,56

a: Abreviatura SSS: Densidad saturada superficialmente seca

Fuente: propia.

$$SAI = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

Donde, A es la resistencia media a la compresión de cubos de mortero que incorporaron RM y B es la resistencia media a la compresión de cubos de mortero de control (100% cemento Portland como cementante). Para las cenizas volantes y material puzolánico natural, se recomienda un índice de actividad de resistencia mayor a 75% como requisito mínimo para poder ser definido como material cementoso suplementario según ASTM C618 [26].

2.1.3. Agregados

Arena de río y grava triturada con una gradación continua se utilizaron como agregados. La distribución de partículas y propiedades físicas se registran en la Tabla 2.

2.1.4. Superplastificante

Se empleó un aditivo líquido (Sikaplast® 328) compuesto de resinas sintéticas y polímeros de última generación como superplastificante (SP). Su pH se encontraba en $5 \pm 1,5$ y presentaba una densidad de $1080 \pm 30 \text{ kg/m}^3$.

2.2. Diseño de mezcla

En el presente estudio, se realizaron un total de cinco (5) mezclas diferentes de CAC, incluyendo una mezcla de referencia y cuatro mezclas con distintos porcentajes de reemplazo (12,5%, 25%, 37,5% y 50%) en volumen de cemento Portland por RM. Las mezclas de CAC tenían un volumen de aglutinante fijo de 16,12% por metro cúbico, equivalente para el CAC de referencia (CAC Patrón) a 500 kg/m³. El contenido de agua se mantuvo constante en 202,5 kg/m³ para todas las mezclas, al igual que la cantidad total de agregados, la cual fue de 1581,3 kg/m³.

2.3. Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño de experimento de mezclas, específicamente de vértices extremos, el cual tiene la

característica de abarcar un menor espacio dentro de la superficie de experimentación, debido a las restricciones de las componentes. Con el fin de determinar el porcentaje óptimo de reemplazo de RM por OPC para obtener el CAC con una resistencia a la compresión de 38 MPa, con el mayor porcentaje de reemplazo de este residuo. La Tabla 3 presenta las mezclas que genera el diseño de vértices extremos para la optimización de la resistencia a la compresión; para ello se requirieron ocho (8) ensayos o mezclas, de las cuales cuatro (4) corresponden al punto central, dos (2) al punto factorial y dos (2) a los puntos axiales.

La variable de respuesta (resistencia a la compresión (MPa)), se estimó a los 28 días de curado. El modelo matemático empleado para procesar los datos se determinó por la Ecuación 2.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \varepsilon \quad (2)$$

Donde Y es la variable de respuesta “resistencia a la compresión”; β (s) son los coeficientes del modelo determinados por el método de mínimos cuadrados; X1 representa OPC y X2 representa a RM; X1X2 es el efecto de la interacción, y ε es el error experimental.

2.4. Preparación de las muestras

Para las mezclas que presentaban RM en su composición, en primer lugar, el cemento Portland y el RM fueron homogenizados manualmente antes de su mezclado. El agregado grueso y el agregado fino se cargaron en la mezcladora y se dosificaron con un mínimo de agua durante 60 segundos, posteriormente se detuvo la mezcladora durante 60 ± 15 segundos para aumentar la humedad de los agregados, después se prendió de nuevo el equipo de mezcla y se añadió el aglutinante (OPC para la mezcla de control y OPC + RM para las mezclas con residuo de mampostería) seguido por 2/3 del agua de restante y se mezcló durante 120 segundos; finalmente se añadió el otro tercio del agua con la dosis de SP disuelto y se mezcló durante otros 120 segundos para obtener el concreto fresco, este proceso es similar al empleado por Ashteyat et al [27]. Antes de vaciar el CAC en los moldes se utilizaron diferentes pruebas en estado fresco para evaluar su trabajabilidad. Luego el CAC fresco se colocó en moldes de acero sin ninguna vibración o compactación. Después del vaciado de la mezcla en los moldes, todos los especímenes fueron cubiertos con una hoja plástica a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Después de 24 horas, las mezclas fueron retiradas de los moldes y se curaron bajo agua hasta el día del ensayo.

Tabla 3.
Diseño de mezcla.

Nº de mezcla	Orden	Pt type	Block	OPC	RM	Identificación de la Mezcla
1	8	0	1	0,75	0,25	CAC 25%
2	7	0	1	0,75	0,25	CAC 25%
3	5	-1	1	0,875	0,125	CAC12,5%
4	2	1	1	1	0	Patrón
5	4	-1	1	0,625	0,375	CAC 37,5%
6	1	1	1	0,5	0,5	CAC 50%
7	6	0	1	0,75	0,25	CAC 25%
8	3	0	1	0,75	0,25	CAC 25%

Fuente: propia.

2.5. Métodos de prueba

2.5.1. Pruebas en estado fresco

Diferentes pruebas se realizaron de acuerdo con la EFNARC [28] para evaluar el efecto del RM en las propiedades en estado fresco del CAC. El flujo de asentamiento (*slump flow test*) se realizó con el cono de Abrams, con la finalidad de evaluar la capacidad del CAC de deformarse bajo la acción de su propio peso sin ninguna restricción, al mismo tiempo, este ensayo permitió comprobar visualmente la posibilidad de segregación del concreto. El margen habitual del flujo de asentamiento debe de estar entre 550 mm a 850 mm [29]. La capacidad de llenado se realizó mediante el ensayo en el embudo en V (*V-funnel test*), donde se determina el tiempo en que la mezcla se demora en salir del embudo por la acción de su propio peso, el cual debe ser inferior a 25 segundos de acuerdo con el grupo de proyectos europeos [29]. La capacidad de paso y llenado se midió mediante la prueba de la caja en L (*L-box test*), la cual consiste en llenar la parte vertical de una caja en forma de L para posteriormente abrir una compuerta en la sección vertical para dejar fluir el concreto hacia la sección horizontal pasando a través de 3 varillas. La altura del CAC al final de la sección horizontal (H2) se comparó con la altura del CAC que permanece en la sección vertical (H1) para obtener la relación de bloqueo H2/H1. El valor mínimo de esta relación es de 0,8 de acuerdo a la EFNARC [28].

2.5.2. Pruebas en estado endurecido

La resistencia a la compresión se determinó de acuerdo con ASTM C39 [30]. Para ello se utilizaron tres especímenes cilíndricos (76,2 mm X 152,4 mm) para cada una de las edades de curado (7, 28 y 60 días) empleando una prensa hidráulica ELE de 1000 KN de capacidad. La prueba de absorción de agua junto con el cálculo de la densidad se realizó de acuerdo con los requisitos de ASTM C642 [31] a los 28 días de curado de los especímenes.

3. Resultados y discusiones

3.1. Actividad puzolánica del residuo de Mampostería (*Pozzolanic activity of RM*)

3.1.1. Índice de actividad de puzolánico - SAI (*Strength activity index test*)

Basados en los criterios de la ASTM C618 [26] se determinó el índice de actividad de resistencia, el cual se llevó a cabo a los 28 días de curado. De acuerdo con la Tabla 4, el RM cumple con el requerimiento de ASTM C618 [26]. El índice de actividad de resistencia varía cuando se reemplaza el 20% del OPC en peso o volumen. Cuando el reemplazo se realiza en volumen se obtuvo un mayor SAI en comparación a cuando el reemplazo se realiza en peso, sin embargo, ambas mezclas cumplieron satisfactoriamente con la ASTM C618 [26], ya que el SAI obtenido fue mayor al establecido en esta ($>75\%$) (Tabla 4). Además, se puede apreciar que el RM también cumplió con el requerimiento químico de la suma de los componentes $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ya que este presenta más de un 80% de estos compuestos (Tabla 4).

3.1.2. Prueba de Frattini

La prueba de Frattini se empleó para validar los resultados del SAI. Los resultados de esta prueba se presentan en la Fig. 3, donde se puede observar que las concentraciones de $[\text{OH}]^-$ y $[\text{Ca}]^{+2}$ de las mezclas que contenían 80% de Cemento Portland y 20% de RM a 40°C a los 7 días de curado se encuentran por encima de la curva de solubilidad de cal, lo que indica cero de actividad puzolánica o al menor que es insuficiente según el estándar. Esto se atribuye a la posible presencia de un mayor número de partículas gruesas, lo que genera una menor área superficial del material puzolánico y de esta forma una disminución en la velocidad de reacción, además por la presencia de compuestos cristalinos en el RM [32]. Por otra parte, a los 28 días se presenta una eliminación positiva de Ca^{+2} de la solución lo cual se atribuye a la actividad puzolánica del RM [33], ubicándose en la región puzolánica por debajo de la curva de saturación.

Tabla 4.
Propiedades físicas y químicas de la puzolana (ASTM C618) [26].

Requerimientos	Puzolana	
	Clase N (ASTM C618)	RM
Requerimientos Físicos		
Cantidad retenido cuando se tamiza en húmedo en el tamiz de 45 μm	máx., 34	17,08
Índice de actividad puzolánica, a los 28 días (%wt), porcentaje de control	min, 75	91,4
Índice de actividad puzolánica, a los 28 días (%vol), porcentaje de control	-	94,9
Requerimiento químico		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, %	min, 70	80,02
Trióxido de azufre (SO_3), %	máx., 4,0	0,557
Contenido de humedad %	máx., 3,0	-
Pérdida al fuego %	máx. 10,0	3,39

Fuente: propia.

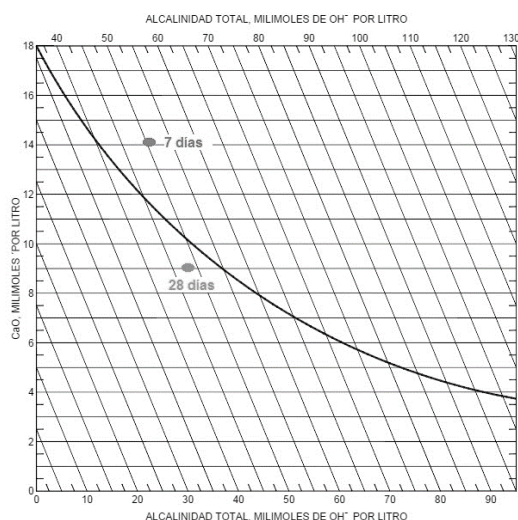


Figura 3. Resultados de la prueba de Frattini a 7 y 28 días para el residuo de mampostería.

Fuente: propia.

3.1.3. Análisis térmico

La actividad puzolánica (capacidad de unión de la cal) del residuo de mampostería también se determinó mediante termogravimetría. Este método se basa en la descomposición térmica del hidróxido de calcio cristalino en óxido de calcio y agua en un rango de temperatura de 400-520 °C. La actividad puzolánica se estimó en pastas de OPC con 20% de RM en comparación con la pasta de 100% OPC después de 3 y 28 días de curado (Fig. 4).

La disminución de la portlandita puede observarse en los resultados cualitativos del pico correspondiente a la deshidroxilación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La cal fijada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)) puede ser calculada empleando la ecuación 3 [24,34,35].

$$\text{Fijación } \text{Ca}(\text{OH})_2(\%) = \frac{\text{CHo} - \text{CHp}}{\text{CHo}} \times 100 \quad (3)$$

Donde, CH_0 es la cantidad inicial de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en la pasta OPC para una edad de curado determinada y CHp es la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la pasta con puzolana a la misma edad, la cual se calcula a partir de la curva de TG de la pasta.

La cantidad de hidróxido de calcio CHp remanente en la pasta puede ser calculado con la Ecuación 4. Se conoce que la pérdida de masa en la curva termogravimétrica es asociada con la deshidroxilación del hidróxido de calcio [35].

$$\text{CHp} = \frac{H}{M_w} \times M_c \quad (4)$$

Donde, H es la pérdida de masa asociada con la deshidroxilación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, M_w es la masa molecular del agua y M_c es la masa molecular del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En la Tabla 5 se registran los resultados obtenidos de la Ecuación 3; en esta se aprecia que sí se presenta una fijación de la cal en las pastas con RM, que aumenta desde 13.82% a los 3 días de curado a 26,54% a los 28 días de curado.

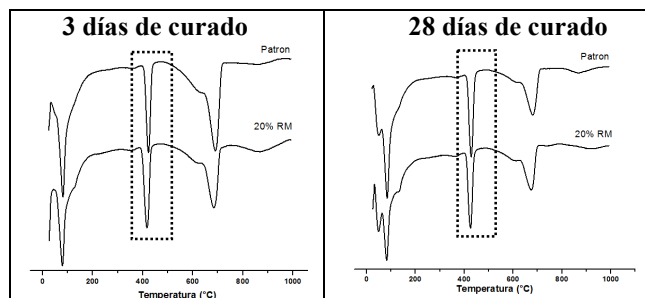


Figura 4. Curvas de DTG de la pasta de 100% OPC (Patrón) y pasta con 20% RM y 80% OPC a 3 y 28 días de curado.

Fuente: propia.

Tabla 5.
Porcentaje de generación de cal y fijación de cal de pastas a 3 y 28 días de curado.

	Generación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$		%Cal Fijada	
	3 días	28 días	3 días	28 días
Patrón	57,49	74,04	No Aplica	
20% RM	49,55	54,39	13,82	26,54

Fuente: propia.

3.2. Propiedades en estado fresco

La mezcla de concreto se puede catalogar como concreto autocompactante si los requisitos de capacidad de paso, relleno y resistencia a la segregación se cumplen de acuerdo a lo establecido por la EFNARC [28]. Estas propiedades en estado fresco se evaluaron mediante el flujo de asentamiento, embudo en V y caja en L, y se muestran en la Tabla 6.

En la prueba de flujo de asentamiento, los diámetros de todas las mezclas se encontraron en un intervalo de 660 mm – 700 mm. La incorporación del RM disminuyó la fluidez de los CAC en un pequeño porcentaje (< 3%) para la mezcla con 12,5% de RM (CAC 12,5% RM), sin embargo la mezcla con 50% RM (CAC 50% RM) presentó el mayor flujo de asentamiento, que puede ser atribuido a que esta mezcla es la de mayor volumen de reemplazo y a que las partículas del RM presentan un mayor tamaño medio de partícula en comparación con el cemento, lo que representa un menor contenido de agua para mojar la superficie de las partículas. Mediante este ensayo también se observa que las mezclas no presentaron segregación. Como se mencionó anteriormente, el flujo de asentamiento debe de estar entre 550 mm – 850 mm de acuerdo a la European Project Group [29] y todas las mezclas se encontraron en este rango.

El tiempo en el embudo en V también se calculó para tener un estimativo de la capacidad de llenado de los CACs. Se puede observar en la Tabla 6 que el tiempo más bajo lo presentó la mezcla CAC 12,5% con 8,89 segundos, mientras el de mayor tiempo lo presentó el CAC 37,5%. Los tiempos de las mezclas de CAC se encuentran entre los límites establecidos por la EFNARC (6-12 s) y EPG (2-25 s). Un tiempo más elevado en el embudo V indica una alta viscosidad [36].

La prueba de caja en L evalúa la capacidad de paso del concreto, todas las mezclas de CAC exhibieron una relación de bloqueo entre 0,80 y 0,91, donde la menor relación la presentó el CAC 12,5% equivalente a 0,80 la cual se ubica en el límite inferior de esta prueba de acuerdo a la EFNARC. No obstante, concretos con coeficientes de bloqueo inferiores al límite establecido, han dado resultados aceptables en aplicaciones estructurales [37].

En general, se observa que todas las mezclas presentaron propiedades aceptables en estado fresco cumpliendo las especificaciones para ser considerado como CAC.

3.3. Propiedades en estado endurecido

La resistencia a la compresión se evaluó a los 7, 28 y 60 días de curado, mientras que la densidad, absorción y porosidad se realizó a los 28 días de curado. Cada valor reportado es la media de los resultados de tres especímenes.

Tabla 6.
Resultados de prueba de trabajabilidad de los CAC.

TIPO DE CAC	Flujo de asentamiento (mm)	Embudo en V (s)	Caja en L (H2/H1)
Patrón	680	9,26	0,85
CAC 12,5%	660	8,89	0,80
CAC 25%	690	9,35	0,90
CAC 37,5%	670	10,02	0,86
CAC 50%	700	9,21	0,91

Fuente: propia.

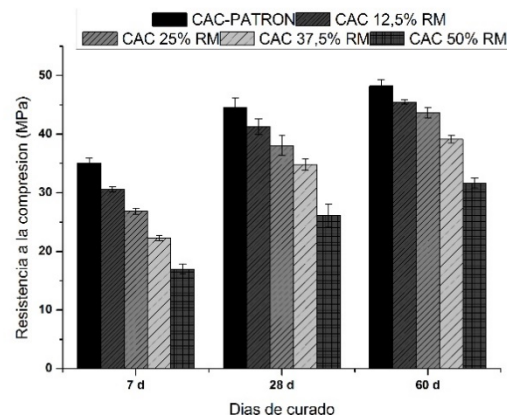


Figura 5. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de CAC con RM.

Fuente: propia.

3.3.1. Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas se muestran en la Fig. 5. La incorporación del 12,5% a 50% en volumen del RM en las mezclas de CAC generó una pérdida del 12,7% a 51,5% a los 7 días de curado, la cual se hace mayor a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Pero esta diferencia disminuye a los 28 días ubicándose la pérdida de resistencia en 7,39% a 41% en comparación con el CAC Patrón (sin presencia de RM). Esto es debido probablemente a la lenta reactividad que presenta el RM, ya que a los 60 días de curado, la discrepancia del CAC Patrón y los CAC con RM es menor encontrándose entre 5,6% a 34,2% para el menor y mayor porcentaje de sustitución respectivamente.

Se puede observar que la ganancia de resistencia desde los 7 días de curado a 60 días de curado es mayor para las mezclas de CAC con RM, en comparación con la mezcla Patrón, corroborando que sí hay una reactividad puzolánica la cual genera una mayor ganancia de resistencia a edades prolongadas de curado [32].

3.3.2. análisis del diseño de experimentos

El análisis de resultados empleando la metodología de superficie de respuesta en un diseño de mezclas de CACs con dos componentes (OPC y RM), para determinar el modelo de predicción de la resistencia a la compresión MPa (Y) a 28 días de curado. Se escogió esta propiedad como variable de respuesta debido a que es el parámetro más importante en el diseño de concreto.

Para modelar el efecto OPC y RM en las mezclas, se propuso un modelo cuadrático que satisficiera los supuestos de error del modelo (normalidad, homogeneidad e independencia) a niveles de significancia mayores de 0,10 (p-valor). Utilizando el método de mínimos cuadrados, la Ecuación 5, muestra las estimaciones de los coeficientes de regresión que fueron significativos en el modelo propuesto.

$$Y = 43,49X_1 - 8,34X_2 + 36,98X_1X_2 + \varepsilon \quad (5)$$

Tabla 7.
Análisis de varianza de la resistencia a la compresión (MPa).

Fuente	g.l	SC	MC .	F	P-VALOR
Regresión	2	180,98	90,49	53,59	0,000
Lineal	1	173,80	49,75	29,49	0,003
OPC*RM	1	7,18	7,18	4,25	0,094
Error residual	5	8,44	1,68		
Falta de ajuste	2	5,78	2,89	3,26	0,177
Error puro	2	2,66	0,88		
Total	7	189,356			

g.l: grados de libertad; SC: suma de cuadrados, MC: cuadrado medio, F: estadístico de prueba

Fuente: propia-

En la Tabla 7, se presenta el análisis de varianza de la resistencia a la compresión, en la cual se obtuvo que a un nivel de significancia del 0,17 el modelo planteado es adecuado, siendo igualmente significativa la regresión que incluye el efecto lineal y la interacción a un nivel de significancia de 0,000. Con este modelo, se obtuvo un coeficiente de determinación de 95,54% (R^2), siendo esta una buena medida de la variación del ajuste de los datos al modelo planteado para la resistencia a la compresión (Y) asociado con las componentes OPC y RM.

El modelo es utilizado para realizar la optimización de la resistencia a la compresión por medio de la función de predictibilidad. Para tal fin, se establecieron las siguientes condiciones: valor mínimo 28 MPa, valor objetivo: 38 MPa.

En las Fig. 6, a,b,c,d y e se muestran las diferentes predicciones de la resistencia a la compresión, para distintos valores de OPC y RM. En el cual es posible predecir los siguientes resultados:

- La Fig. 6a, con una predictibilidad de 100%, el tratamiento patrón o testigo con OPC de 100% se predice una resistencia de 43.49 MPa.
- La Fig. 6b, c, con una predictibilidad del 100%, y porcentajes de OPC entre 83,5% y 87,5%, por tanto con RM entre 12,5% y 16,5%, se pueden obtener resistencias mayores de 40 MPa.
- La Fig. 6d, muestra que en porcentajes por debajo del 76,6% de OPC la máxima predictibilidad disminuye, al igual que la resistencia a la compresión, situándose en del 37,99 MPa.
- La Fig. 6e, con un 25% de RM en la mezcla de CAC se obtiene una resistencia de 37,47 MPa y una predictibilidad aceptable (94,7%).

3.3.2. Densidad, absorción y porosidad

La durabilidad de un concreto está relacionada con el movimiento del agua a través de este. La absorción de agua es un criterio para encontrar una medida de la resistencia del concreto en ambientes agresivos [38]. Los resultados de la absorción se muestran en la Tabla 7. En esta se observa que a mayor volumen de RM en la mezcla, el porcentaje de absorción de agua aumentaba a los 28 días de curado. Respecto a la densidad aparente, a mayor porcentaje de RM la densidad fue menor, esto se puede atribuir a que el RM presentaba una menor densidad en comparación con la del OPC. Por otra mano, el aumento del volumen de poros debido al mayor contenido de RM, puede ser debido al efecto dilución, debido a que se presenta una reducción en el contenido de cemento, generando un aumento de la relación a/c [39].

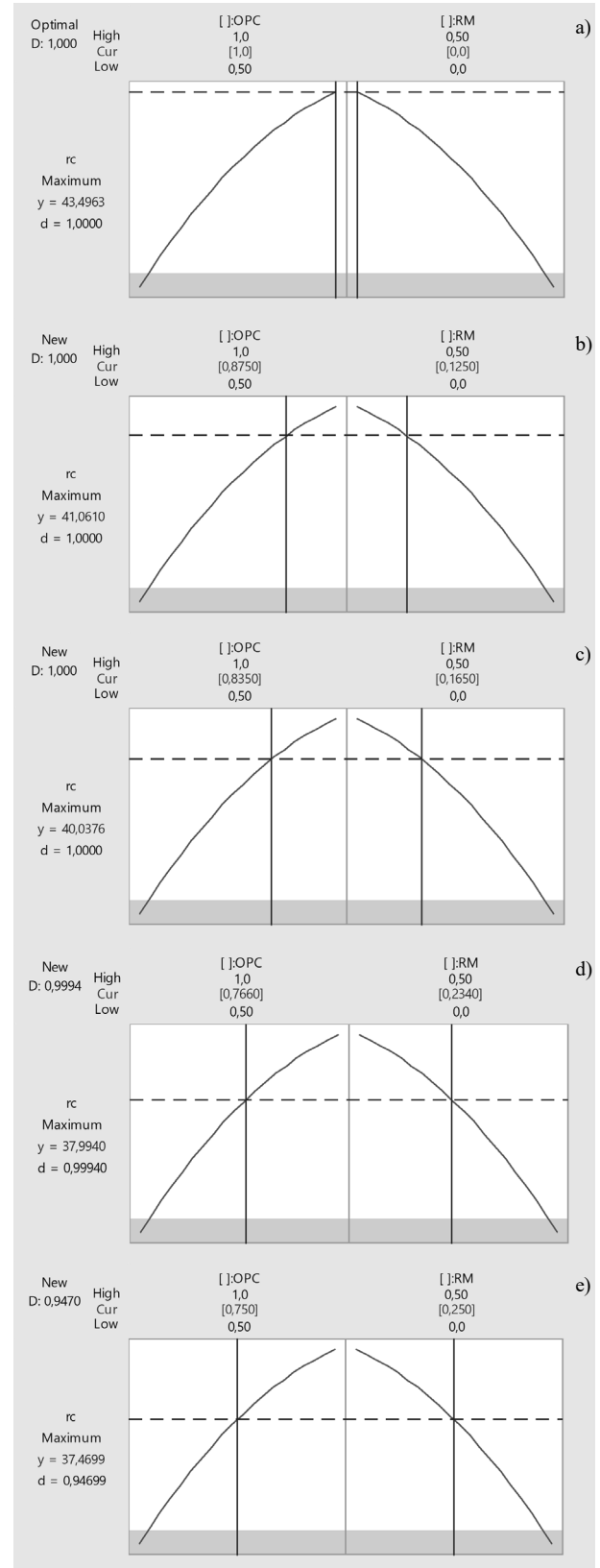


Figura 6. Grafica de optimización de la resistencia a la compresión de mezclas de CAC con RM.

Fuente: propia.

Tabla 7.
Absorción, densidad y volumen de poros de los CACs.

Mezcla	% de absorción	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen de poros
CAC Patrón	5,40	2.587	12,47
CAC 12,5%	5,65	2.562	12,84
CAC 25%	5,78	2.556	13,03
CAC 37,5%	5,97	2.534	13,12
CAC 50%	7,33	2.486	15,70

Fuente: propia.

4. Conclusiones

El presente estudio se centró en la caracterización del residuo de mampostería como material cementicio suplementario para la elaboración de concretos autocompactantes. A continuación se presentan las principales conclusiones:

El residuo de mampostería que contiene mortero de cemento Portland y ladrillo de arcilla cocido proveniente de residuos de demolición presenta actividad puzolánica ya que cumple con el índice de actividad de resistencia especificado por la ASTM C618 y descrito en la ASTM C311, además el ensayo de Frattini demostró que el RM presentaba fijación del calcio ubicándolo por debajo de la curva de saturación a los 28 días.

El uso del residuo de mampostería, en diferentes proporciones de reemplazo, en las mezclas de CAC no presenta un gran efecto en el flujo de asentamiento debido a que la mayor disminución de flujo es de aproximadamente de un 5%.

La reducción de la resistencia a la compresión de los CAC a los 7 días de curado es notable debido a la incorporación del RM, la cual se hace más relevante a grandes porcentajes de reemplazo (50% de RM). Contrario a lo que sucede a mayores edades de curado (60 días), donde la diferencia de la resistencia a la compresión del CAC Patrón es mínima comparada con las mezclas CAC 12,5% y CAC 25%, esto debido a la velocidad de reacción de la puzolana a edades mayores.

A partir del diseño de mezclas utilizado, es posible predecir los valores óptimos de OPC y RM a los 28 días de curado, que maximizan la resistencia a la compresión. Se obtuvo un modelo cuadrático con un ajuste de 95,54 (R²), que permitió establecer que se puede emplear en porcentajes menores al 25% de RM para obtener un CAC con una resistencia a la compresión superior a 37 MPa.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a: El proyecto FP44842-399- 2015: "Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo" financiado por COLCIENCIAS- "El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas y al Departamento Administrativo de Ciencia y

Tecnología (Colciencias) por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación. Igualmente, al proyecto Aerogeles de nanosilice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles apoyado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, Convocatoria Interna 3- 2016.

Referencias

- [1] Caporale, A., Parisi, F., Asprone, D., Luciano R. and Prota A., Comparative micromechanical assessment of adobe and clay brick masonry assemblages based on experimental data sets. *Composite Structures*, 120, pp. 208-220, 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.046
- [2] Nguyen T-D. and Meftan, F., Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. *Fire Safety Journal*, 66, pp. 35-45, 2014. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.017
- [3] Singh, S.B. and Munjal, P., Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 9, pp.10-16, 2017. DOI: 10.1016/j.job.2016.11.006
- [4] Luciano, R. and Sacco, E., Homogenization technique and damage model for old masonry material. *International Journal of Solids and Structures*, 34(24), pp. 3191-3208, 1997. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00167-9
- [5] Zhang, L., Production of bricks from waste materials – A review. *Construction and Building Materials*, 47, pp. 643-655, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043
- [6] Farag, L.M., Awad, H.M. and Ahmed C.R.A., Assessing the suitability of selected waste as additives to clay bodies in brick manufacture. *ZI Int.* [online]. 64(12), pp. 24-33, 2011. [date of reference may 18th of 2018] Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Reda_Gado/publication/263587765_Assessing_the_suitability_of_selected_wastes_as_additives_to_clay_bodies_in_brick_manufacture/links/0deec53c1078590a900000000/Assessing-the-suitability-of-selected-wastes-as-additives-to-clay-bodies-in-brick-manufacture.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Reda_Gado/publication/263587765_Assessing_the_suitability_of_selected_wastes_as_additives_to_clay_bodies_in_brick_manufacture/links/0deec53c1078590a90000000/Assessing-the-suitability-of-selected-wastes-as-additives-to-clay-bodies-in-brick-manufacture.pdf)
- [7] Andrade, I., Production of residues in ceramics industry – Central Region 2003 (in portuguese), Central Region, Portugal: CCDRC, [online]. 2004. [Consulted: 10/18th de mayo de 2018] https://run.unl.pt/bitstream/10362/13509/1/RI17%20%20Matias%20et%20al_Manuscript_Lime%20mortars%20ceramic%20waste_type%20and%20mech_CBM14.pdf
- [8] Li, H., Dong, L., Jiang, Z., Yang, X. and Yang, Z., Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. *Journal of Cleaner Production*, 133, pp. 1017-1026, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.149
- [9] Villoria, S.P., Porras-Amores, C. and del Rio-Merino, M., New quantification proposal for construction waste generation in new residential constructions. *Journal of Cleaner Production*, 102, pp. 58-65, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.029
- [10] Song, Q., Li, J. and Zeng, X., Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production*, 104, pp. 199-210, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.027
- [11] Reig, L., Tashima, M.M., Borrachero, M.V. and Monzo, J. and Cheeseman, C.R., Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, pp. 98-106, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031
- [12] Cortes, H. and Silva M., Infografía: ¿de dónde vienen y a dónde van a parar los escombros de Cali?. *ElPais.com.co.* [online]. [date of reference may 18th of 2018]. Available at: <http://www.elpais.com.co/elpais/graficos/infografia-ruta-escombros-cali>
- [13] Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S.L. and Segadaes A.M., Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 62, pp. 82-89, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019
- [14] El-Didamony, H., El-Rahman, E.A. and Osman, R.M., Fire resistance of fired clay bricks-fly ash composite cement pastes. *Ceramics International*, 38(1), pp. 201-209, 2012. DOI:

- 10.1016/j.ceramint.2011.06.050
- [15] Kumar, S.K., Gopal K.M. and Sreenivasulu, G., Experimental investigation on the properties of concrete replacing cement with metakaolin, fly-ash & brick powder. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, [online]. 5(8), pp. 333-341, 2016. [date of reference may 18th of 2018]. Available at: http://www.ijarse.com/images/fullpdf/1470905945_1117ijarse.pdf
- [16] Tironiv A., Trezzav M.A., Scianv A.N. and Irassar E.F., Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 319-327, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002
- [17] Barger, G.S., Hansen, E.R., Wood, M.R., Nearly, T., Beech, D.J. and Jaquier, D., Production and use of calcined natural puzzolans in concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 23(2), pp. 73-80, 2001. DOI: 10.1520/CCA10478J
- [18] Navrátilová E. and Rovnaníková P., Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, pp. 530-539, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062
- [19] Ge, Z., Wang, Y., Wu, X. and Guan, Y., Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*, 98, pp. 128-136, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100
- [20] Cachim, P., Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1292-1297, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023
- [21] Poon, C.S. and Chan, D., Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, 20(8), pp. 578-585, 2006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045
- [22] Liu, Q., Tong, T., Liu, S., Yang, D. and Yu, Q., Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 754-763, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.066
- [23] Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, A-E. and Hassan, H.H., Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*, 53, pp. 151-168, 2014. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003
- [24] Izquierdo, S.R., Diaz, J.E., Mejia, R., Torres, J., Blended cement containing fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): hydration and paste microstructure. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(2), pp. 141-154, 2013. DOI: 10.4067/S0718-50732013000200003
- [25] ASTM 331/C311M. Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete, West Conshohocken PA, 2014., 2017.
- [26] ASTM C618-17. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken PA, 2017.
- [27] Ashteyata, A.M., Haddadb, R.H. and Obaidat, Y.T., Case study on production of self compacting concrete using white cement by pass dust. *Case Studies in Construction Materials* xxx, pp. 1-11, 2018. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00190
- [28] EFNARC. Specifications and guidelines for self-compacting concrete english ed., European Federation for Spec Constr Chem and Concr Syst. [date of reference May 19th of 2018]. Available at: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>
- [29] EPG (2005). European Project Group (BIBM; CEMBUREAU; EFCA; EFNARC). [online]. 2002. [date of reference May 19th of 2018]. Available at: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- [30] ASTM C39/C39M. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken PA, 2014.
- [31] ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. West Conshohocken PA, 2013.
- [32] Silva, Y.F., Lange, D.A. and Delvasto, S., Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 196, pp. 277-283, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.132
- [33] Donatello, S., Tyrer, F-P. and Cheeseman, C.R., Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cement & Concrete Composites*, 32 (1), pp. 54-61, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.002
- [34] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Velásquez, S. and Bonilla, M., Determination of pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue: thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes. *Cement and Concrete. Research*, 33, pp. 1085-1091, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00014-0
- [35] Tashima, M.M., Soriano, L., Payá, J., Monzó, J. and Borrachero, M.V., Assessment of pozzolanic/hydraulic reactivity of vitreous calcium aluminosilicate (VCAS). *Materials and Design*, 96, pp. 424-430, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.036
- [36] Sua-iam, G., Sokrai, P. and Makul, N., Novel ternary blends of Type I Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 125, pp. 1028-1034, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.002
- [37] Gettu, R. and Agulló, L., Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte II). *Cemento y Hormigón*. [online]. 862, pp. 32-55, 2004b. [Date of reference May 19th of 2018]. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1176502>
- [38] Singh, G. and Siddique, R., Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 128, pp. 88-95, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.074.
- [39] Elgalhud, A.A., Dhir, R.K. and Ghataora, G., Limestone addition effects on concrete porosity. *Cement and Concrete Composites*, 72, pp. 222-234, 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.006

Y.F. Silva, completó su pregrado en Ing. de los Materiales en el 2011 en la Universidad del Valle, Cali, Colombia, es MSc. en Ingeniería -Énfasis en Ingeniería de los Materiales en la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Actualmente es estudiante de Doctorado en Ingeniería con énfasis en materiales de la Universidad del Valle e investigador en el Grupo Materiales Compuestos (GMC). Su investigación se centra en la valorización de residuo de mampostería en concretos autocompactantes y su desempeño frente a diferentes ambientes (sulfatos, cloruros y carbonatación).
ORCID: 0000-0003-3888-457X.

M. Gordillo, es Estadística de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, con MSc. en Ingeniería de Sistemas y Dra. en Ingeniería con énfasis en Materiales de la Universidad del Valle, Colombia en 2012. Cuenta con experiencia profesional como consultora e investigadora y docente en el campo de la estadística aplicada a la ingeniería de materiales, mecánica, específicamente en la modelación de diseños de experimentos como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en investigaciones. Actualmente es docente de la Universidad Autónoma de Occidente como profesora asociado 6AII, en la Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Matemáticas.
ORCID: 0000-0003-1602-5547.

S. Delvasto, es Ing. Químico de la Universidad del Valle; Cali, Colombia, es MSc. de la University of Illinois at Chicago, USA y Dr. en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Su labor se centra en la caracterización de materiales de matriz cementicia, materiales no convencionales, propiedades, aplicaciones y procesos de producción de materiales inorgánicos, cerámicos y compuestos. Actualmente es profesor titular de la Universidad del Valle en la Escuela de Ingeniería de los Materiales.
ORCID: 0000-0001-9443-8238.

Effect of masonry residue on the hydration of Portland cement paste

Yimmy Fernando Silva, Silvia Raquel Izquierdo & Silvio Delvasto

Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co, silvia.izquierdo@correounivalle.edu.co, Silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

Received: January 16th, 2019. Received in revised form: March 1st, 2019. Accepted: May 15th, 2019.

Abstract

This paper presents the results of an experimental study about the effect of the incorporation of masonry residue (RM) from construction and demolition wastes (RCD) on the hydration of cementitious pastes. Kinetics of the exothermic reactions during early stage of hydration was monitored by calorimetry and the presence of hydration products was determined by scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetry analysis (DTG), X-ray diffractometry (XRD) and Fourier-transform infrared (FTIR). The results indicate that the presence of RM in the pastes does to decrease the heat of hydration in the first 48 hours. On the other hand, the SEM, DTG, XRD and FTIR techniques indicate that the main hydration products in the pastes added with RM are calcium silicate hydrates (C-S-H), calcium aluminate hydrates (CAH) and calcium aluminum silicate hydrates (CASH).

Keywords: construction and demolition waste; masonry residue; supplementary cementitious materials; Portland cement pastes; hydration heat; early-stage of hydration.

Efecto del residuo de mampostería en la hidratación de pastas de cemento Portland

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental sobre el efecto de la incorporación del residuo de mampostería (RM) proveniente de residuos de construcción y demolición (RCD) en la hidratación de pastas de cemento. La cinética y las reacciones exotérmicas durante edades tempranas de hidratación fueron monitoreadas mediante calorimetría, y la presencia de productos de hidratación fue determinada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (DTG), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los resultados muestran que la presencia de RM en las pastas hace decrecer el calor de hidratación en las primeras 48 horas. Por otra parte, las técnicas de SEM, DTG, XRD y FTIR indican que los principales productos de hidratación en las pastas adicionadas con RM son silicato de calcio hidratado (C-S-H), aluminato cálcico hidratado (CAH) y silico aluminato cálcico hidratado (CASH).

Palabras clave: residuos de construcción y demolición; residuo de mampostería; material cementicio suplementario; pastas de cemento Portland; calor de hidratación; hidratación en edades tempranas.

1. Introducción

La industria de la construcción es uno de los sectores que consume más recursos naturales, además de generar una gran cantidad de residuos producidos durante la construcción de diferentes obras y demolición de edificios o casas cuando estos llegan al final de su vida útil o por motivos de

remodelación [1,2]. Los residuos de demolición y construcción (RCD) son considerados los más voluminosos y pesados en la Unión Europea representando aproximadamente el 25-30% de todos los residuos generados [2], y en Estados Unidos se estima que constituyen del 10% al 30% [3]. Estos volúmenes son tan altos que se consideran inaceptables desde el punto de vista ambiental, social y

How to cite: Silva, Y.F., Izquierdo, S.R. and Delvasto, S. Effect of masonry residue on the hydration of Portland cement paste. DYNA, 86(209), pp. 367-377, April - June, 2019.

económico, además que tienden al alza debido al rápido crecimiento de la población y la rápida industrialización.

El reciclaje y reutilización de los RCD se ha convertido en un tema de interés mundial en las últimas décadas gracias a una mayor concientización, generando aplicaciones alternativas a estos residuos como se ha demostrado por numerosos estudios empleándolos como agregado reciclado en concretos o incorporándolo en bases y sub-bases para la construcción de carreteras [4-10].

La mayor parte de los residuos de construcción y demolición están compuestos por concreto y cerámica [11,12], donde gran parte son unidades de mampostería de arcilla cocida (ladrillos) y mortero de cemento Portland como ligante (la mayoría en construcciones residenciales). Además, a nivel mundial, la producción anual de ladrillo se encuentra sobre los 1931 millones de unidades y se espera que esta cantidad continúe aumentando [13], generalmente entre el 3% y 7% de la producción total es defectuosa y parte de los desechos generados se depositan en vertederos (Fig. 1a). Además de esta considerable cantidad de residuos de ladrillo, hay otra fuente como son los generados en la demolición de estructura de mampostería (ladrillo y mortero) (Fig. 1b), que son cada vez más comunes debido a que muchas estructuras han alcanzado el tiempo de su vida útil o en la minoría de los casos por remodelaciones en las viviendas, haciendo más frecuente el depósito de estos materiales en vertederos especialmente en las grandes ciudades, lo que intensifica los problemas debido a la saturación de estos y obliga a la ocupación de más espacios para la disposición de estos residuos, volviéndolos focos de contaminación.

El uso del residuo de mampostería como material cementicio suplementario (MCS) y como agregado para la fabricación de concreto [14-16] es una alternativa viable. Especialmente, cuando el RM contiene residuos de ladrillos de arcilla cocidos que actúan como puzolana ya que algunos minerales que presentan estos materiales al someterse a temperaturas entre 600 y 900 °C y molerse finamente presentan actividad puzolánica [17]. La reactividad que puede alcanzar este residuo arcilloso en este rango de cocción es debido a la pérdida de agua generada por el tratamiento térmico que causa la pérdida de agua combinada y la destrucción de la red cristalina de los constituyentes de la arcilla, mientras la sílice y alúmina permanecen en desorden, en todos los casos en un estado amorfo inestable [18]. La sílice (SiO_2) y Alúmina (Al_2O_3) que se encuentran en los materiales puzolánicos cuando se combinan con la portlandita (CH) producida por la hidratación del cemento y agua, pueden formar silicatos de calcio y aluminatos [19].

En el caso específico del residuo de mampostería, el grado de actividad puzolánica depende de diversos factores como son: el tipo de arcilla, la cantidad de sílice y alúmina disponible para reaccionar con el CH, el grado de cristalinidad debido a las condiciones de cocción (periodo de calentamiento, temperatura y tipo de ciclo), el área superficial de las partículas y la relación entre el material arcilloso cocido y el mortero presente en el residuo de mampostería [19,20]. El uso del residuo de mampostería como MCS ha sido poco investigado.

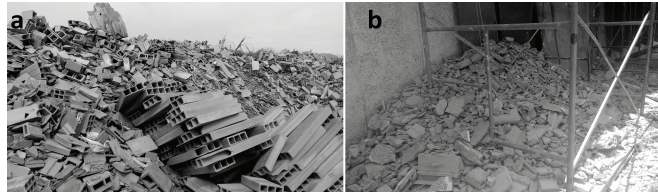


Figura 1. a) elementos no conformes de la industria ladrillera y b) residuo de mampostería.

Fuente: Los Autores.

En la literatura hay pocos estudios entre los que se destacan los realizados por Liu et al. [20] quienes emplearon polvo híbrido reciclado (sólidos de concreto y ladrillo de arcilla) como material cementante suplementario enfocándose en la influencia de las diferentes relaciones ladrillo de arcilla-mortero. Silva et al. [21] empleó residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante (CAC) obteniendo resultados satisfactorios en las propiedades en estado fresco en todos los porcentajes de reemplazo de cemento que se encontraba en un rango de 0 a 50%, además de obtener resistencia a la compresión similares con reemplazo de 10% y 20% de RM al CAC de referencia.

La presente investigación tiene como objetivo analizar el desarrollo microestructural y el proceso de hidratación de pastas con 0%, 20% y 50% de RM como reemplazo parcial del cemento Portland. Las propiedades físico-químicas de la pasta de cemento se determinaron a diferentes edades hasta 360 días. Técnicas como XRD, FTIR, DTG y SEM fueron empleadas para la identificación de los productos de hidratación.

2. Materiales y método experimental

2.1. Materiales

En este estudio el material cementicio empleado fue cemento Portland (OPC) tipo I conforme a la ASTM C150 con una adición mineral entre 6-10% de filler calcáreo. Este cemento está disponible en Colombia y se emplea comúnmente en la industria de la construcción. El residuo de mampostería (RM) fue usado como material MSC, y se muestra en la Fig. 2, el cual fue obtenido del muestreo de varias remodelaciones de casas. El RM fue triturado y pulverizó en un molino de bolas. La composición química del OPC y RM fueron determinadas mediante FRX y los resultados se dan en la Tabla 1.



Figura 2. Residuo de mampostería obtenido de RCD de casas remodeladas. Fuente: Los Autores.

Tabla 1.

Composición química (%wt) del cemento Portland ordinario (OPC) y residuo de mampostería (RM).

Composición Química	OPC	RM
SiO ₂	17,99	56,86
Al ₂ O ₃	3,88	15,53
Fe ₂ O ₃	4,76	7,63
CaO	62,28	7,88
MgO	1,71	2,95
K ₂ O	0,32	1,36
SO ₃	4,03	0,55
Na ₂ O	0,23	2,49
PI	4,14	3,39

*PI: Perdida por ignición.

Fuente: Los Autores.

La Tabla 1 muestra que aproximadamente el 80% en peso del RM está compuesto de SiO₂, Al₂O₃, y Fe₂O₃. La distribución del tamaño de partícula y la morfología del RM y el OPC anhidro se muestra en la Fig. 3 y Fig. 4 respectivamente. Como se puede observar en la Fig. 3, el RM presenta un rango más amplio de tamaño de partícula en comparación con el OPC. Los tamaños de partícula promedio del RM y OPC fueron de $24,09 \pm 0,02 \mu\text{m}$ y $21,65 \pm 0,02 \mu\text{m}$, respectivamente. En la Fig. 4, se puede observar que RM y el OPC presentan partículas de formas angulares e irregulares.

Las pastas fueron elaboradas con una relación agua/cementante (a/c) en peso de 0,28 e inmediatamente después de la mezcla, la pasta en estado fresco se vertió en moldes. Las pastas de cemento con y sin RM endurecidas se retiraron después de 24 horas, y se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 3, 28, 180 y 360 días de curado. Estas pastas fueron nombradas como PATRON, 20% RM y 50% RM, en donde el numero representa el porcentaje en masa de residuo de mampostería que reemplazo el OPC.

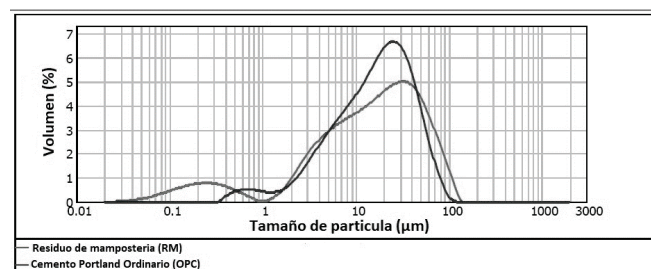


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula del residuo de mampostería y cemento Portland ordinario.

Fuente: Los Autores.

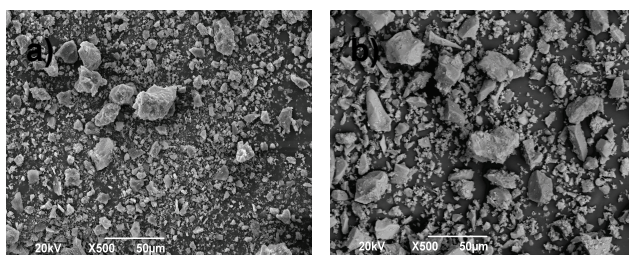


Figura 4. Morfología de RM (a) y OPC anhidro (b).

Fuente: Los Autores.

2.2. Métodos analíticos

El objetivo de este programa experimental fue analizar el efecto del residuo de mampostería sobre los productos de hidratación cuando se emplea como adición en pastas de cemento Portland. Diferentes métodos de prueba fueron empleados. Un calorímetro isotérmico (I-Cal 8000) se utilizó para estudiar las reacciones producidas mediante la velocidad de calor producido (potencia térmica) por la hidratación. Este ensayo se llevó a cabo en muestras de 30 gramos de pasta, a una temperatura de 25 °C por un periodo de 48 horas.

Para el análisis de los productos de hidratación formados, se realizaron varias muestras de pastas y se curaron bajo agua por un periodo de 3, 28, 180 o 360 días (sin RM y con RM). Luego las muestras endurecidas se molieron y se detuvo el proceso de hidratación “congelación” con acetona y etanol. Varias técnicas se emplearon, como termogravimetría diferencial (DTG) para analizar el contenido de la Portlandita (CH) en las pastas endurecidas. Las mediciones de DTG (SDT-Q600) se realizaron calentando las muestras desde 25 °C a 1000 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min bajo atmósfera de nitrógeno. La difracción de rayos X (XRD) se realizó en un difractómetro PANalytical X'Pert PRO, y la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se realizó en un espectrómetro IR-100 de Perkin Elmer en modo de transmitancia con un rango de frecuencia entre 4000 y 450 cm⁻¹ (las muestras fueron evaluadas utilizando la metodología de pellets comprimidos de KBr: 200 mg de KBr y 3,5 mg de pasta). Además de estas técnicas empleadas para la caracterización mineralógica y microestructural, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) (JSM 6490LV JOEL) para observar los productos formados durante la hidratación.

La resistencia a la compresión de las diferentes pastas se evaluó a 28, 180 y 360 días acorde con la ASTM C109. Las pruebas fueron realizadas en probetas cúbicas (20 mm x 20 mm x 20 mm). Se ensayaron tres muestras para cada tipo de mezcla para obtener el valor promedio de resistencia a la compresión. La prueba se realizó hasta la ruptura en una prensa universal (Instron 3369) a una velocidad de 1 mm/min.

3. Resultados y discusiones

3.1. Estudio calorimétrico por calorimetría isotérmica

La técnica Calorimetría de conducción isotérmica muestra el calor generado en la reacción de hidratación de las mezclas de las pastas a través del tiempo. La Fig. 5 presentan las curvas correspondientes a la evolución de la liberación de calor y el calor de hidratación acumulado en las pastas elaboradas con 100% OPC y adicionadas con 10%, 20%, 30% y 50% de RM. Las curvas de hidratación fueron obtenidas a partir de la integración de las curvas de evolución de liberación de calor.

En las curvas de evolución de liberación de calor presentadas en la Fig. 5, se aprecia en los primeros minutos la aparición de un pico de gran liberación de calor el cual es atribuido a la hidroxilación de los granos de cemento, la disolución superficial y la hidrólisis de las fases del Clinker

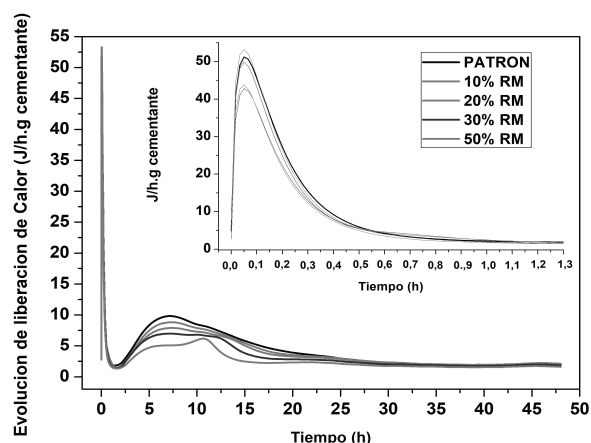


Figura 5. Curvas calorimétricas de pastas de cemento sin y con adición de RM.

Fuente: Los Autores.

que conducen a la liberación de los iones Ca^{2+} , OH^- , SiO_4^{4-} , SO_4^{2-} y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ en la solución con el incremento simultáneo del pH [22-24]. Las muestras con contenidos del 30% y 50% de RM exhibieron las menores liberaciones exotérmicas, presentando valores de 12,27 J/g y 11,95 J/g respectivamente, como se presenta en la Tabla 2. Para el caso de las pastas con porcentajes de adición del 10% y 20% de RM se aprecia que estas exhibieron calores de hidratación similares al del 100% OPC (alrededor de 14 J/g). La aparición de este pico de pre-inducción también es generada por la precipitación de los primeros productos de hidratación tales como Portlandita (CH), Etringita-Aft y Tobermorita (C-S-H). Se aprecia que la adición entre 10% y 20% de RM no afecta este comportamiento.

Posterior al periodo de pre-inducción se genera la etapa de inducción, también conocida como “periodo durmiente”. Esta se caracteriza por la disminución en el calor liberado y la disolución de los aluminatos cálcicos anhidros, junto al progreso de la nucleación de los productos de hidratación. En esta etapa se alcanzan velocidades de disolución y precipitación similares, las cuales no permiten continuar la hidratación hasta que la nucleación alcanza un tamaño y una cantidad crítica. En este punto ocurre una rápida y masiva precipitación de productos de hidratación, gobernado por un fuerte efecto exotérmico y la generación de la máxima velocidad de liberación de calor. Es de resaltar que dentro del proceso de disolución las partículas de cemento anhidro expuestas al agua reaccionan y la nucleación toma lugar en la superficie de estos granos ocasionando que la capa de productos de hidratación ubicados alrededor de las partículas obstaculice la penetración del agua [24].

Las muestras con adición de RM presentaron un incremento en el tiempo de aparición del periodo de inducción en comparación con la PATRON, sin embargo para las muestras con 10% RM y 20% RM se aprecia una reducción en esta etapa. Este comportamiento puede ser atribuido a que esta adición absorbe los iones de Ca y provee en el sistema centros de nucleación los cuales son rápidamente cubiertos por una capa de productos de hidratación y genera una reducción en el tiempo de

sobresaturación y precipitación de estos productos. Cuando se analiza el comportamiento de los diferentes porcentajes de esta adición al cemento se aprecia que las mezclas con el 10% y 20% de RM hacen que la duración de este periodo de inducción sea más corta. Este comportamiento puede ser debido a que la presencia de partículas de la adición genera en el sistema centros de nucleación que son rápidamente cubiertos con una capa de productos de hidratación, lo que genera una reducción en el tiempo de sobresaturación y precipitación de estos productos, sin embargo, este efecto no es apreciado a mayores porcentajes de reemplazo.

En la tercera etapa de aceleración observada en el gráfico de evolución de calor liberado se da inicio al proceso de cristalización de una mayor cantidad de productos de hidratación que llenan progresivamente los espacios vacíos entre las partículas de cemento, para crear puntos de contacto que generan la rigidización de la pasta. Este comportamiento marca el inicio del fraguado del material [24] y es producto de la reacción entre las capas más profundas de silicato de calcio con el agua [23]. Adicionalmente, en este segundo pico se aprecia la aparición de un hombro el cual es asociado con la reacción de hidratación de los aluminatos y la formación final de la etringita [25].

En la Fig. 5 se observa que el pico máximo de liberación de calor se ve influenciado por el incremento del porcentaje de reemplazo de cemento por RM, es así que las pastas sin adición (PATRON) y aquellas con adición del 10%, 20%, 30% y 50% de RM exhibieron tiempos de 6,17 h, 6,96 h, 7,89 h, 8,80 h y 9,80 h, respectivamente como se aprecia en la Tabla 2. Este comportamiento puede indicar que la eficiencia de la adición de RM como MCS disminuye rápidamente con su incremento en el sistema, lo que posiblemente genera un retraso en el proceso de hidratación del C3S [26]. Además, la menor evolución del calor liberado, respecto al pico de hidratación principal fue exhibida por la mezcla con adición de 50% RM, seguida de las mezclas 30% RM, 20% RM, 10% RM y finalmente por la mezcla PATRON (Fig. 5).

Adicionalmente se apreció que la adición de RM al cemento Portland influyó en la reacción de los aluminatos, como se observa en la aparición del hombro característico en el segundo pico correspondiente a la curva de evolución de calor liberado (Fig. 5). La muestra con adición del 50% RM fue quien presentó el pico más intenso incluso superior a la máxima evolución de calor liberado de la reacción de hidratación del silicato de calcio y fue fijado antes en comparación a la muestra patrón.

Tabla 2.
Resultados de la calorimetría isotérmica.

Mezcla	Calor de hidratación - Periodo de Pre-Inducción (J/g)	Calor de hidratación 48 h (J/g)	Tiempo aparición pico periodo Pre-Inducción (h)	Tiempo de aparición pico principal de hidratación (h)
PATRON	14,17	204	0,051	6,17
10% RM	14,87	192	0,049	6,96
20% RM	14,07	181	0,049	7,89
30% RM	12,27	162	0,051	8,80
50% RM	11,95	130	0,049	8,81

Fuente: Los Autores.

Este comportamiento es un indicativo de que el RM está acelerando la reacción de los aluminatos de calcio y es posiblemente resultados de los compuestos de aluminio activos que son formados durante la calcinación de la arcilla roja del ladrillo y dan origen a estos componentes puzolánicos.

Es decir que la aparición temprana de este pico intenso exotérmico correspondiente a la reacción de los aluminatos, como consecuencia de la mayor liberación de iones aluminato que ocasionan un consumo más rápido del yeso [27].

La Fig. 6 presenta el calor total liberado durante las primeras 48 horas de hidratación de las diferentes pastas de cemento adicionadas con RM en comparación a aquella sin adición (PATRON). Se aprecia que durante todo el periodo de estudio de las pastas las muestras con mayor calor de hidratación liberado son las pastas sin adición (204 J/g) seguidas por 10% RM (192 J/g), 20% RM (181 J/g), 30% RM (162 J/g) y finalmente 50% RM (130 J/g). Este comportamiento puede ser atribuido al efecto dilución ocasionado por la incorporación de una adición mineral al cemento, siendo este efecto incrementado al aumentar dichos porcentajes de reemplazo, esto se explica con base en la relación RM/cemento Portland el cual alcanza límites por encima de los cuales la reacción de la adición con la portlandita es deficiente como consecuencia del suministro insuficiente de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [28,29].

3.2. Resultados de espectroscopia FTIR

La Fig. 7 muestra los espectros de FTIR a 28 y 360 días de las diferentes mezclas (PATRON, 20% RM y 50% RM) en la región de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} . La banda ancha alrededor de 3432 cm^{-1} corresponde al agua enlazada en los productos de reacción [30]. La banda a 3643 cm^{-1} es debido a las especies (OH) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [31]. La banda ubicada en longitudes entre 1640 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} , corresponden a las vibraciones de valencia de grupos O-H del agua ligada a sulfatos presentes en el cementante [32] o el agua molecular absorbida. La banda de carbonatos se observa en $1420\text{--}1480\text{ cm}^{-1}$ y se presenta en las muestras hidratadas inicialmente, surgen de las reacciones del CO_2 atmosférico con el hidróxido de calcio o del carbonato presente en el cemento Portland. La banda ubicada en longitudes de onda entre 1100 cm^{-1} y 1200 cm^{-1} , corresponde a la vibración S-O asociada al SO_4 . La banda a 874 cm^{-1} y 713 cm^{-1} son atribuido a las vibraciones ν_2 y ν_4 del CO_3^{2-} respectivamente [33], la presencia del CaCO_3 se atribuye al CO_2 absorbido durante la preparación de las muestras, y a la adición calcárea presente en el OPC [34].

En general, se evidencia que la banda ubicada en longitudes de onda entre 3644 cm^{-1} y 3641 cm^{-1} correspondiente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$, es inferior para las mezclas adicionadas con 20 y 50% de RM respecto a la mezcla PATRON, esto debido a la menor disposición de la portlandita en las pastas adicionadas. A los 360 días de curado, esta banda no se observa en la pasta que contenía 50% de RM (50% RM) atribuido al desarrollo de las reacciones puzolánicas. Este comportamiento se relaciona

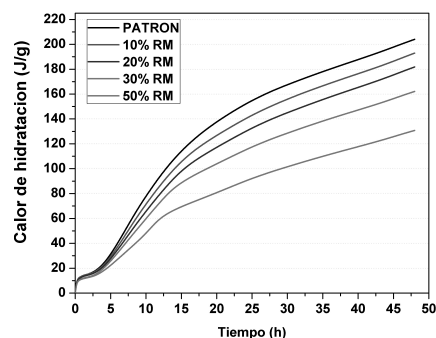


Figura 6. Curvas de evolución del calor de hidratación en las primeras 48 horas de pasta de cemento adicionadas con RM.

Fuente: Los Autores.

con el mostrado en las bandas con longitudes de onda cercanas a 991 cm^{-1} correspondiente al gel C-S-H, debido a que cuando el cemento está anhidro presenta una banda de estiramiento Si-O (ν_3) que se ubica en 925 cm^{-1} , y al reaccionar con el agua, esta banda se desplaza hacia una frecuencia más alta y aparece una banda fuerte en un rango de 991 cm^{-1} a 983 cm^{-1} debido a la formación del compuesto silicato de calcio hidratado (C-S-H) [30,35]. Esto explica la polimerización de las unidades SiO_4^{4-} presentes en C_3S y C_2S . En las dos edades evaluadas, las pastas analizadas presentan la banda a valores alrededor de 983 cm^{-1} , asociadas al principal producto de hidratación C-S-H. La vibración de estiramiento a 1117 cm^{-1} que se desplaza hacia una frecuencia más baja (1112 cm^{-1}) y se transforma en una banda más débil es atribuido al consumo de yeso y la formación de la ettringita.

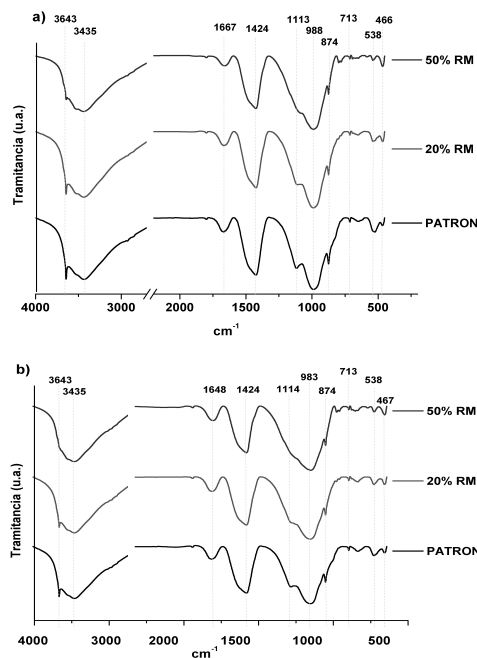


Figura 7. Espectro FTIR de pastas: a) 28 días y b) 360 días de curado.

Fuente: Los Autores.

El aumento de la intensidad de vibración alrededor de 1640 cm^{-1} y 3430 cm^{-1} indican la formación de silicato de calcio hidratado, mientras que la desaparición del pico a alrededor de 525 cm^{-1} es debido a la reacción puzolánica [30].

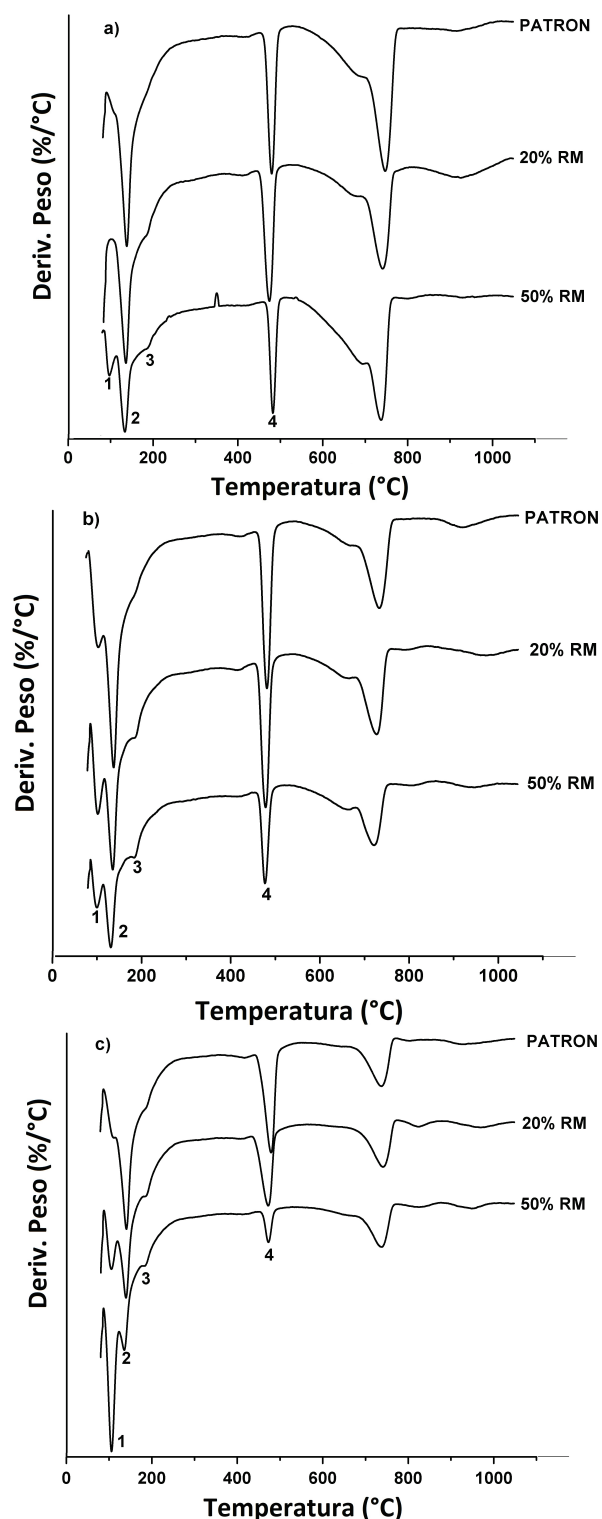


Figura 8. Curvas DTG a diferentes tiempos de hidratación de pastas: a) 3 días, b) 28 días y c) 180 días.

Fuente: Los Autores.

3.3. Análisis Termogravimétrico (DTG) consumo de la Portlandita

La evaluación del proceso de hidratación también se llevó a cabo por medio de la técnica de Análisis térmico diferencial (DTG). En la Fig. 8 se presentan los resultados obtenidos para las pastas adicionadas con 0%, 20% y 50% de RM a edades de 3, 28 y 180 días. Se puede observar en las curvas, la deshidroxilación de las principales fases hidratadas durante el proceso de hidratación del cemento y la reacción puzolánica. En general, en el intervalo de temperatura entre $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, se presenta una pérdida de agua (libre y enlazada) [36,37]. El primer pico localizado por debajo de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se debe principalmente por la evaporación del agua libre. Este fenómeno es más notorio para la pasta con 50% de RM, debido al mayor efecto dilución presentado en esta mezcla. Por otra parte, la pérdida de masa puede deberse a un secado incompleto de la muestra, pero a partir de los $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pérdida de agua corresponde a la deshidratación del C-S-H [38,39], en algunos casos, se superpone con el pico 2 correspondiente a la descomposición de la etringita (AFt), ubicada entre 100 y $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40]. El pico 3, localizado en un rango 180 - $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, se atribuye al proceso de deshidratación de los aluminatos cálcicos hidratados (HAC) e hidratos de aluminosilicatos de calcio (CASH). El pico 4 corresponde a una reacción endotérmica localizado alrededor de los $420\text{ }^{\circ}\text{C}$, el cual es característico de la deshidratación de la portlandita (CH) [39]. Un último pico, cercano a los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, es característico de la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3), que indica la posible carbonatación de alguno de los hidratos formados durante el manejo de las muestras. Se puede observar que a medida que avance el tiempo de hidratación, las curvas DTG presentaron un cambio debido a los procesos de hidratación que las pastas han presentado.

Se puede observar en la Fig. 8 que la intensidad de los picos aumenta con la edad de curado, excepto el pico 4 de las pastas con RM. Este comportamiento se puede explicar en parte por el aumento de la cantidad de los productos de hidratación formados [41]. Cabe resaltar la diferencia que existe en el pico 3 de la pasta PATRON y las pastas con RM; esto se atribuye al aporte de alúmina de este residuo y al avance de las reacciones puzolánicas. El aumento es más notorio en los primeros tres picos de las pastas con RM, atribuido a que pequeñas cantidades de RM actúan como agentes de nucleación que mejoran el proceso de hidratación [42].

El efecto puzolánico fue analizado a partir del pico 4 de los DTG, mediante la medición del consumo del hidróxido de calcio en la pasta con 20% de RM. Se observa que la mezcla 20% RM presento una menor cantidad de CH en comparación a la mezcla PATRON, este comportamiento se observó a lo largo de todas las edades, confirmando así el carácter puzolánico del RM. La fijación del % de cal se calculó siguiendo la ecuación 1 [36,39].

$$\text{Fijación de } \text{Ca}(\text{OH})_2 (\%): 100 \left(\frac{[\text{CHc} \times \text{C\%}] - \text{CHp}}{\text{CHc} \times \text{C\%}} \right) \quad (1)$$

Donde CHc es la cantidad de portlandita en la pasta de control para una edad determinada, CHp es la Cantidad de portlandita en la pasta con la puzolana a la misma edad de la

pasta de control y C es la proporción del cemento en la pasta. Los resultados obtenidos de la ecuación 1 se presentan en la Tabla 3. El aumento continuo de pérdida de peso de la pasta PATRON es atribuido a la hidratación de los silicatos de calcio anhidro, contribuyendo a una mayor producción de la portlandita, mientras que la pérdida menor de peso de la pasta 20% RM, son debida a la menor proporción de OPC y por la reacción puzolánica, donde es más notoria en el periodo más largo (180 días de curado).

3.4. Análisis de Difracción de rayos X (XRD)

Los difractogramas obtenidos de la mezcla PATRON, 20% RM y 50% RM a los 3, 28 y 360 días de curado se muestran en la Fig. 9. Se observa que todos los patrones de difracción son similares, sin embargo las intensidades son diferentes. Portlandita (CH), etringita (E) y aluminato cálcico hidratado (CAH), son los principales productos de hidratación identificados. También se identificaron otras fases como el silicato tricálcico-Alita (C3S), silicato bicálcico-Belita (C2S), cuarzo (Q), anortita (A) y calcita (C) características de las fases no hidratadas del OPC o fases correspondientes al RM.

Como se muestra en los difractogramas de las pastas y principalmente en la pasta PATRON, se observan fases remanentes del Clinker, como son el C2S y C3S, las cuales siguen existiendo a los 360 días de curado. Sin embargo se aprecia una disminución de las intensidades de estos picos con el aumento de la edad de curado como consecuencia de la hidratación de las fases del OPC. Por otra parte en la pasta PATRON, los picos de la fase portlandita (CH) aumentan con el tiempo de curado, esto es debido a la hidratación de las fases de silicato del Clinker que dan lugar a la formación del silicato cálcico hidratado (C-S-H) y la liberación de CH [42].

Para las pastas de OPC con 20% RM y 50% RM, se puede observar que la incorporación de este residuo en las primeras edades provoca un efecto dilución por lo que se observa una disminución de intensidad en los picos correspondientes a los silicatos [45]. Por otra parte, los picos correspondientes al CH disminuyen también, lo que indica el desarrollo de reacciones puzolánicas [42,46]. Este efecto se observa de manera más significativa a mayores edades, donde los picos de CH han disminuido notoriamente en comparación con la pasta PATRON.

En el caso particular del cuarzo (Q), este pico es más intenso para las pastas de OPC- RM, debido a la presencia de esta fase mineralógica en esta adición, como consecuencia de la arena presente en el mortero de pega. Se debe tener en cuenta que el silicato de calcio hidratado (C-S-H), es principalmente amorfo, por lo que la identificación mediante esta técnica tiene un valor limitado [47,48].

3.5. Resultados de resistencia a la compresión de las pastas endurecidas

Los resultados de resistencia a la compresión de las pastas endurecidas se muestran en la Fig.10. Los valores de resistencia a la compresión de las pastas aumentan continuamente hasta la edad ensayada (360 días); este comportamiento es atribuido principalmente a la formación

Tabla 3.

Porcentaje de cal fijada para la pasta 20 %RM.

	Pérdida de peso Ca(OH)_2		%Cal Fijada	
	28 días	180 días	28 días	180 días
PATRON	4,13	4,15	No Aplica	
20% RM	3,16	2,62	4,36	21,08

Fuente: Los Autores.

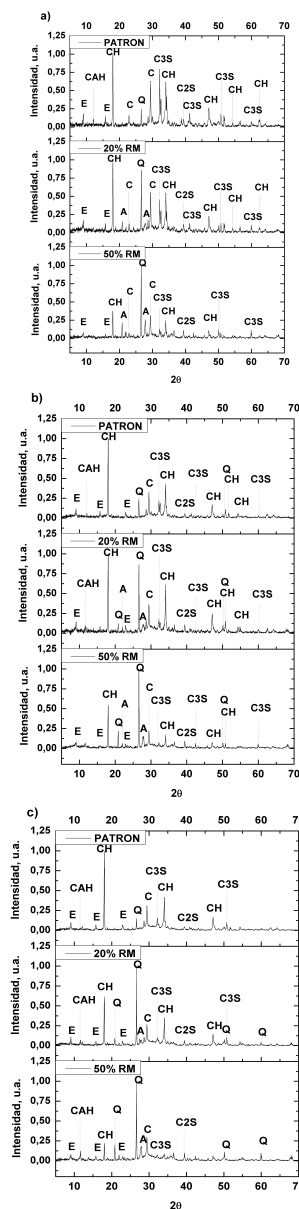


Figura 9. Difracción de rayos X de pastas de cemento endurecidas: a) 3 días, b) 28 días y c) 360 días.

Fuente: Los Autores.

de productos de hidratación del OPC con altas propiedades hidráulicas como el C-S-H, que actúan como centros de unión fuertes [46]. Esta tendencia también se observó en las pastas de OPC con RM. Las pastas preparadas con RM presentaron resistencias más bajas en comparación a la pasta

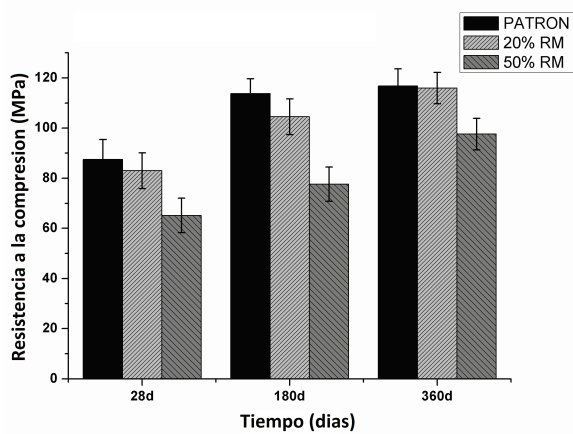


Figura 10. Resistencia a la compresión de pastas con y sin RM.
Fuente: Los Autores.

de referencia (PATRON) a los 28 días de curado debido a la dilución del contenido de cemento [49]. Esta disminución se hace más notoria cuando se emplean altas proporciones de RM, como es el caso de la mezcla 50% RM.

La diferencia de resistencia a la compresión entre la pasta PATRON y las pastas con presencia de RM fue menor o mínima a los 180 y 360 días de curado, este comportamiento es debido principalmente a la reacción puzolánica del RM con el hidróxido de calcio (CH) liberado en la hidratación del cemento Portland, formando productos adicionales como las geles de C-S-H. Estos productos de reacción puzolánica actúan como micro-rellenos que conducen a una mayor densificación (menor porosidad total) que las pastas adicionadas a edades tempranas, y por lo tanto generan un aumento en la resistencia a la compresión [29]. La diferencia en la resistencia a la compresión de la mezcla PATRON en comparación con las mezclas añadidas con RM a los 28 días

de curados fue 5,2% y 25,6% y de 0,95% y 16,9% a los 360 días de curado para las mezclas 20% RM y 50% RM respectivamente. Este notable aumento en los valores de resistencia a la compresión de la pasta adicionada puede atribuirse al hecho que cuando se adiciona agua a la mezcla OPC-RM, el hidróxido de calcio se libera debido a la hidratación inicial de la fracción de OPC, luego la sílice y alúmina del RM entra en solución y forman hidratos secundarios [46]. Sin embargo, la reducción de resistencia de la mezcla con 50% de RM puede atribuirse al número de fases residuales del RM que actúan como filler en esta pasta.

3.6. Resultados SEM

El análisis microestructural de la pasta PATRON y las adicionadas con RM se muestran en la Figs. 11, 12 y 13; donde se aprecia la densificación debido a la evolución de hidratación en cada mezcla. A los 28 días de curado se observan pequeñas agujas prismáticas, indicando la formación de etringita (E). También se observan formación del gel C-S-H, la presencia de portlandita (CH) y carbonato de calcio (C). Finalmente a los 360 días se puede observar en general una mayor formación del gel C-S-H y en el caso de las pastas adicionadas con 50% de RM, no se observa la presencia del CH, esto podría confirmar el carácter puzolánico de este residuo, sin embargo, en el XRD se detectó el CH con menos intensidad en comparación a las otras pastas. Por otra parte el RM, presenta en su composición química Al_2O_3 , además de presentar los ingredientes necesarios para la formación de etringita, como son: Ca, Al, S [50], por lo que esta fase también se percibe en las diferentes mezclas a los 3, 28 y 360 días, aunque en todas las imágenes SEM no esté presente. Las imágenes SEM tomadas a una magnificación x500 (Figs. 11, 12 y 13) muestran el proceso de hidratación en las pastas a diferentes edades de curado.

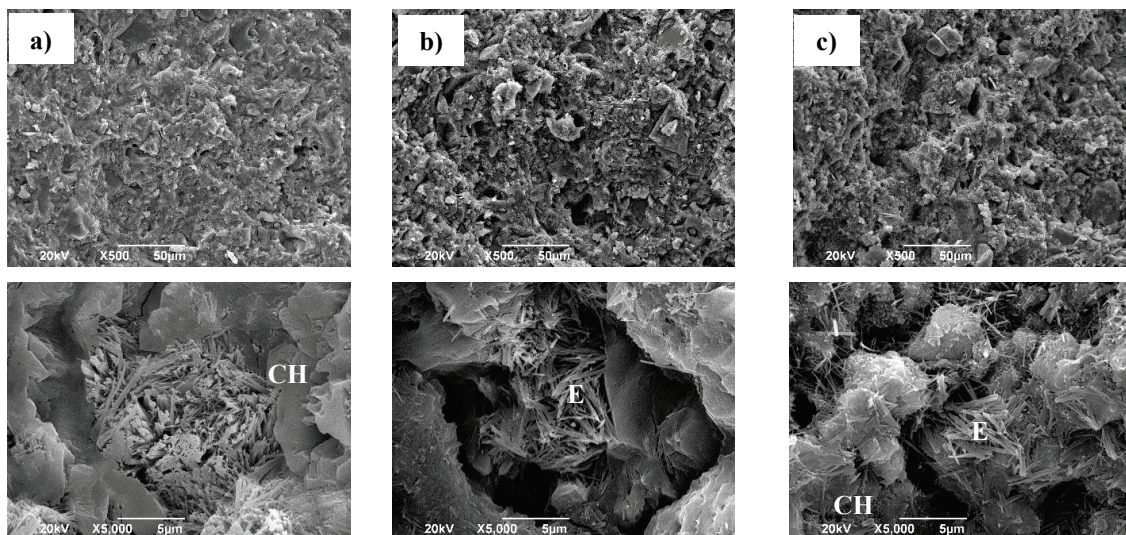


Figura 11. Imágenes SEM de: (a) PATRON, (b) 20% RM and (c) 50% RM a 3 días de curado.
Fuente: Los Autores.

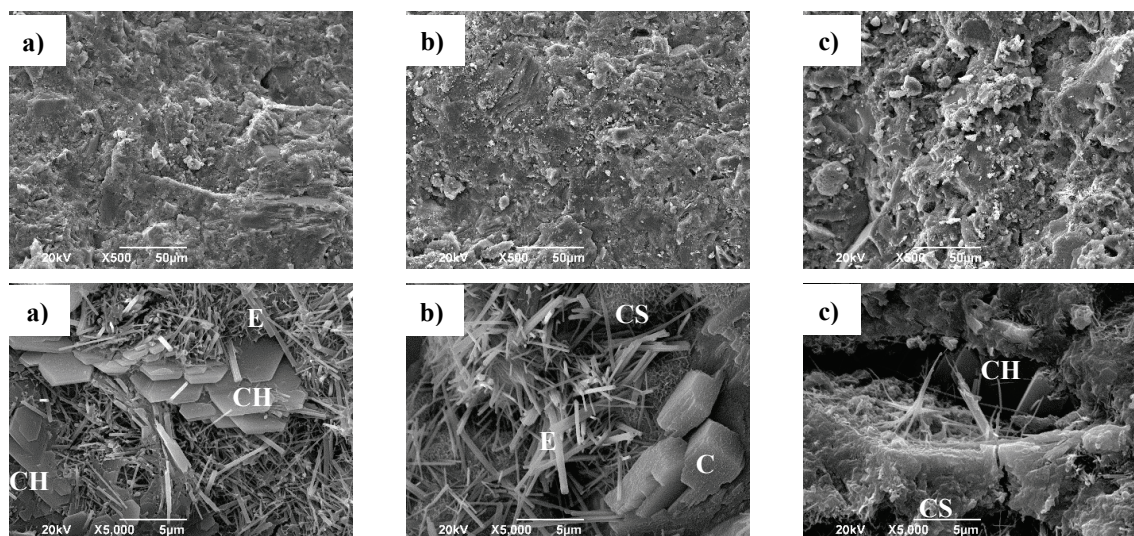


Figura 12. Imágenes SEM de: (a) PATRON, (b) 20% RM and (c) 50% RM a 28 días de curado. Fuente: Los Autores.

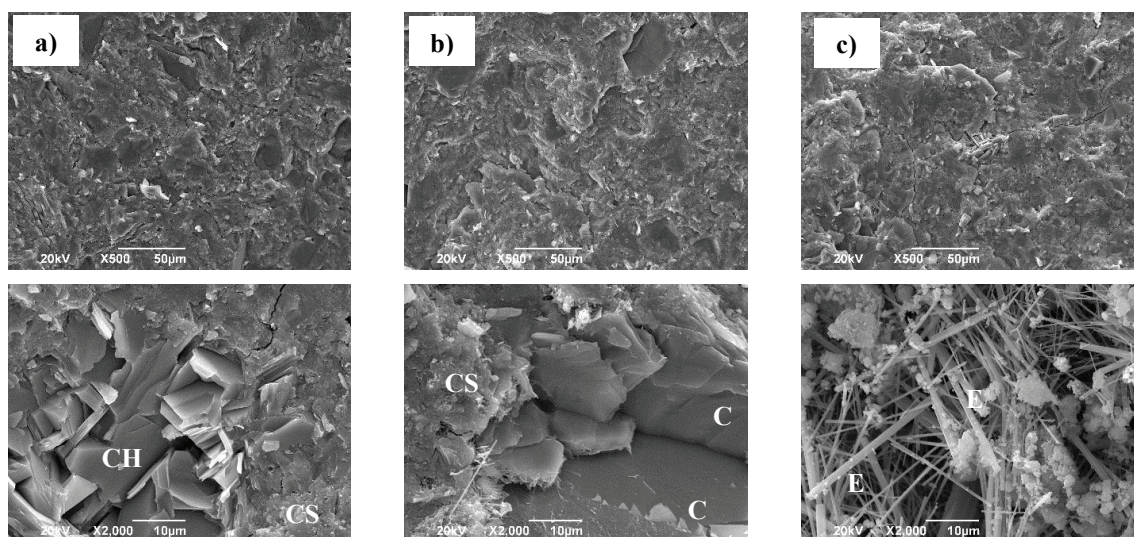


Figura 13. Imágenes SEM de: (a) PATRON, (b) 20% RM and (c) 50% RM a 360 días de curado. Fuente: Los Autores.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, las siguientes conclusiones generadas:

La incorporación de RM en las pastas de cemento Portland generan un decremento del calor de hidratación, atribuido al efecto dilución causado por la incorporación de esta adición mineral en el cemento, este efecto es mayor cuando los porcentajes de remplazo incrementan.

El RM tiene potencial como material puzolánico, demostrado por su capacidad para fijar la portlandita. En esta investigación, los porcentajes de cal fijada fueron de 4,36% y 21,08% a los 28 y 180 días de curado.

La resistencia a la compresión de las pastas con presencia de RM decrece significativamente a los 28 días de curado. Este decrecimiento en la resistencia en esta edad de curado

es debido al predominante efecto dilución, sin embargo, la reactividad puzolánica del RM genera reacciones a largas edades de curado (180 y 360 días), que permiten el desarrollo de nuevos productos de reacción, que generan mayores ganancias de resistencia en comparación a la pasta PATRON.

Se demostró que el residuo de mampostería (RM) que tiene valor como material de partida (MCS) para la incorporación en la producción de materiales a base de cemento Portland.

Agradecimientos

Los autores agradecen a: Universidad del Valle (Colombia), Grupo Materiales Compuestos (GMC), Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM, Universidad del Valle), and COLCIENCIAS. Los autores expresan

también sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, por su apoyo a través del proyecto “Aerogeles de nanosilice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles. C.I.: 910 de la Convocatoria Interna 3- 2016”.

Referencias

- [1] Duan, H., Yu, D., Zuo, J., Yang, B., Zhang, Y. and Niu, Y. Characterization of brominated flame retardants in construction and demolition waste components: HBCD and PBDEs. *Science of the Total Environment*, 572, pp. 77-85, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.165
- [2] Domínguez, A., Domínguez, M.I., Ivanova, S., Centeno, M.A. and Odriozola, J.A., Recycling of construction and demolition waste generated by building infrastructure for the production of glassy materials. *Ceramic International*, 42, pp. 15217-15223, 2016. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.06.157
- [3] Adamson, M., Razmjoo, A. and Poursaei, A., Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 426-432, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056
- [4] Silva, Y.F., Robayo, R.A., Matthey, P.E. and Delvasto, S., Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, pp. 639-644, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057
- [5] Arulrajah, A., Piratheepan, J. and Disfani, M.M., Geotechnical and Geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), pp. 1077-1088, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652
- [6] Jiménez, J.R., Ayuso, J., Galvín, A.P., López, M. and Agrela, F., Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, pp. 34-43, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042
- [7] Vieira, C.S. and Pereira, P.M., Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, pp. 192-204, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023
- [8] Etxeberria, M., Vasquez, E., Mari, A. and Barra, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 735-742, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002
- [9] Vegas, I., Ibanez, J.A., San Jose, J.T. and Urzelai, A., Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Management*, 28(3), pp. 565-574, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.01.016
- [10] Señas, L., Priano, C. and Marfil, S., Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Construction and Building Materials*, 113, pp. 498-505, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.079
- [11] Özalp, F., Yilmaz, H.D., Kara, M., Kaya, O. and Sahin, A., Effects of recycled aggregates from construction and demolition waste on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, pp. 17-23, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030
- [12] Demir, I. and Orhan, M., Reuse of waste bricks in the production line. *Building and Environment*, 38(12), pp. 1451-1455, 2003. DOI: 10.1016/S0360-1323(03)00140-9
- [13] Zhang, L., Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and Building Materials*, 47, pp. 643-655, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043
- [14] Adamson, M., Razmjoo, A. and Poursaei, A., Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 426-432, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056
- [15] Debieb, F. and Kenai, S., The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22, pp. 886-893, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- [16] Yang, Y., Du, Q. and Bao, Y., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 1935-1945, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
- [17] Zawrah, M.F., Gado, R.A., Feltin, N., Ducourtieux, S. and Devoille L., Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, pp. 237-251, 2016. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.001
- [18] Baronio, G. and Binda, L., Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and Building Materials*, 11(1), pp. 41-46, 1997. DOI: 10.1016/S0950-0618(96)00032-3
- [19] Matias, G., Faria, P. and Torres, I., Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 523-534, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108
- [20] Liu, Q., Tong, T., Liu, S., Yang, D. and Yu, Q., Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 754-763, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.066
- [21] Silva, Y., Robayo, R., Matthey, P. and Delvasto, S., Obtaining self-compacting concrete using demolition waste. *Latin American Journal of Metallurgy and Materials*, 35(1), pp. 86-94, 2014.
- [22] Oliveira, I.R. and Pandolfelli, V.C., Castable matrix, additives and their role on hydraulic binder hydration. *Ceramics International*, 35(4), pp. 1453-1460, 2009. DOI: 10.1016/j.ceramint.2008.07.024
- [23] Snelson, D.G., Wild, S. and O'Farrell, M., Heat of hydration of Portland cement metakaolin-fly ash (PC-MK-PFA) blends. *Cement and Concrete Research*, 38(6), pp. 832-840, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.01.004
- [24] ASTM C1679, Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry, 2014.
- [25] Hesse, C., Goetz-Neunhoeffer, F. and Neubauer, J., A new approach in quantitative in-situ XRD of cement pastes: Correlation of heat flow curves with early hydration reactions. *Cement and Concrete Research*, 41, pp. 123-128, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.014
- [26] Tydlitát, V., Zakoutsky, J., Olfova, P. and Cerný, R., Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics. *Thermochimica Acta*, 543, pp. 125-129, 2012. DOI: 10.1016/j.tca.2012.05.022
- [27] Kaminskis, R., Cesnauskas, V. and Kubiliute, R., Influence of different artificial additives on Portland cement hydration and hardening. *Construction and Building Materials*, 95, pp. 537-544, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.113
- [28] Bonavetti, V.L., Rahhal, V.F. and Irassar, E.F., Evolution of the hydration in cements with additions. *Construction materials*. [online]. 52, pp. 57-64, 2002. Available at: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/317/365>
- [29] Said-Mansour, M., Kadri, E.H., Kenai, S., Ghrici, M. and Bennaceur, R., Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 2275-2282, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017
- [30] Perraki, Th., Kakali, G. and Kontoleon, F., The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, pp. 205-212, 2003. DOI: 10.1016/S1387-1811(03)00369-X
- [31] Mollah, M.Y.A., Yu, W., Schennac, R. and Cocke, D.L., A fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 267-273, 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00243-4
- [32] Shen, P., Lu, L., He, Y., Wang, F. and Hu, S., Hydration of quaternary phase-gypsum system. *Construction and Building Materials*, 152, pp. 145-153, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.179
- [33] Choudhary, H.K., Anupama, A.V., Kumar, R., Panzi, M.E., Matteppanavar, S., Baburao, N.S. and Sahoo, B., Observation of phase transformations in cement during hydration. *Construction and*

- Building Materials. 101, pp. 122-129, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.027
- [34] Trezza, M.A., Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions. Materials Research. [online]. 10(4), pp. 331-334, 2007. Available at: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v10n4/a02v10n4.pdf>
- [35] Mollah, M.Y.A., Lu, F. and Cocke, D.L., An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) characterization of the speciation of arsenic (V) in Portland cement type-V. The Science of the total environment. 224, pp. 57-68, 1998. DOI: 10.1016/S0048-9697(98)00318-0
- [36] Frías, M., García, R., Vigil de la Villa, R. and Villar, E., The effect of binary pozzolan mix on the mineralogical changes in the ternary activated paper sludge-fly ash-Ca(OH)₂ system. Construction and Building Materials. 38, pp. 48-53, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.045
- [37] Frías, M., Vigil de la Villa, R., García, R., Martínez-Ramírez, S. and Fernández-Carrasco, L., New developments in low clinker cement paste mineralogy. Applied Clay Science 166, pp. 94-101, 2018. DOI: 10.1016/j.clay.2018.09.009
- [38] Gallucci, E., Zhang, X. and Scrivener, K.L., Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). Cement and Concrete Research, 53, pp. 185-195, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.06.008
- [39] Ma, B., Zhang, T., Tan, H., Liu, X., Mei, J., Qi, H., Jiang, W., Zou, F., Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of cement-fly ash paste. Construction and Building Materials 179, pp. 89-99, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.117
- [40] Izquierdo, S., Diaz, J., Mejia, R. and Torres, J., Blended cement containing fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): hydration and paste microstructure. Revista Ingeniería de Construcción. 28(2), pp. 141-154, 2013. DOI: 10.4067/S0718-50732013000200003
- [41] El-Gamal, S.M.A., El-Hosiny, F.I., Amin, M.S. and Sayed, D.G., Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes. Construction and Building Materials. 154, pp. 1062-1078, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.040
- [42] El-Diadamony, H., Amer, A.A., Sokkary, T.M. and El-Hoseny, S., Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. HBRC Journal. 14, pp. 150-158, 2018. DOI: 10.1016/j.hbrej.2015.05.005
- [43] Payá, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Velázquez, S. and Bonilla, M., Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes. Cement and Concrete Research. 33, pp. 1085-1091, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00014-0
- [44] Mohammed, S., Elhem, G. and Mekki, B., Valorization of pozzolanicity of Algerian clay: optimization of the heat treatment and mechanical characteristics of the involved cement mortars. Applied Clay Science. 132-133, pp. 711-721, 2016. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.027
- [45] Garcia-de Lomas, M., Sanchez-de Rojas, M.I. and Frias, M., Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 90(2), pp. 443-447, 2007. DOI: 10.1007/s10973-006-7921-7
- [46] El-Gamal, S.M.A., Amin, M.S. and Ramadan, M., Hydration characteristics and compressive strength of hardened cement pastes containing nano-metakaolin. HBRC Journal. 13, pp. 114-121, 2017. DOI: 10.1016/j.hbrej.2014.11.008
- [47] Richardson, I.G., The calcium silicate hydrates. Cement and Concrete Research. 38, pp. 137-158, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.11.005
- [48] Wang, S., Peng, X., Tao, Z., Tang, L., Zeng, L., Influence of drying conditions on the contact-hardening behaviours of calcium silicate hydrate powder. Construction and Building Materials. 136, pp. 465-473, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.037
- [49] Juenger, M.C.G. and Siddique, R., Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. Cement and Concrete Research 78, pp. 71-80, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.03.018
- [50] Escalante-Garcia, J.L., Martinez-Aguilar, O.A. and Gómez-Zamorano, L.Y., Calcium sulphate anhydrite based composite binders; effect of Portland cement and four pozzolans on the hydration and strength. Cement and Concrete Composite. 82, pp. 227-233, 2017. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.012

Y.F. Silva completó su pregrado en Ing. de los Materiales en el 2011 en la Universidad del Valle, Cali, Colombia, es MSc. en Ingeniería -Énfasis en Ingeniería de los Materiales en la Universidad del Valle, Cali, Colombia en el 2015. Actualmente es estudiante de Doctorado en Ingeniería con énfasis en materiales de la Universidad del Valle e investigador en el Grupo Materiales Compuestos (GMC). Su investigación se centra en la valorización de residuo de mampostería en concretos autocompactantes y su desempeño frente a diferentes ambientes (sulfatos, cloruros y carbonatación).
ORCID: 0000-0003-3888-457X

S. Izquierdo, recibió su título de pregrado en ing. De los materiales en el 2009. En el 2016, culminó su doctorado en Ingeniería- Énfasis en ingeniería de los materiales en la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Tiene experiencia profesional como investigadora y docente en el campo de los materiales, especialmente en las propiedades mecánicas y su comportamiento frente a diferentes ambientes agresivos. Actualmente se desempeña como ingeniera de desarrollo de aditivos en CEMEX, Colombia.
ORCID: 0000-0001-8203-8202

S. Delvasto, es Ing. Químico de la Universidad del Valle; Cali, Colombia, es MSc. de la University of Illinois at Chicago, USA y Dr. en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Su labor se centra en la caracterización de materiales de matriz cementicia, materiales no convencionales, propiedades, aplicaciones y procesos de producción de materiales inorgánicos, cerámicos y compuestos. Actualmente es profesor titular de la Universidad del Valle en la Escuela de Ingeniería de los Materiales.
ORCID: 0000-0001-9443-8238



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Estructuras

Maestría en Ingeniería – Geotecnia

Maestría en Ingeniería - Infraestructura y

Sistemas de Transporte

Especialización en Estructuras

Especialización en Ingeniería Geotecnia

Especialización en Vías y Transportes

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5172



silvio delvasto arjona <silvio.delvasto@correounivalle.edu.co>

Thank you for your submission to Construction & Building Materials

Construction & Building Materials <eesserver@eesmail.elsevier.com>

12 de junio de 2019, 9:33

Responder a: Construction & Building Materials <conbuildmat@elsevier.com>

Para: yimmy.silva@correounivalle.edu.co, yimmy3488@hotmail.com

Cc: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co, dlange@illinois.edu

*** Automated email sent by the system ***

Dear Mr. Silva,

Thank you for sending your manuscript THE SETTING TIME, LINEAR LENGTH CHANGE, SHRINKAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS CONTAINING RESIDUE OF MASONRY for consideration to Construction & Building Materials. Please accept this message as confirmation of your submission.

When should I expect to receive the Editor's decision?

We publicly share the average editorial times for Construction & Building Materials to give you an indication of when you can expect to receive the Editor's decision. These can be viewed here: http://journalinsights.elsevier.com/journals/0950-0618/review_speed

What happens next?

Here are the steps that you can expect as your manuscript progresses through the editorial process in the Elsevier Editorial System (EES).

1. First, your manuscript will be assigned to an Editor and you will be sent a unique reference number that you can use to track it throughout the process. During this stage, the status in EES will be "With Editor".

2. If your manuscript matches the scope and satisfies the criteria of Construction & Building Materials, the Editor will identify and contact reviewers who are acknowledged experts in the field. Since peer-review is a voluntary service, it can take some time but please be assured that the Editor will regularly remind reviewers if they do not reply in a timely manner. During this stage, the status will appear as "Under Review".

Once the Editor has received the minimum number of expert reviews, the status will change to "Required Reviews Complete".

3. It is also possible that the Editor may decide that your manuscript does not meet the journal criteria or scope and that it should not be considered further. In this case, the Editor will immediately notify you that the manuscript has been rejected and may recommend a more suitable journal.

For a more detailed description of the editorial process, please see Paper Lifecycle from Submission to Publication: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/160/p/8045/

How can I track the progress of my submission?

You can track the status of your submission at any time at <http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT>

Once there, simply:

1. Enter your username: Your username is: yimmy.silva@correounivalle.edu.co

If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT/automail_query.asp

2. Click on [Author Login]. This will take you to the Author Main Menu

3. Click on [Submissions Being Processed]

Many thanks again for your interest in Construction & Building Materials.

Kind regards,

Professor Michael C. Forde

If you require further assistance, you are welcome to contact our Researcher Support team 24/7 by live chat and email or 24/5 by phone: <http://support.elsevier.com>



silvio delvasto arjona <silvio.delvasto@correounivalle.edu.co>

A manuscript number has been assigned: CONBUILDMAT-D-19-04712

Construction & Building Materials <eesserver@eesmail.elsevier.com>

15 de junio de 2019, 9:45

Responder a: Construction & Building Materials <conbuildmat@elsevier.com>

Para: yimmy.silva@correounivalle.edu.co, yimmy3488@hotmail.com

Cc: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co, dlange@illinois.edu

*** Automated email sent by the system ***

Ms. Ref. No.: CONBUILDMAT-D-19-04712

Title: THE SETTING TIME, LINEAR LENGTH CHANGE, SHRINKAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS CONTAINING RESIDUE OF MASONRY
Construction & Building Materials

Dear Mr. silva,

Your submission, referenced above, has been assigned the manuscript number CONBUILDMAT-D-19-04712 and has been assigned to an Editor who will handle peer review.

Please note that in most cases at least two reviews may be required before a decision on a manuscript is made. You will be notified by e-mail each time a reviewer agrees to review your manuscript.

To track the progress of your manuscript, please log in to <https://ees.elsevier.com/conbuildmat/> and click on the "Submissions Being Processed" folder.

Your username is: yimmy.silva@correounivalle.edu.co

If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT/automail_query.asp

Thank you for submitting your manuscript to Construction & Building Materials.

Kind regards,

Construction & Building Materials

=====

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.



silvio delvasto arjona <silvio.delvasto@correounivalle.edu.co>

Track your recent Co-Authored submission to CONBUILDMAT

Construction & Building Materials <eesserver@eesmail.elsevier.com>

12 de junio de 2019, 9:33

Responder a: Construction & Building Materials <conbuildmat@elsevier.com>

Para: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

*** Automated email sent by the system ***

Dear Dr. Silvio Delvasto,

You have been listed as a Co-Author of the following submission:

Journal: Construction & Building Materials

Title: THE SETTING TIME, LINEAR LENGTH CHANGE, SHRINKAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS CONTAINING RESIDUE OF MASONRY

Corresponding Author: yimmy silva

Co-Authors: David A Lange, Ph.D; Silvio Delvasto, Ph.D

To be kept informed of the status of your submission, register or log in (if you already have an Elsevier profile).

Register here: <https://ees.elsevier.com/conbuildmat/default.asp?acw=&pg=preRegistration.asp&user=coauthor&fname=Silvio&lname=Delvasto&email=silvio.delvasto@correounivalle.edu.co>

Or log in: <https://ees.elsevier.com/conbuildmat/default.asp?acw=&pg=login.asp&email=silvio.delvasto@correounivalle.edu.co>

If you did not co-author this submission, please do not follow the above link but instead contact the Corresponding Author of this submission at yimmy.silva@correounivalle.edu.co; yimmy3488@hotmail.com.

Thank you,

Construction & Building Materials

El Comité de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería tiene el gusto de informarle que su trabajo titulado **"Aerogel sílicea ecosostenible a partir de la cascarilla de arroz"** fue aprobado para ser presentado en modalidad de ponencia en el X Simposio de Investigaciones 2018, Universidad del Valle, los días 2, 3 y 4 de mayo de 2018.

Para su información relacionamos el horario asignado en el que se deberá presentar su trabajo.

Fecha	Hora	Lugar
2 de mayo de 2018	3:00 pm	Auditorio Valle del Cauca (edificio 336)

Por favor tenga en cuenta las siguientes observaciones y recomendaciones:

- El tiempo destinado para la presentación es de 15 minutos y 5 minutos adicionales para preguntas
- Se solicita llegar con mínimo 10 minutos de anterioridad a la hora asignada y confirmar con el personal encargado su asistencia.
- El certificado de participación se enviará al correo de la inscripción una semana después del evento y una vez sea confirmada la realización de la ponencia en el evento.
- En caso de cambios en la programación se les avisara por medio del correo electrónico, por favor esté atento.

Agradecemos de antemano su contribución científica a este evento y quedamos atentos a su confirmación de recibido.

Cordial saludo.

El Comité de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería tiene el gusto de informarle que su trabajo titulado **"Síntesis sol-gel de xerogeles síliceas mesoestructuradas a partir de la cascarilla de arroz con capacidad de captura de CO₂"** fue aprobado para ser presentado en modalidad de ponencia en el X Simposio de Investigaciones 2018, Universidad del Valle, los días 2, 3 y 4 de mayo de 2018.

Para su información relacionamos el horario asignado en el que se deberá presentar su trabajo.

Fecha	Hora	Lugar
2 de mayo de 2018	11:00 am	Auditorio Valle del Cauca (edificio 336)

Por favor tenga en cuenta las siguientes observaciones y recomendaciones:

- El tiempo destinado para la presentación es de 15 minutos y 5 minutos adicionales para preguntas
- Se solicita llegar con mínimo 10 minutos de anterioridad a la hora asignada y confirmar con el personal encargado su asistencia.
- El certificado de participación se enviará al correo de la inscripción una semana después del evento y una vez sea confirmada la realización de la ponencia en el evento.
- En caso de cambios en la programación se les avisara por medio del correo electrónico, por favor esté atento.

Agradecemos de antemano su contribución científica a este evento y quedamos atentos a su confirmación de recibido.

AEROGEL SILÍCEA ECOSOSTENIBLE A PARTIR DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Michael Andrés Gómez Rivera

Juan David Pardo

David Calambas

Silvio Delvasto, PhD

Gustavo Bolaños, PhD

Isabel Mejía, PhD



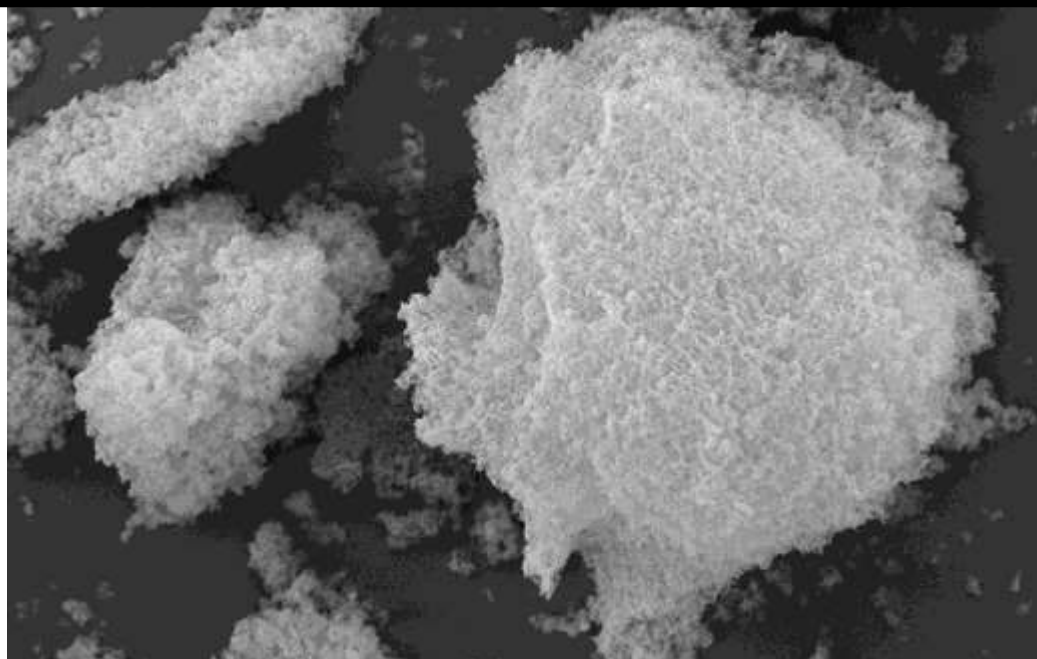
**SIMPOSIO DE
INVESTIGACIONES
2018** | Ingeniería
Innovación
Desarrollo

**02 al 04
de Mayo de 2018**
Universidad del Valle



2018

OBTENCIÓN DE MATERIALES SILÍCEOS A PARTIR DE CENIZA DE
CASCARILLA ARROZ POR PROCESOS HIDROTERMALES Y DE SOL-GEL
CON CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO₂



Juan David Pardo Estrada

UNIVERSIDAD DEL VALLE

23-1-2018

**OBTENCIÓN DE MATERIALES SILÍCEOS A PARTIR DE CENIZA DE
CASCARILLA ARROZ POR PROCESOS HIDRO TERMALES Y DE SOL-GEL
CON CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO₂**

ING. JUAN DAVID PARDO ESTRADA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES
GRUPO MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI-VALLE DEL CAUCA
ENERO 2018**



**OBTENCIÓN DE MATERIALES SILÍCEOS A PARTIR DE CENIZA DE
CASCARILLA ARROZ POR PROCESOS HIDROTERMALES Y DE SOL-GEL
CON CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO₂**

**Trabajo de Investigación
Para Optar por el Título de Magister en Ingeniería
Área de Énfasis en Ingeniería de Materiales**

**Presentado por:
ING. JUAN DAVID PARDO ESTRADA**

**Director:
SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc., PhD.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES
GRUPO MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI-VALLE DEL CAUCA
ENERO, 2018**

Dr. SILVIO DELVASTO ARJONA
Director del Trabajo de Investigación

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco:

A Dios por que permitió que se llevara a cabo la realización de este proyecto.

A mis familiares, Jesús Antonio Pardo, Amparo Estrada, Mary Estrada y Andrés Felipe Pardo por brindarme comprensión, paciencia, motivación y el apoyo en esta etapa de mi vida.

A mi Director de trabajo de grado, Dr. Silvio Delvasto Arjona, por hacer posible esta investigación, por guiarme y brindarme su conocimiento, con su extraordinaria calidad humana y profesional.

Al Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle GMC, por el cual se fue posible la realización este trabajo.

A todos mis profesores, laboratoristas y compañeros de la Escuela de Ingeniería de Materiales que contribuyeron en esta etapa de formación personal y académica.

A mis amigos, compañeros y conocidos que contribuyeron en gran manera a mi crecimiento personal y académico: Álvaro Gómez, Natalia Hurtado, Michael Gómez, Karen Lozano, Rafael Robayo, Yimmi Silva, Carolina Perea, Viviana Ruiz, Luis Guzmán, Luisa Suarez, Jhon Torres, David Calambas, Irvin Castro.

Al grupo de Salsa VIP excepto a Christian por tenerme paciencia mientras con las faltas en mis salidas.

RESUMEN

La presente Tesis de Maestría ha sido desarrollada en la Universidad del Valle. Principalmente, hace parte de la línea de investigación en *Síntesis sol-gel y nanopartículas* del Grupo de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales. La investigación ha sido financiada a través del proyecto de convocatoria interna 3 de la Universidad del Valle: “Aerogeles de Nanosilice Para Recubrimientos Súper Aislantes Ecosostenibles” de la cual se han derivado múltiples trabajos como la obtención, de whiskers y nanopartículas con un elevado número de aplicaciones entre las cuales se encuentra el desarrollo de materiales funcionales para la captura de dióxido de carbono.

El crecimiento exponencial de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2) en los últimos 150 años ha causado el desequilibrio de su concentración atmosférica, dando lugar a un calentamiento global y al conocido Cambio Climático. Actualmente, el objetivo de la comunidad internacional es reducir las emisiones de estos gases, usando tecnologías postcombustión que implican el uso de materiales de elevada área superficial como las xerogeles silíceas. En esta investigación se obtuvieron xerogeles silíceas a partir del residuo agroindustrial de la cascarilla de arroz, CA, a través de un tratamiento termoquímico y una síntesis sol gel, que a diferencia de los métodos convencionales emplean reactivos de elevada toxicidad y costo como los alcóxidos metálicos. El proceso planteado con parámetros de operación económicos, tales como bajos tiempos de envejecimiento (no superiores a las 18 horas) y una temperatura de gelificación de 25 °C.

Se observó que con el uso de un agente direccionador de estructura como el Bromuro de hexadeciltrimetilamonio o Bromuro de cetiltrimetilamonio ($(\text{C}_{16}\text{H}_{33})\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$), CTAB, se pueden obtener xerogeles silíceas con micro y mesoporosidad bimodal

(alrededor de 15,05 Å), altamente hidrofílicas, con volumen de poros de 0,76 cm³/g, además de una muy elevada área específica (1.051 m²/g). Finalmente, se funcionalizaron las xerogeles síliceas con tetraetil pentamina, una solución de aminas alifáticas que permitió obtener un material funcional con capacidad de captura de CO₂ pasando de 43 a 148 mg de CO₂/g ads (adsorbido), lo cual es un resultado promisorio al comparar con el de sólidos comúnmente utilizados en la captación de gases de efecto invernadero en tecnologías post-combustión.

Palabras Claves: Cascarilla de arroz, Sílice, Sol-gel, xerogeles, CTAB. Captura de CO₂.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	12
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 Materiales Poro-Estructurados	15
2.2 Materiales Mesoporosos	16
2.3 Sílices mesoporosas	17
2.4 Cascarilla de Arroz	19
2.5 Calcinación de la cascarilla de arroz	21
2.6 Materiales síliceos a partir de la cascarilla de arroz.....	24
2.7 Química sol-gel para la obtención de sílices mesoporosas	25
2.8 Agentes direccionadores de estructura	27
2.9 Síntesis y Captura de CO ₂	30
3. OBJETIVOS.....	33
3.1 Objetivo general	33
3.2 Objetivos específicos.....	33
4. METODOLOGIA GENERAL	34
5. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	36
Resumen del Capitulo.....	36
5.1 Adecuación y caracterización de materias primas.....	36
5.1.1 <i>Reactivos Empleados</i>	36
5.1.2 <i>Cascarilla de arroz</i>	37
5.2 Microscopía electrónica de barrido de la cascarilla de arroz.....	38
5.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de la cascarilla de arroz	40

5.4	Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz	41
5.5	Análisis próximos de la CA	43
5.6	Fluorescencia de Rayos X (FRX)	44
5.7	Obtención de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) con alto grado de reactividad	46
5.7.1	<i>Efecto de la temperatura de calcinación.....</i>	46
5.7.2	<i>Efecto del tratamiento de limpieza.....</i>	48
5.7.3	<i>Distribución granulométrica.....</i>	51
5.8	Obtención del precursor silíceo	52
6.	SÍNTESIS SOL-GEL DEL MATERIAL SILICEO MESOPOROSO CON CAPACIDAD DE CAPTURA DE CO ₂	55
	Resumen del capítulo.....	55
6.1	Variables y Diseño Experimental de la Síntesis Sol-Gel.....	56
6.1.1	<i>Unidad Experimental, factores, niveles y tratamientos</i>	56
6.1.2	<i>Aleatorización y asignación de tratamientos a las unidades experimentales - catálisis experimental</i>	57
6.2	Caracterización de xerogeles silíceas mesoestructuradas	60
6.3	Desarrollo de xerogeles con direccionamiento de estructura	65
6.4	Funcionalización y captura de CO ₂	71
6.4.1	<i>Impregnación de xerogeles con tetraetilenpentamina (TEPA)</i>	71
6.4.2	<i>Evaluación de captura de CO₂.....</i>	73
7.	CONCLUSIONES	78
8.	REFERENCIAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema estructural de materiales mesoporosos a) hexagonal 2D (MCM-41), (b) cúbica (MCM-48) y (c) laminar (MCM-50) (Q. Huo et al., 1996).	17
Figura 2. Polimorfismos de la sílice en función de la temperatura (Rahaman M.N., 2003).....	22
Figura 3. Curva de Análisis Termogravimétrico de la cascarilla de arroz (Pardo y Salinas 2013).	23
Figura 4. Mecanismo de formación de un gel de sílice a través de un proceso sol-gel la imagen superior: desde la interacción con el agente direccionador de estructura; inferior: reacciones de hidrolisis y condensación (Balu A., 2012).	26
Figura 5. Micelas en función de la concentración de surfactante (Borodina, E., et al., (2015) e.....	27
Figura 6. Mecanismo de formación del MCM-41: 1) comienzo de la fase de cristal líquido. 2) comienzo del ion silicato (Borodina, E., et al., (2015).	29
Figura 7. Diagrama de fases del sistema surfactante CTAB-agua (Balu A., 2012)...	30
Figura 8. Esquema general de la metodología experimental empleada.....	35
Figura 9. Tratamientos previos de la CA, a) Limpieza manual, b) Después de tratamiento con ácido.....	37
Figura 10. MEB vista general de la cascarilla de arroz sin tratamiento termoquímico.	39
Figura 11. Espectro FTIR de la cascarilla virgen.	40
Figura 12. Curva de Análisis Térmico Gravimétrico de la cascarilla de arroz.	41
Figura 13. Calcinación de la CA. Horno eléctrico utilizado (izquierda). Lote de CA calcinada (derecha).....	47
Figura 14. CCA de arroz obtenida a 600 °C, tratada con ácido (izquierda), sin tratamiento químico (derecha).	49
Figura 15. Difractograma de CCA sin tratamiento químico (izquierda), CCA de arroz obtenida a 600 °C, tratada con ácido sulfúrico (derecha).	50

Figura 16. Granulometría laser de CCA de arroz obtenida a 600 °C, previamente tratada con ácido sulfúrico.	52
Figura 17. Sistema utilizado para la obtención del precursor silíceo, consta de un condensador y un balón de dos boquillas.....	53
Figura 18. Síntesis sol-gel. Montaje para medir el cambio de pH (izquierda). Etapa de centrifugación (derecha). Incorporación del surfactante (abajo).....	59
Figura 19. Gráfico de contorno obtenido para la MSR planteada.	62
Figura 20. Precursor previo a la catálisis ácida (Izquierda). Gelificación (centro). Xerogel en polvo seca (derecha).	63
Figura 21. Espectro de difracción obtenido para las xerogeles silíceas	64
Figura 22. Ensayo de análisis termogravimétrico (TGA) a las xerogeles silíceas....	65
Figura 23. Isotermas de adsorción-desorción para la xerogel obtenida sin agente direccionador de estructura X1 (izquierda), X2S (derecha).....	68
Figura 24. Distribución de tamaño de poro para la xerogel obtenida sin agente direccionador de estructura (X1), X2S (derecha).....	69
Figura 25. Micrografías MEB de X1.	69
Figura 26. Micrografías MEB de X2S.	70
Figura 27. Estructura química del TEPA (Pérez, 2013).	72
Figura 28. Microscopia electronia de xerogeles funcionalizadas.....	73
Figura 29. Metodología empleada en la termobalanza para la captura de CO ₂ . Canastilla de deposición de muestra (izquierda). Termobalanza (derecha).....	74
Figura 30. Resultados captura de CO ₂	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de la cascarilla de arroz.	20
Tabla 2. Composición química de una cascarilla de arroz colombiana.	20
Tabla 3. Reactivos utilizados.....	37
Tabla 4. Análisis próximo de la cascarilla de arroz.	44
Tabla 5. Composición de la cascarilla de arroz.	46
Tabla 6. Contenido de Sílice amorfa	48
Tabla 7. Resultados de XRF para la CCA.	50
Tabla 8. Caracterización del silicato de sodio.....	54
Tabla 9. Factores y niveles del MSR para el sol gel.	57
Tabla 10. Aleatorización y codificación de la MSR planteada en Minitab.	57
Tabla 11. Resultados de Área Específica (AE), m ² /g, para la xerogeles obtenidas.	61
Tabla 12. Parámetros de Fisiadsorción de xerogeles	66
Tabla 13. EDS de xerogeles.....	71

1. INTRODUCCION

El aprovechamiento de residuos es un imperativo ambiental que permite plantear aplicaciones dentro del concepto de desarrollo sostenible. La cascarilla de arroz (CA) es un subproducto con alto impacto ambiental de la industria arroceras cuyo aprovechamiento implicaría el uso de una fuente renovable en múltiples aplicaciones, principalmente por su elevado contenido de sílice. La gran disponibilidad de este residuo lo hace altamente atractivo. La producción mundial de arroz en 2015 fue cercana a los 745,5 millones de toneladas, generando como subproducto alrededor de 149 millones de toneladas de cascarilla (*Food and Agriculture Organization of United Nations*, abril. 2016), este desecho presenta un contenido de sílice superior al 18% lo que despierta interés por su origen, microestructura, tamaño, y aplicación en diversas industrias (Ahmed, Ewais y Zaki 2008). Como residuo agroindustrial ya ha sido objeto de estudio en una línea de investigación del Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle en diversas investigaciones (Salas, et al 2013; Bernal, et al., 2012; Garzón, 2010, entre otros) y en dos patentes que han evidenciado usos alternativos de estos desechos, dando lugar a posibles estudios de utilización como material puzolánico, sílice precipitada, y la obtención de precursores silíceos para la manufactura de materiales porosos nano estructurados con un gran potencial de aplicaciones (Zaky, et al., 2008).

En la actualidad los materiales silíceos de estructura porosa tienen gran relevancia en diversos campos, desde las clásicas aplicaciones industriales hasta nuevas áreas de interés como el almacenamiento de hidrógeno, metano y amoníaco, los sensores, el uso de soportes y/o moldes para nanopartículas, entre otros (Garzón C., 2010). En años recientes una de las investigaciones de mayor auge es la implementación de materiales silíceos mesoporosos de alta área específica en tecnologías de captura y

**ESTUDIO DE UN RECUBRIMIENTO ELABORADO A PARTIR DE MICROSÍLICE
PARA PLACAS DE FIBROCEMENTO**



DIANA CAROLINA ZULUAGA ROSERO

MILLER ALEXIS FERNANDEZ RUIZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
GRUPO MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI
2017**

**ESTUDIO DE UN RECUBRIMIENTO ELABORADO A PARTIR DE MICROSÍLICE
PARA PLACAS DE FIBROCEMENTO**



DIANA CAROLINA ZULUAGA ROSERO

MILLER ALEXIS FERNANDEZ RUIZ

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero de materiales

Ing. Silvio Delvasto Arjona, MSc., Ph.D.

Director

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
GRUPO MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI
2017**

Nota de Aceptación:

SILVIO DELVASTO ARJONA, Ph.D.
Director

Jurado

Jurado

Santiago de Cali. Junio, 2017

Agradecimientos

Principalmente agradecemos a Dios por permitir que se llevara a cabo la realización de este proyecto.

Al finalizar el presente trabajo de nuestra carrera queremos agradecer gratamente a nuestros padres por su apoyo incondicional, por darnos la educación y brindarnos los medios necesarios para terminar nuestro proceso de formación con éxito.

A nuestro director de trabajo de grado el Dr. Silvio Delvasto Arjona, por permitirnos desarrollar este trabajo de grado, por guiarnos y brindarnos su conocimiento, con su extraordinaria calidad humana y profesional.

A todos nuestros profesores, laboratoristas y compañeros de la Escuela de Ingeniería de Materiales que contribuyeron en nuestra formación personal y académica.

CONTENIDO

Resumen	11
1 Introducción	12
2 Objetivos	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 Marco teórico	16
3.1 Residuos naturales como fuentes de sílice.....	16
3.2 Cascarilla de arroz	17
3.2.1 Morfología y composición de la cascarilla de arroz	18
3.2.2 Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz	21
3.2.3 Ceniza de cascarilla de arroz	21
3.3 Silicato de sodio.....	22
3.4 Sílice	23
3.4.1 Preparación de sílice.....	24
3.5 Proceso Sol-Gel.....	25
4 Estado del Arte.....	27
4.1 Limpieza de la cascarilla de arroz.....	27
4.2 Obtención de sílice a partir de la cascarilla de arroz	28
4.3 Factores que afectan el proceso de obtención de la sílice	33
4.3.1 Efecto de diferentes ácidos en la precipitación de sílice	33
4.3.2 Efecto del tiempo de envejecimiento.....	34
4.3.3 Efecto de temperatura de envejecimiento	35
4.3.4 Efecto de la concentración del silicato de sodio	35
4.3.5 pH de gelación	36
5 Metodología experimental.....	37
5.1 Recolección y consulta de información.....	38
5.2 Selección y caracterización de los materiales	38
5.2.1 Cascarilla de arroz	38

5.2.2	Hidróxido de Sodio	39
5.2.3	Ácido Clorhídrico	39
5.2.4	Placas de fibrocemento	39
5.2.5	Resina acuosa	39
5.3	Adecuación de la cascarilla de arroz	39
5.4	Tratamiento químico	41
5.5	Diagrama de flujo del tratamiento químico.....	44
5.6	Elaboración del recubrimiento protector.	45
6	Análisis de resultados	47
6.1	Caracterización de la cascarilla de arroz	47
6.1.1	Análisis próximos	47
6.1.2	Fluorescencia de Rayos X (FRX)	48
6.1.3	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y EDS.....	49
6.1.4	Análisis termogravimétrico (TGA).....	50
6.2	Caracterización de la sílice precipitada.....	52
6.2.1	Fluorescencia de Rayos X (FRX)	52
6.2.2	Granulometría Laser	54
6.2.3	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	54
6.2.4	Difracción de Rayos X (DRX)	55
6.2.5	Análisis termogravimétrico (TGA).....	56
6.2.6	Área Superficial y Volumen de Poros mediante BET	57
6.3	Caracterización del recubrimiento protector	58
6.3.1	Adherencia	58
6.3.2	Permeabilidad	59
6.3.3	Conductividad Térmica.....	61
6.3.4	Estereoscopía	62
6.3.5	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	63
7	Conclusiones y recomendaciones.....	64
8	Bibliografía	66
9	Anexos	72

Anexo A1.....	72
Anexo A2.....	72

Índice de tablas

Tabla 1. Composición química de algunos residuos agroindustriales (Pardo y Salinas, 2013)	16
Tabla 2. Composición química de la cascarilla de arroz obtenida por la técnica de caracterización EDX (Arcos et al., 2007)	20
Tabla 3. Parámetros para la síntesis de nanopartículas de sílice monodispersas.	27
Tabla 4. Resultados obtenidos del tamaño y morfología de las partículas, adicionando etanol y agua (Usama et al., 2015).....	30
Tabla 5. Caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz obtenida por pirolisis (Carrillo et al, 2013)	31
Tabla 6. Dosificación de las mezclas	45
Tabla 7. Análisis próximo de la cascarilla de arroz.	47
Tabla 8. Composición de la cascarilla de arroz.....	48
Tabla 9. Promedio del porcentaje de elementos presentes en la cascarilla de arroz.	50
Tabla 10. Composición elemental de la muestra precipitada.....	52
Tabla 11. Propiedades térmicas.	61

Índice de figuras

Figura 1 Cascarilla de arroz (Contexto Ganadero, 2016)	17
Figura 2 Fotografías obtenidas por SEM de la morfología de la cascarilla de arroz a) Parte externa de la cascarilla (Doria et al., 2013), b) Parte interna de la cascarilla (Arcos et al., 2007) y c) sección transversal de la cascarilla (Touhami et al., 2017).	19
Figura 3 Datos experimentales obtenidos de la composición de la cascarilla de arroz colombiana (Piñeros et al., 2011).	20
Figura 4 Esquema general del proceso sol gel (Hernández, 2013)	26
Figura 5 Contenido de sodio de muestras de sílice hechas por diferentes tratamientos ácidos (Tzong y Chun, 2011).	34
Figura 6 Efecto de la concentración del silicato de sodio en el área superficial de la sílice (Tzong y Chun, 2011).	36
Figura 7 Molienda de la cascarilla de arroz.	40
Figura 8 Filtración, (a) Parte sólida retenida, (b) Proceso de filtración al vacío.	42
Figura 9 a) Gel filtrado. b) Pasta de sílice. c) Polvo de sílice	43
Figura 10 Diagrama de flujo del tratamiento químico.....	44
Figura 11 Mezclas elaboradas. a) M1. b) M2. c) m3. d) M4. e) M5.....	46
Figura 12 SEM de la cara externa de la cascarilla de arroz, (a) Aumento de 40X, (b) Aumento de 200X.	49
Figura 13 SEM de la cara interna de la cascarilla de arroz.....	50
Figura 14 Curva TGA de la cascarilla de arroz en atmosfera de Nitrógeno.	52
Figura 15 Distribución granulométrica de las partículas de sílice.	54
Figura 16 Micrografía SEM de la sílice precipitada, con un aumento de 200X.....	55
Figura 17 Patrón de difracción de rayos X (DRX) de la sílice obtenida de la cascarilla de arroz.....	56
Figura 18 Patrón de DRX de la sílice obtenida de la cascarilla (Zulkifli et al., 2013).	56
Figura 19 Ensayo de análisis termogravimétrico (TGA) a la sílice obtenida del proceso.	57
Figura 20 Análisis de TGA a la sílice (Tzong y Chun, 2011).....	57
Figura 21 Placa con recubrimiento sometido a corte enrejado para evaluar la adherencia.	59
Figura 22 Escala de adherencia de acuerdo a la norma 3359.....	59
Figura 23 Ensayo de permeabilidad para placas de acuerdo a la norma NTC 809.	60

Figura 24 Placa de superboard sin recubrimiento.....	60
Figura 25 Muestras sometidas al ensayo de permeabilidad luego de 24 horas de ensayo.	61
Figura 26 Estereoscopía con aumento de 50X.	62
Figura 27 Fotografía tomada en el estereoscopio de la superficie de la placa de fibrocemento.	63
Figura 29 Micrografía a 50X de la placa de fibrocemento recubierta.....	63

Resumen

En el sector agrícola de producción de granos, en especial al arroz se le realiza un proceso de descascarado para retirar la cascarilla, generando gran cantidad de material desechado. Una de las prácticas más frecuentes realizadas por los agricultores con el fin de eliminar este residuo es su quema en el campo, lo que genera emisiones al aire de altas concentraciones de contaminantes. Por otro lado, las industrias han implementado tecnologías para realizar combustión controlada de la cascarilla y aprovechar la energía generada, pero las cenizas obtenidas también traen problemas de contaminación.

Debido a esta problemática se empleó la cascarilla de arroz proveniente de la Arrocería la Esmeralda, como materia prima para la obtención de silicato de sodio y precipitación de sílice, sin pasar por el proceso de calcinación. Esto se realizó utilizando como precursores hidróxido de sodio y ácido clorhídrico para el tratamiento químico, a una concentración del 5%, las variables a controlar en el proceso de obtención del silicato de sodio fueron la temperatura a 97°C y el tiempo de reacción de 1 hora. Para la precipitación de la sílice se trabajó a pH de 7 y temperatura ambiente.

La sílice obtenida de la cascarilla de arroz se caracterizó mediante fluorescencia de rayos x (FRX) dando una pureza del 94,3%, granulometría laser con un tamaño medio de partícula de 37,85µm corroborado en microscopía electrónica de barrido (SEM) donde se pudo apreciar la morfología y tamaño de partícula, difracción de rayos X (DRX) verificando la naturaleza amorfa de la sílice, análisis termogravimétrico (TGA) para mirar el comportamiento de la muestra a elevadas, y por último el cálculo del área superficial mediante el ensayo BET, dando un valor de 208,36 m²/g.

A partir de la sílice precipitada se desarrolló un recubrimiento con 20g de resina acuosa y 2g de sílice, siendo esta la mezcla óptima para recubrir una placa de fibrocemento con dimensiones de 10x10cm. Al recubrimiento se le evaluaron propiedades como adherencia, permeabilidad, conductividad térmica y análisis superficial; donde la principal característica fue la conductividad térmica dando un valor de 0,3250 W/mK, valor inferior al obtenido en una placa de fibrocemento sin recubrimiento, dándonos indicio de que el material puede ser usado como un aislante térmico.

Palabra clave: cascarilla de arroz, sílice precipitada, aislante térmico, tratamiento químico.

1 Introducción

Como lo afirma la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el arroz es uno de los cereales más comunes e importancia en el mundo, debido a que se generan altas producciones anuales. Se estima que la producción mundial de arroz para el año 2017 será de 758,5 millones de toneladas, lo que significa un incremento cerca de los 5,8 millones de toneladas o un 0,8% más que el año pasado.

En la actualidad es producido en 113 países alrededor de todo el continente. Se cultiva en una amplia variedad de condiciones climáticas y suelos. En América los países que se destacan por su producción son Brasil y Estados Unidos, sin embargo en países latinoamericanos como Venezuela, Colombia, Perú, Ecuador, Argentina y Uruguay, el sector arrocerero es un renglón de gran importancia en el desarrollo rural y económico (Ramírez, 2014). En Colombia, el arroz es considerado como uno de los principales productos de consumo alimenticio, según estudios realizados recientemente se menciona que por año se generan alrededor de 2.100.000 toneladas, y a causa de esta producción se obtienen 400.000 toneladas de cascarilla de arroz (Mattey et al., 2015).

Un derivado de la producción de arroz es la generación de un subproducto como lo es la cascarilla de arroz que corresponde aproximadamente al 23% de su peso inicial. Esta cascarilla puede ser usada como un fertilizante en la agricultura o como un aditivo para la fabricación de cemento y concreto, pero el poco valor dado a la cascarilla, se debe especialmente a las pocas tecnologías implementadas en el país para su procesamiento y posterior valorización, de esta manera se emplea también como combustible sólido, material para quema en calderas en el proceso de secado del grano y en otros casos como material para abono (Piñeros et al., 2011). A causa del constante aumento en las cifras de producción de arroz, se generan consecuencias nefastas para el medio ambiente y para quienes viven alrededor (BBC MUNDO, 2010); ya que la cascarilla de arroz es uno de los subproductos más problemáticos de eliminar durante la cosecha del arroz por su elevado costo de su retirada y su nulo aprovechamiento, por lo tanto ante esta dificultad, la práctica más frecuente realizada por los agricultores es quemarla en el campo, lo que genera una gran concentración de emisiones al aire, provocando la contaminación del lugar y zonas aledañas, con partículas y gases resultantes de la combustión (Abril et al., 2009).

Se pensó que la cascarilla de arroz no tenía ningún valor comercial, pero debido al alto contenido de sílice presente, la cual es altamente porosa, con peso liviano y de alta superficie específica, hacen que la cascarilla sea importante económicamente (Mohammed et al., 2013). Por tal razón, debido a su alto contenido de sílice, la cascarilla de arroz se ha convertido en una fuente potencial para la preparación de silicio elemental y una serie de compuestos de silicio, especialmente sílice, carburo de silicio y nitruro de silicio (Della et al., 2002).

El tetraetoxisilano (TEOS) y el tetrametoxisilano (TMOS) se ha utilizado principalmente como fuente de sílice. Sin embargo, estas fuentes son relativamente costosas y presentan una elevada toxicidad. La cascarilla de arroz es una biomasa agroindustrial la cual puede considerarse como una abundante fuente de sílice. Esta puede ser recuperada por medio de una quema a la cascarilla de arroz a temperaturas altas cercanas a 650°C durante una hora para obtener ceniza de cascarilla de arroz (Farook et al., 2011).

Actualmente, la cascarilla de arroz es quemada principalmente para obtener sílice, pero esto puede causar polución del aire porque se libera una gran cantidad de gases de efecto invernadero y la emisión de la ceniza de cascarilla de arroz en el ecosistema resulta en el síndrome de silicosis, fatiga, afecciones respiratorias entre otros. Por lo tanto, la extracción de sílice de la cáscara de arroz de una manera más benigna, es cada vez más importante para la calidad y la preservación del medio ambiente, a través del desarrollo sostenible y el uso de tecnologías más limpias (Zulkifli et al., 2013).

Por esta razón en el presente proyecto de grado se propone seleccionar la cascarilla de arroz como fuente económica para la extracción de sílice, empleando una ruta de extracción por el método sol gel, sin la necesidad de aplicar una calcinación en el proceso. De esta manera se busca aprovechar un residuo agroindustrial que se genera en grandes cantidades en el país y adicionalmente se da un valor agregado a la sílice obtenida, buscando una posible aplicación como recubrimiento sobre sustratos cementicios.

Este trabajo de grado contó con el apoyo del proyecto de investigación del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Universidad del Valle, proyecto denominado *“Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo”* contrato FP44842-399- 2015, financiado por el PATRIMONIO AUTÓNOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN, FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS-COLCIENCIAS”, el cual es dirigido por el profesor Silvio Delvasto Arjona, MSc.,

Ph.D.

El proyecto de grado también contó con el apoyo del proyecto de investigación del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Universidad del Valle denominado Proyecto Aerogeles de nanosílice para recubrimientos súperaislantesecosostenibles. Convocatoria interna para la conformación del banco de proyectos de investigación - 2016 - convocatoria 3-2016. Universidad del Valle. C.I: 910, Código de carpeta: 01, el cual es dirigido por el profesor Silvio Delvasto Arjona, MSc., Ph.D.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un material de recubrimiento basado en microsílice obtenida de la cascarilla de arroz, con una posible aplicación como aislante térmico sobre materiales cementicios

2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar y caracterizar la cascarilla de arroz.
- Obtener silicato de sodio a partir del proceso de digestión de la cascarilla de arroz.
- Precipitar y separar la microsílice del silicato de sodio.
- Desarrollar y estudiar un material de recubrimiento protector para placas de fibrocemento.
- Evaluar cualitativamente el desempeño del material de recubrimiento en las placas de fibrocemento.

**UTILIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE HUEVO COMO MATERIAL BASE EN LA
SINTESIS DE *WHISKERS* DE CARBONATO DE CALCIO POR SOL-GEL**

DAVID STEVEN CALAMBAS GALVIS

LAURA MARCELA BERNAL MEDAGLIA

GRUPO MATERIALES COMPUESTOS UNIVERSIDAD DEL VALLE



UNIVERSIDAD DEL VALLE- FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

SANTIAGO DE CALI

2018

UTILIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE HUEVO COMO MATERIAL BASE EN LA SINTESIS
DE *WHISKERS* DE CARBONATO DE CALCIO POR SOL-GEL

DAVID STEVEN CALAMBAS GALVIS

LAURA MARCELA BERNAL MEDAGLIA

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero de materiales

INGENIERO SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc., PhD.

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DEL VALLE- FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

SANTIAGO DE CALI

2018

Nota de Aceptación:

SILVIO DELVASTO ARJONA, PhD.

Director

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Mayo 2018

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo general	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	ESTADO DEL ARTE	14
3.1	Carbonato de calcio (CC)	14
3.1.1	Características del CC.....	14
3.2	Precipitación de carbonato de calcio	15
3.3	Cáscara de huevo: Características fisicoquímicas.....	16
3.4	<i>Whiskers</i>	17
3.4.1	Métodos de obtención de <i>whiskers</i> y nanofibras.....	18
3.5	Método Sol-gel	18
4	ANTECEDENTES.....	21
4.1	Cáscara de huevo como residuo potencial	21
4.2	Extracción de carbonato de calcio a partir de cáscara de huevo	23
4.2.1	Precipitación de carbonato de calcio	24
4.3	Procesos de obtención de <i>whiskers</i> de carbonato de calcio	26
4.3.1	Obtención de <i>whiskers</i> de carbonato de calcio por Sol-gel.....	27
4.4	Posible aplicación: <i>Whiskers</i> de carbonato de calcio como refuerzo de placas delgadas de cemento	29
5	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	31
5.1	Revisión bibliográfica.....	31
5.2	Recolección y caracterización de cáscara de huevo.....	31

5.3	Obtención y caracterización de la materia prima	32
5.3.1	Obtención de carbonato de calcio precipitado (CCP)	32
5.3.2	Obtención de carbonato de calcio con limpieza manual (CCLM)	33
5.3.3	Procedimiento experimental	33
5.3.4	Caracterización del carbonato de calcio de alta pureza	33
5.4	Determinación de parámetros sol-gel	34
5.4.1	Determinación de la materia prima	34
5.4.2	Determinación de los reactivos y relaciones molares	34
5.4.3	Determinación de la temperatura del proceso	35
5.4.4	Determinación de la velocidad de agitación	35
5.4.5	Determinación del tratamiento térmico	35
5.5	Diseño experimental	35
5.6	Procedimiento experimental	37
5.7	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	39
5.8	Difracción de rayos X (DRX)	39
5.9	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	39
5.10	Aplicación del material obtenido	39
6	RESULTADOS Y ANALISIS	40
6.1	Caracterización de la cáscara de huevo	40
6.1.1	Análisis termogravimétrico (TGA)	40
6.1.2	Fluorescencia de rayos X	42
6.2	Caracterización de la materia prima	43

6.2.1	Determinación de parámetros en la precipitación	43
6.2.2	Fluorescencia de Rayos X (FRX)	44
6.2.3	Difracción de rayos X (DRX)	46
6.2.4	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	47
6.2.5	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	48
6.3	Determinación de parámetros de sol-gel	51
6.3.1	Determinación de la materia prima	51
6.3.2	Determinación de los reactivos y relaciones molares	56
6.3.3	Determinación de la temperatura del proceso	58
6.3.4	Determinación de la velocidad de agitación	58
6.3.5	Determinación del tratamiento térmico	58
6.4	Análisis del proceso sol-gel	58
6.5	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	61
6.6	Difracción de rayos X (DRX)	66
6.7	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	67
6.8	Aplicación	68
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
7.1	Conclusiones	71
7.2	Recomendaciones	72
8	BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de la cáscara de huevo (Binici et al., 2015).	17
Tabla 2. Producción de huevo (Miles de Unidades). Fuente FAO. http://faostat3.fao.org/home/E	21
Tabla 3. Niveles de las variables de estudio	36
Tabla 4. Nombres utilizados para las muestras en estudio	37
Tabla 5. Comportamiento térmico de la cáscara de huevo recolectada.	40
Tabla 6. Composición química de cáscara de huevo.	42
Tabla 7. Composición química del CCP y del CCLM	45
Tabla 8. Posición de las bandas infrarrojas y su asignación tentativa para el CCLM y CCP.	48
Tabla 9. Datos teóricos y experimentales obtenidos del proceso de preparación de la materia prima.....	54
Tabla 10. Contenido de CaCO_3 e impurezas en las materias primas.	56
Tabla 11. Tiempo de preparación del sol.	57
Tabla 12. pH para las soluciones con distintas relaciones en estudio	59
Tabla 13. Posición de las bandas infrarrojas y su asignación tentativa para el B1:1c	68
Tabla 14. Resultados comparativos de Área Superficial BET	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de carbonato de calcio.	14
Figura 2. Estructura de la cáscara de huevo. Adaptado de (Laca et al., 2017)	16
Figura 3. a) Relación entre la resistencia y la estructura de diversas fibras. b) Comparación entre las propiedades mecánicas de las fibras. Adaptado de (Milewski, 1992)	18
Figura 4. Técnicas de procesamiento basadas en el proceso Sol-gel. Adaptado de (Lee, Kim, Bae, Shin, & Kim, 2010)	19
Figura 5. Consumo de huevos per cápita anual en los últimos diez años. Fuente: Fenavi.	22
Figura 6. a) Montaje experimental del proceso sol-gel. b) Plancha de calentamiento utilizada.	37
Figura 7. Diagrama de Bloques del procedimiento Experimental	38
Figura 8. a) Muestra de cáscara de huevo recolectada. b) Molienda manual de cáscara de huevo con mortero. c) Cáscara de huevo molida.	40
Figura 9. Termograma de cascara de huevo en atmosfera de aire	41
Figura 10. Difracción de Rayos X de: a) CCLM. b) CCP. Carta de indexación en: http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/quant/5-586.htm	46
Figura 11. Espectro FTIR de a) CCLM y b) CCP.	47
Figura 12. Imágenes micro-morfológicas obtenidas por MEB de: a) CCLM 5000x b) CCLM 10000x c) CCP 500x d) CCP 5000x.	49
Figura 13. Análisis de micrografía electrónica para determinación de distribución de partículas. a) Determinación de escala métrica a partir de pixeles. b) Partículas seleccionadas para el análisis.	50
Figura 14. Distribución de tamaños de partículas de carbonato de calcio precipitado CCP.	51
Figura 15. Diagrama de proceso de precipitación con balance de masa teórico.	53
Figura 16. Representación del producto de cada proceso con relación al material de partida CH.	55

Figura 17. Representación tentativa del complejo de ácido cítrico, donde M representa el ion Ca^{+2} . Adaptado de (Tsay & Fang, 2004).	61
Figura 18. Micrografías electrónicas SEM a 5000x de muestras obtenidas con una relación molar $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{Ca}^{+2}$ 1:1. a) A1:1s b) A1:1c c) B1:1s d) B1:1c	62
Figura 19. Micrografías electrónicas SEM a 5000x de muestras obtenidas con una relación molar $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{Ca}^{+2}$ 1:4. a) A1:4s b) A1:4c c) B1:4s d) B1:4c	62
Figura 20. Micrografías electrónicas SEM a 5000x de muestras obtenidas con una relación molar $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{Ca}^{+2}$ 1:8. a) A1:8s b) A1:8c c) B1:8s d) B1:8c	63
Figura 21. Proceso de obtención de relación de aspecto promedio. a) partículas seleccionadas para el análisis. b) Distribución de frecuencia de las relaciones de aspecto.....	64
Figura 22. Morfología de fibras obtenidas en comparación con <i>whiskers</i> reportados de CaCO_3 . Muestra B1:1s a) 2.000 aumentos b) 5.000 aumentos c) <i>Whiskers</i> con relación de aspecto entre 15 y 40 reportados por Cao et al., (2016) d) <i>Whiskers</i> de aragonita con relación de aspecto de 5,7 reportados por Guo et al., (2011)	65
Figura 23. Difracción de Rayos X de muestra B1:1c (Con tratamiento térmico y proceso a 80°C)	66
Figura 24. Espectro FTIR de producto con tratamiento térmico	67

RESUMEN

Teniendo en cuenta los elevados niveles de polución generados por la inadecuada deposición de un residuo de gran magnitud como lo es la cáscara de huevo, biocerámico rico en carbonato de calcio, se propuso y se probó una metodología para desarrollar un proceso adecuar y utilizar la cáscara de huevo como fuente de materia prima de alta pureza para sintetizar *whiskers* de carbonato de calcio por medio del método sol-gel. Para ello, inicialmente se realizaron dos tratamientos a la cáscara de huevo, uno con limpieza manual y otro de precipitación, en busca de determinar el procedimiento con mayor viabilidad para generar una materia prima rica en carbonato de calcio.

El material obtenido por cada tratamiento se caracterizó por medio de FRX, DRX, FTIR y SEM. Al comparar ambos procesos respecto a la cantidad y pureza del producto obtenido, se determinó que el mejor proceso es el de limpieza manual, produciendo por cada 100 gramos de cascara de huevo, 96,52 gramos de carbonato de calcio limpio manualmente (CCLM) con una pureza del 96,53%.

Por otro lado, en el proceso sol-gel se analizó la incidencia de la relación Ca^{+2} /ácido cítrico y la temperatura de gelación en la obtención de la morfología fibrilar de alta relación de aspecto, manteniendo constantes la velocidad de agitación y la temperatura de tratamiento térmico posterior. Los xerogeles y los productos resultantes se analizaron mediante FRX, DRX, EDS, FTIR y SEM.

Con los parámetros determinados en el proceso sol-gel y las técnicas de caracterización no fue posible catalogar categóricamente a las nanofibras obtenidas como *whiskers*, por lo tanto, no se estudió su aplicación como refuerzo fibroso de placas delgadas de cemento. Sin embargo, sí se puede afirmar que se obtuvieron xerogeles con un valor alto de área superficial BET de 36,24 m²/g, permitiendo proponer el uso del material sintetizado en aplicaciones como adsorbentes y rellenos o refuerzos particulados de matrices cerámicas y poliméricas con propiedades aislantes.

Palabras Claves: Cáscara de huevo, carbonato de calcio, precipitación, sol-gel, *whiskers*, xerogeles, área superficial BET.

1 INTRODUCCIÓN

La cáscara de huevo es un biocerámico poroso natural que representa aproximadamente el 10% del huevo, el cual es un producto alimenticio básico altamente consumido en el mundo debido a su proporción equilibrada de componentes (Laca, Laca, & Díaz, 2017; Zuluaga & Fernández, 2014). De acuerdo con FENAVI (Fenavi, 2018), sólo en Colombia se consumieron 271 huevos per cápita en 2017, generando con esto alrededor de 1.5 kg de cáscara de huevo desechada por persona, que se acumulan en vertederos sin ningún pretratamiento, convirtiéndose en fuente de contaminación orgánica. Teniendo en cuenta que la cáscara de huevo posee alrededor del 96% de CaCO_3 (Oliveira, Benelli, & Amante, 2013), el uso de este residuo como fuente de carbonato de calcio natural, se ve motivado no solo por la reducción de la polución que genera este desecho, sino también por la disminución del impacto ambiental generado por las condiciones de extracción y explotación minera de la materia prima convencional de carbonato de calcio (caliza), proporcionando un valor agregado a este desecho industrial de gran magnitud en la región.

En la actualidad, la cáscara de huevo se ha utilizado industrialmente como catalizador, sorbente de iones y químicos orgánicos e inorgánicos, y como materia prima de carbonato de calcio puro utilizado en aditivos alimenticios para humanos y animales, acondicionamiento de suelos (ajustes de pH), materiales base para preparaciones cosméticas, médicas y dentales, generación de biomateriales y materiales compuestos (Laca et al., 2017; Oliveira et al., 2013; Quina, Soares, & Quinta-Ferreira, 2017). En la producción de compuestos con mejores propiedades mecánicas, físicas y tribológicas, el carbonato de calcio sirve como relleno y refuerzo de matrices cerámicas y poliméricas en industrias como la del papel, pintura, cementos, termoplásticos, cauchos, entre otras (Xiang, Xiang, Wen, & Wei, 2004).

Los materiales de refuerzo se clasifican dependiendo de su morfología. Hasta ahora, se conocen formas como plaquetas, hojuelas, partículas, fibras cortas y continuas. Entre los diferentes tipos de fibras cortas se destacan los *whiskers*, que presentan altas resistencias a la tracción debido a que se pueden considerar como fibras monocristalinas de tamaño sub-micrónicos libre de defectos. Específicamente, los *whiskers* de carbonato de calcio son un tipo de fibras inorgánicas amigables con el medio ambiente, que presentan alta relación largo-diámetro y resistencia térmica, características importantes para la producción de compuestos cerámicos y/o poliméricos que requieran aumentos en la resistencia mecánica, abrasión y dureza.

En los últimos años, se han estudiado distintos métodos en la obtención de este tipo de refuerzo, en busca de mejorar problemas existentes en los métodos convencionales, como el control ineficiente en el crecimiento de los cristales, la contaminación del producto final y los altos costos asociados al consumo energético de producción (Qiu, Luo, & Li, 2015). Debido a lo anterior, ha crecido la importancia del proceso “sol-gel” en la producción de este tipo de material, ya que se ha demostrado que con este se superan los inconvenientes presentados, al ser un método químico en fase líquida que se realiza a presión ambiente y a temperaturas relativamente bajas.

La investigación realizada en este trabajo de grado planteó una vía de bajo costo y de implementación controlada como lo es el proceso sol-gel para la obtención de *whiskers* de Carbonato de Calcio a partir de una materia prima de alta pureza conseguida de la reutilización y adecuación de la cáscara de huevo, que es un desecho de la industria alimenticia. Una vez conseguidas las nanofibras, se esperaba estudiar su incidencia en las propiedades mecánicas y físicas de elementos cementicios delgados; De lo contrario, se propone una aplicación acorde a las características del material que se hubiese obtenido.

Este trabajo de grado fue apoyado y se encuentra en el marco del proyecto de investigación de convocatoria interna de la Universidad del Valle titulado “Aerogeles de nanosílice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles” Convocatoria interna para conformación del banco de proyectos de investigación-2016- convocatoria 3-2016 CI: 910, código de carpeta: 01, y se desarrolla bajo la dirección del profesor Silvio Delvasto Arjona, MSc., Ph.D del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle.



El conocimiento
es de todos

Colciencias



20191100034091

SG
Bogotá, D.C., 28-01-2019

Doctor
LUIS OMAR TORRADO MANTILLA
Gerente de Fideicomiso Fondo Caldas- COLCIENCIAS
FIDUPREVISORA S.A.
Calle 72 No. 10-03 Piso 8
Ciudad

REF. Solicitud Elaboración de Contrato de Financiamiento Recuperación Contingente MGI ID 5936, Convocatoria 808 de 2018.

Respetado Doctor:

De acuerdo con lo establecido en los Términos de Referencia de la Convocatoria No. 808 de 2018 y el banco definitivo de propuestas Elegibles, publicado mediante Resolución 1653 de 2018, solicitamos la elaboración del Contrato de Financiamiento de Recuperación Contingente, según los términos descritos a continuación:

No.	ID MGI	Entidad Beneficiaria	Aporte del Fondo	Supervisor
1	5936	UNIVERSIDAD DEL VALLE	337.371.000	Yesid Ojeda Papagayo – Asesor grado 06 de la Dirección de Fomento a la Investigación de Colciencias.

OBJETO DEL CONTRATO

En el memorando de solicitud de elaboración del contrato que se adjunta al Módulo de Gestión de Información – MGI, está establecido el objeto del contrato.

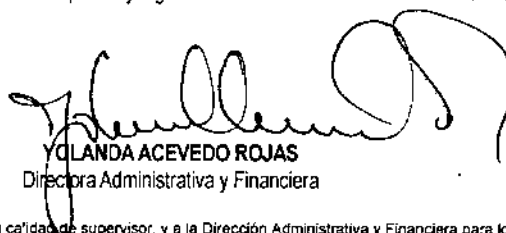
OBLIGACIONES DE LAS PARTES:

En el memorando de solicitud del contrato que se adjunta al Módulo de Gestión de Información – MGI, están establecidas las obligaciones de las partes.

Agradecemos su colaboración para que una vez elaborado el contrato, suscrito por todas las partes y legalizado sea remitido a la Secretaría General de Colciencias.

Atentamente,


OSCAR JAIRÓ FONSECA FONSECA
Secretario General


YOLANDA ACEVEDO ROJAS
Directora Administrativa y Financiera

Con copia a Yesid Ojeda Papagayo – Asesor grado 06 de la Dirección de Fomento a la Investigación de Colciencias en calidad de supervisor, y a la Dirección Administrativa y Financiera para lo de su competencia.
Revisó: IM Garavito / Paola Laverde.
Elaborado: EJ Dávila

Centro de contacto:

PBX: (57+1) 6258480, Ext. 2081
Línea gratuita nacional: 018000914446
Código postal: 111321

Av. Calle 26 N° 57-83
Torre 8. Piso 2 al 6
Bogotá D.C. Colombia

www.colciencias.gov.co

Colciencias





El conocimiento
es de todos

Colciencias

MEMORANDO



20193900008683

ID: 5936

PNCTeIING

Bogotá, D.C., 17-01-2019

PARA: OSCAR JAIR FONSECA FONSECA
Secretario General

DE: DIRECCIÓN DE FOMENTO A LA INVESTIGACIÓN

ASUNTO: SOLICITUD ELABORACION DE CONTRATO – PROYECTO CÓDIGO 110680863720

De acuerdo con los resultados de la convocatoria No. 808-2018 y el banco definitivo de proyectos financiados publicado mediante Resolución N° 1653 del 21 de diciembre de 2018, solicitamos la elaboración de un contrato según los términos descritos a continuación:

I. IDENTIFICACIÓN DE LA(S) ENTIDAD(ES) EJECUTORA(S), CO-EJECUTORAS Y/O BENEFICIARIAS DEL PROYECTO

EJECUTORA

Nombre de la entidad:	UNIVERSIDAD DEL VALLE
Nit de la entidad:	890399010-6
Nombre del representante legal:	EDGAR VARELA BARRIOS
Documento de identificación del representante legal:	CEDULA DE CIUDADANIA : 6.401.000
Dirección y ciudad de la entidad:	Calle 13 # 100-00 , CALI
Teléfono de la entidad:	2-3212100 ext. 2716-3250
FAX de la entidad:	

II. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Título:	Aerogeles síliceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en superaislamiento térmico de edificaciones
Código:	110680863720
Investigador principal:	Silvio Delvasto Arjona



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

III. OBJETO DEL CONTRATO

Otorgar apoyo económico a la entidad ejecutora en la modalidad de recuperación contingente, para la financiación del proyecto: Aerogeles síliceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en superaislamiento térmico de edificaciones código 110680863720.

Objetivo General

Desarrollar un proceso químico sostenible para la obtención de aerogeles nanoestructuradas a partir de la sílice contenida en la cascarilla de arroz (CA) y estudiar la aplicación de estas aerogeles en superaislamiento térmico y acústico de edificaciones.

Objetivos Específicos

1. Establecer la secuencia y parámetros de un proceso de obtención de silicato de sodio (SS) con un contenido de sílice y grado de alcalinidad apropiado para la elaboración de aerogeles síliceas utilizando cascarilla de arroz sin calcinar (CASC) y como precursor alterno la CA calcinada (CAC).
2. Diseñar y evaluar los parámetros de un proceso de obtención vía sol-gel de aerogeles síliceas hidrofóbicas considerando tres alternativas de extracción del solvente.
3. Definir el proceso y la aerogel sílicea más apropiada (ASA) con base en criterios de sostenibilidad y de calidad de las aerogeles.
4. Diseñar y probar materiales compuestos particulados con la incorporación de la aerogel sílicea (ASA) seleccionada para lograr elementos constructivos con superaislamiento térmico y acústico.

IV. COMPROMISOS - OBLIGACIONES DE LA ENTIDAD

LA ENTIDAD se obliga a desarrollar cabalmente el objetivo general, objetivos específicos del contrato, y lo establecido en el memorando de elaboración del contrato y, en especial a:

1. Cumplir de manera estricta con la entrega de los productos esperados e informes, dispuestos en la propuesta y memorando de elaboración del contrato, y debidamente aprobados por el supervisor con sus ajustes.
2. Designar como investigador principal a Silvio Delvasto Arjona y garantizar su disponibilidad para ejercer la dirección del proyecto. Si por algún motivo se requiere el cambio del investigador principal, éste debe ser solicitado por el representante legal de la ENTIDAD EJECUTORA, mediante comunicación escrita dirigida al supervisor del contrato, quien aprobará el cambio solicitado sin requerirse, para tal efecto, una modificación al contrato.
3. Aportar y obtener los recursos de contrapartida a que hace referencia la cláusula de recursos de contrapartida del presente contrato.
4. Aplicar los recursos del apoyo económico exclusivamente a las actividades del proyecto, en las cuantías y para los rubros aprobados, y solicitar autorización previa al supervisor del contrato para el traslado de recursos de un rubro a otro, que exceda del treinta por ciento (30%) del rubro de destino en el presupuesto aprobado.



Únicamente podrán someter a evaluación tres (3) solicitudes de cambio de rubro durante el tiempo de ejecución del proyecto. Se aclara que cada solicitud puede incluir varios cambios de rubro sin que estos comprometan los resultados esperados.

5. Garantizar la dedicación de todos los investigadores y demás personal a las labores del proyecto de acuerdo con lo definido en la propuesta, respetando los términos de referencia de la convocatoria.
6. Garantizar que el Investigador Principal verifique que la hojas de vida del personal que se contrate con recursos financiados estén diligenciadas y actualizadas en CvLAC. Además, mantener los perfiles, la dedicación, asignación mensual y tiempo de vinculación que se aprobaron para el desarrollo del proyecto.
7. Presentar para la aprobación del supervisor del contrato un primer informe de avance técnico y financiero en el mes DOCE (12), un segundo informe de avance técnico y financiero en el mes VEINTICUATRO (24) y un Informe Final Técnico y Financiero en el mes TREINTA Y SEIS (36), el cual deberá cumplir con los productos esperados especificados en el Memorando de Solicitud de Elaboración de Contrato. Los informes deben ser radicados en medio físicos y medio magnéticos en COLCIENCIAS.
8. Adoptar criterios de eficiencia, transparencia y economía en la adquisición de bienes o servicios con destino al proyecto, cumpliendo los términos de referencia de la convocatoria.
9. Utilizar durante el plazo del presente contrato los bienes adquiridos con recursos del apoyo económico exclusivamente para los fines relacionados con la ejecución de este contrato.
10. Llevar un sistema de contabilidad con los soportes exigidos por la normatividad vigente, que permita verificar el movimiento de los recursos del apoyo económico.
11. Proporcionar toda la información que le sea solicitada por Colciencias, supervisor del contrato, LA FIDUCIARIA o por los organismos de control del Estado en relación con el proyecto.
12. Dar cumplimiento a las disposiciones vigentes en materia de manejo ambiental y obtener los permisos y licencias correspondientes por parte de las autoridades competentes, si a ello hubiere lugar.
13. Destacar en toda publicación, actividad o material divulgativo relacionado con el proyecto y su ejecución, que éste se financia con recursos provenientes del PATRIMONIO AUTONOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
14. Dar cumplimiento a sus obligaciones con los sistemas de salud, riesgos profesionales, pensiones y aportes parafiscales a que hubiere lugar, de acuerdo con las normas legales vigentes aplicables en la materia.
15. Comunicar oportunamente al supervisor del contrato cualquier cambio de su domicilio.



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

16. Disponer los recursos necesarios para el mantenimiento eficiente de los equipos financiados con recursos del proyecto; operarlos y mantenerlos de acuerdo con las normas técnicas generalmente aceptadas.
17. Permitir durante el plazo del proyecto y tres (3) años más, el uso de los equipos adquiridos con recursos del apoyo económico a Grupos de Investigación, Centros e institutos de desarrollo tecnológico e Innovación, quienes deberán elevar solicitud por escrito a Colciencias y a la entidad responsable a efectos de obtener la autorización correspondiente.
18. Garantizar que los honorarios o bonificaciones especiales de personal de nómina de tiempo completo de entidades públicas o privadas vinculadas al proyecto no sean financiadas con recursos del PATRIMONIO AUTONOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGIA Y LA INNOVACION, FRANCISCO JOSE DE CALDAS.
19. Suscribir los documentos a que haya lugar para la liquidación y/o acta de cierre contable y financiero del contrato.
20. Cumplir con las actividades de transferencia de resultados a la comunidad científica.
21. Las demás obligaciones inherentes a la naturaleza y objeto del presente contrato.
22. Para los fines relacionados con las normas referentes al control y prevención del Riesgo de Lavado de Activos y de la Financiación del terrorismo, contenidas en la circular Básica Jurídica emitida por la Superintendencia Bancaria (Hoy Superintendencia Financiera de Colombia) y las demás que en el futuro la adicionen o modifiquen, LA ENTIDAD EJECUTORA se obliga a entregar información veraz y verificable, y a actualizar sus datos por los menos anualmente, suministrando la totalidad de los soportes documentales e información exigidos por LA FIDUCIARIA al momento de la vinculación y durante el desarrollo del presente contrato.

V. COMPROMISOS - OBLIGACIONES DE COLCIENCIAS

1. Otorgar apoyo económico a la ENTIDAD en la modalidad de recuperación contingente, para la financiación del objeto del presente proyecto.
2. Efectuar los desembolsos del apoyo económico de acuerdo con lo consignado en el numeral XI Desembolsos, "del presente documento"
3. Efectuar la supervisión del contrato a través de la gestión administrativa, técnica y financiera requerida para el cumplimiento del objeto contractual.
4. Las demás que por la naturaleza del presente contrato le correspondan y que garanticen su cabal y oportuna ejecución.

VI. COMPROMISOS - OBLIGACIONES DEL FONDO

1. Girar los recursos financieros necesarios, con destino a LA ENTIDAD EJECUTORA, en ejecución del presente contrato, de acuerdo con las instrucciones de COLCIENCIAS.



2. Suministrar la información que respecto a la inversión y ejecución de los recursos le solicite COLCIENCIAS.
3. Adelantar los trámites para lograr el cierre financiero y contable del contrato, previa instrucción de COLCIENCIAS.

VII. PRODUCTOS ESPERADOS

Generación de Nuevo Conocimiento

Subtipo Producto	Producto	Descripción	Cantidad	Beneficiario
Artículo de investigación	Artículos categoría A1 PUBLICADO O ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN.	1 artículo publicado o aceptado para publicación en una revista de categoría A1.	1	Comunidad científica, Universidad y País
Artículo de investigación	Artículos categoría A2 PUBLICADO O ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN.	1 artículo publicado o aceptado para publicación en una revista de categoría A2	1	Comunidad científica, Universidad y País
Artículo de investigación	Artículos categoría A1 y A2	Artículos de investigación sometidos en revistas de categoría A1 y A2.	2	Comunidad científica, Universidad y País
Producto tecnológico patentado o en proceso de solicitud de patente	Patentes de invención o modelos de utilidad solicitados o en proceso de concesión	Proceso de obtención rápido de aerogeles	1	Comunidad científica, Universidad y País

Desarrollo Tecnológico e Innovación

Subtipo Producto	Producto	Descripción	Cantidad	Beneficiario
Consultorías e informes técnicos finales	Informes técnicos realizados en el marco del proyecto	Se presentará un informe de avance anual y un informe final del proyecto	3	Grupo de investigación Investigadores Universidad del Valle Colciencias



**El conocimiento
es de todos** Colciencias

Apropiación Social del Conocimiento

Subtipo Producto	Producto	Descripción	Cantidad	Beneficiario
Ponencias	Ponencias	Presentación en eventos nacionales e internacionales.	10	Comunidad científica, Universidad, País, Estudiantes
Productos de apropiación social del conocimiento	REALIZACIÓN DE CURSOS DE CAPACITACIÓN, SEMINARIOS Y TALLERES	Seminario de apropiación social del conocimiento	1	Académicos, Estudiantes, Profesionales, Sector de la Construcción, Productores de arroz
Productos de apropiación social del conocimiento	EVENTOS CIENTÍFICOS	Congreso o coloquio internacional sobre Materiales Verdes	1	Comunidad científica Región Pais Medio académico Sector industrial El ambiente

Formación del Recurso Humano

Subtipo Producto	Producto	Descripción	Cantidad	Beneficiario
Estudiante de doctorado	Formación de estudiantes de doctorado	Estudiante de Ingeniería de Materiales que realizará su investigación de trabajo de grado	1	Estudiante, Comunidad científica, Universidad, País
Estudiante de doctorado	Vinculación de estudiantes de doctorado	Participara activamente en la investigación, culminando sus tesis doctorales	2	Estudiante, Comunidad científica, Universidad, País
Estudiante de maestría	Formación de estudiantes de maestría	Participara activa en la investigación, culminando su tesis de maestría en el marco del proyecto	1	Estudiante, Comunidad científica, Universidad, País
Estudiante de pregrado	Vinculación de estudiantes de pregrado	Asistencia en el proceso	2	Estudiante, Comunidad científica, Universidad, País



El conocimiento
es de todos

Colciencias

Subtipo Producto	Producto	Descripción	Cantidad	Beneficiario
Estudiante de pregrado	Vinculación de estudiantes de pregrado	Desarrollo de trabajo de grado	8	Estudiante, Comunidad científica, Universidad, País

VIII. DURACIÓN DEL CONTRATO, LEGALIZACIÓN, INICIO DE EJECUCIÓN Y DESEMBOLSOS:

Duración del Contrato: 36 meses a partir de la fecha del desembolso.

Requisitos de Perfeccionamiento y Legalización del Contrato: A partir de la suscripción de las partes.

Inicio de Ejecución: A partir de la fecha del primer desembolso.

Desembolsos: El Fondo Francisco José de Caldas otorga apoyo económico por la suma de ~~TRESCIENTOS TREINTA Y SIETE MILLONES TRESIENTOS SETENTA Y UN MIL PESOS (\$337.374.000,00)~~ de acuerdo con el Certificado de Disponibilidad de Recursos ~~CDR N° 13858~~, los cuales serán girados a UNIVERSIDAD DEL VALLE, en Dos (2) desembolsos de la siguiente manera: un primer desembolso por valor DOSCIENTOS TREINTA Y SEIS MILLONES CIENTO CINCUENTA Y NUEVE MIL SETECIENTOS PESOS (\$236.159.700,00), equivalente al 70%, al cumplirse los requisitos de perfeccionamiento y legalización del contrato y una vez la Entidad Ejecutora entregue la documentación requerida para este desembolso; y un segundo desembolso se hará por CIENTO UN MILLONES DOSCIENTOS ONCE MIL TRESCIENTOS PESOS (\$101.211.300,00), equivalente al 30%, a la entrega a satisfacción del primer informe de avance de ejecución técnica y financiera al Supervisor Técnico.



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

IX. CONDICIONES DE FINANCIAMIENTO

Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación

RUBRO	FINANCIADO	CONTRAPARTIDA		VALOR TOTAL
	COLCIENCIAS	UNIVERSIDAD DEL VALLE		
	RECUPERACIÓN CONTINGENTE	EFFECTIVO	ESPECIE	
APOYO A FORMACIÓN DOCTORAL	\$ 108.000.000,00	\$ -	\$ -	\$ 108.000.000,00
BIBLIOGRAFIA	\$ -	\$ -	\$ 6.000.000,00	\$ 6.000.000,00
EQUIPOS	\$ 79.500.000,00	\$ 28.000.000,00	\$ 167.500.000,00	\$ 275.000.000,00
EVENTOS ACADÉMICOS	\$ 2.500.000,00	\$ -	\$ -	\$ 2.500.000,00
GASTOS DE OPERACIÓN	\$ 22.071.000,00	\$ -	\$ -	\$ 22.071.000,00
MATERIALES E INSUMOS	\$ 34.000.000,00	\$ -	\$ 3.000.000,00	\$ 37.000.000,00
PERSONAL CIENTÍFICO	\$ -	\$ -	\$ 256.000.000,00	\$ 256.000.000,00
PERSONAL DE APOYO	\$ 36.000.000,00	\$ -	\$ -	\$ 36.000.000,00
PUBLICACIONES Y PATENTES	\$ 4.000.000,00	\$ -	\$ -	\$ 4.000.000,00
SERVICIOS TÉCNICOS	\$ 33.800.000,00	\$ -	\$ -	\$ 33.800.000,00
VIAJES	\$ 17.500.000,00	\$ 2.000.000,00	\$ -	\$ 19.500.000,00
SUBTOTAL	\$ 337.371.000,00	\$ 30.000.000,00	\$ 432.500.000,00	\$ 799.871.000,00
SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN	\$ 10.121.130,00	\$ -	\$ -	\$ 10.121.130,00
TOTAL	\$ 347.492.130,00	\$ 30.000.000,00	\$ 432.500.000,00	\$ 809.992.130,00

*El porcentaje del rubro Seguimiento y Evaluación está estipulado en el Componente Presupuestal de los términos de referencia de la Convocatoria 808-2018



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

Apoyo económico Fondo Francisco José de Caldas	\$ 337.371.000,00
Seguimiento y evaluación	\$ 10.121.130,00
Contrapartida	
UNIVERSIDAD DEL VALLE	\$ 462.500.000,00
COSTO TOTAL DEL CONTRATO	\$ 809.992.130,00

X. FUENTE DE LOS RECURSOS

Fondo Francisco José de Caldas, Convenio 317-2018, correspondiente al CDR N° 13858-2019.

XI. DESEMBOLSOS

DESEMBOLSOS				
NÚMERO	MES Y/O CONDICIÓN	ENTIDAD	PORCENTAJE	MONTO
1	Al cumplirse los requisitos de perfeccionamiento y legalización del contrato y una vez la UNIVERSIDAD DEL VALLE entregue la documentación requerida para este desembolso.	UNIVERSIDAD DEL VALLE	70%	\$236.159.700,00
2	MES DOCE (12) Contra entrega a satisfacción del número informe de avance técnico y financiero.	UNIVERSIDAD DEL VALLE	30%	\$101.211.300,00
TOTAL			100%	\$337.371.000,00

XII. INFORMES

NÚMERO	INFORMES	MES
1	INFORME FINAL TÉCNICO Y FINANCIERO	12
2	INFORME DE AVANCE TÉCNICO Y FINANCIERO	24
3	INFORME FINAL TÉCNICO Y FINANCIERO	36



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

XIII. SUPERVISOR

Yesid Ojeda Papagayo – Asesor Código-1020, Grado 06 con funciones de la Dirección de Fomento a la Investigación.

XIV. LUGAR DE EJECUCIÓN

CALI

XV. INFORMACIÓN DEL CONTACTO

Datos	UNIVERSIDAD DEL VALLE		CONTACTO COLCIENCIAS	SUPERVISOR
Cargo	Profesional, Vicerrectoría de Investigaciones	Investigador Principal	Profesional Especializado Programa Nacional de CTel en Ingeniería	Asesor, Dirección de Fomento a la Investigación
Nombre	Luz Piedad Arrigui	Silvio Delvasto Arjona	Ivone Andrea Otálora Guerrero	Yesid Ojeda Papagayo
Email	luz.arrigui@correounivalle.edu.co	silvio.delvasto@correounivalle.edu.co	iaotalora@colciencias.gov.co	yojeda@colciencias.gov.co
Teléfono	3212100 EXT. 2716	3212100	Tel: 6258480 Ext:6104	Tel: 6258480 Ext:4800

XVI. CONDICIONES ADICIONALES

1. Este contrato se suscribirá únicamente con la entidad ejecutora (aplica cuando hay entidades co-ejecutoras).
2. El proyecto registrado en el SIGP, el memorando de elaboración del contrato y los términos de referencia de la convocatoria hacen parte integral del contrato.
3. Las solicitudes de prórroga al contrato deben realizarse con mínimo tres (3) meses de antelación a la fecha de finalización del contrato.
4. Los productos y entregables comprometidos se validarán y reconocerán únicamente para este proyecto, así esos productos o entregables tengan participación parcial de otros proyectos.



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

5. El suscrito Director Técnico certifica que los recursos para la celebración de este contrato NO provienen de Regalías.

NOTA: Los recursos para el financiamiento del proyecto por parte de COLCIENCIAS se encuentran disponibles en el FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN, FRANCISCO JOSE DE CALDAS. Los rubros de costos operativos y de seguimiento y evaluación no podrán superar en su etapa de ejecución el porcentaje establecido en términos de referencia de la convocatoria.

Firmado por,

EDUARDO ROJAS PINEDA

Director de Fomento a la Investigación

YESID OJEDA PAPAGAYO

Asesor Dirección de Fomento a la Investigación



El conocimiento
es de todos

CERTIFICADO DE DISPONIBILIDAD DE RECURSOS CDR Derivado Nro. 13858 - 2019

De acuerdo con lo solicitado en el sistema MGI, con fecha 11/01/2019, se expide el siguiente CDR Derivado:

1. ORIGEN DE LOS RECURSOS

CONVOCATORIA	Nro. Conv. Retos	Año 2018	Fecha Finalización de la convocatoria
	País 2018		31/10/2018
CONVENIO DE APOORTE	Nro. 317		Año 2018
FECHA	Día 26	Mes 1	Año 2023
VENCIMIENTO DEL CONVENIO			
SUBCUENTA	SUBCUENTA: 1. Apoyo Financiero a Actividades de Generación de Conocimiento DETALLE: 1.1. Programas y Proyectos de Investigación COD. AREA: 300 DESC. AREA: DIRECCION DE FOMENTO A LA INVESTIGACION DESC. FUENTE: 317-2018 RETOS PAIS 2018		

2. DIRECCION SOLICITANTE

Dirección de Fomento a la Investigación

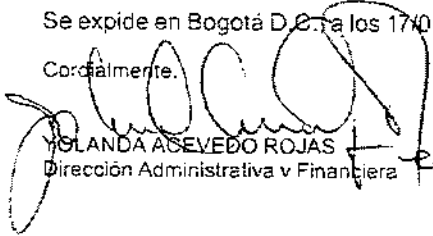
3. PROGRAMA, PROYECTO O ACTIVIDAD A FINANCIAR

CODIGO	PROGRAMA, PROYECTO, ACTIVIDAD	ENTIDAD BENEFICIARIA	FECHA ESTIMADA FINALIZACION DEL PROYECTO	VALOR DE LA DISPONIBILIDAD DEL CERTIFICADO (\$)
110680863720	Aerogeles síliceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en superaislamiento térmico de edificaciones	UNIVERSIDAD DEL VALLE	23/03/2022	5337.371.000-00

4. OBSERVACIONES

Se expide en Bogotá D.C. a los 17/01/2019

Cordialmente,


YOLANDA ACEVEDO ROJAS
Dirección Administrativa y Financiera


18 Enero 2019



**El conocimiento
es de todos**

Colciencias

RESOLUCION No. **1653** DE 2018

21 DIC. 2018

"POR LA CUAL SE MODIFICA EL LISTADO DE BANCO DE FINANCIABLES DE LA CONVOCATORIA 808 Y SE PUBLICA EL BANCO ADICIONAL DE PROPUESTAS FINANCIABLES"

**LA SUBDIRECTORA GENERAL DEL DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA,
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN – COLCIENCIAS**

La Subdirectora General del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-COLCIENCIAS, en uso de sus facultades constitucionales y legales en especial las conferidas en la Ley 1286 de 2009, la Resolución No. 0023 de 2018 modificada mediante Resolución 596 de 2018 y el Decreto 1694 de 2018 y en atención a los siguientes:

CONSIDERANDOS

Que mediante la Resolución No.0254 del 16 de marzo de 2018 el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS ordenó la apertura de la Convocatoria No.808 de 2018 para proyectos de ciencia, tecnología e innovación y su contribución a los retos de país.

Que mediante la Resolución No.1355 del 07 de noviembre de 2018 el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, publicó el Banco Definitivo de Propuestas Elegibles de la Convocatoria No. 808 de 2018.

Que mediante Resolución 1536 del 13 de diciembre de 2018 el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, publicó el Banco de Financiables de la Convocatoria No. 808 de 2018.

Que el listado del Banco de Financiables está elaborado acorde con lo establecido en el numeral 13 de los Términos de Referencia.

Que la Dirección de Fomento a la Investigación de Colciencias solicitó mediante radicado No.20184200479183 del 20 de diciembre la publicación del Banco Adicional de Financiables de la Convocatoria No.808 de 2018, teniendo en cuenta la consecución de recursos adicionales provenientes del Fondo de Investigaciones en Salud – FIS. De esta manera, el comité Técnico del FIS en reunión realizada el día 19 de diciembre de 2018 realizó la revisión de los proyectos declarados como elegibles en el marco de la convocatoria 808-2018 que no alcanzaron a financiación, tomando la decisión de financiar los proyectos código: 64514, 64544, 63020 y 64199, los cuales se encuentran incluidos en el banco definitivo de proyectos elegibles, se alinean con áreas en Ciencias Médicas de la Salud priorizadas por el Ministerio de Salud, y suman un monto de financiación por valor de \$1.073.239.870.

Que teniendo en cuenta que el Banco de Financiables de la convocatoria se encuentra vigente, se requiere realizar las modificaciones necesarias al Banco y la publicación del banco adicional.

Que en mérito de lo expuesto,



El conocimiento
es de todos

Colciencias

RESOLUCION No. 1053 DE 2018

"POR LA CUAL SE MODIFICA EL LISTADO DE BANCO DE FINANCIABLES DE LA CONVOCATORIA 808 Y PUBLICA EL BANCO ADICIONAL DE PROPUESTAS FINANCIABLES"

RESUELVE

ARTÍCULO PRIMERO: Modificar el listado de Banco de Financiáveis de la Convocatoria No.808 de 2018 y publicar los Banco adicionales de Financiáveis para las modalidades de Maestría Nacional y Doctorado Exterior.

ARTÍCULO SEGUNDO: Comuníquese a los beneficiados las instrucciones, condiciones y documentación requerida para suscribir el convenio o legalización del crédito según corresponda.

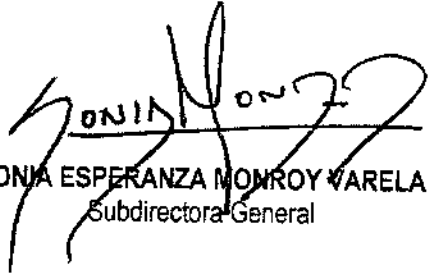
ARTÍCULO TERCERO: Hace parte integral de la presente resolución el documento anexo con el Banco adicional de Financiáveis de la Convocatoria No.808 de 2018.

ARTÍCULO CUARTO: La presente resolución rige a partir de la fecha de su expedición y será publicada en la página Web de COLCIENCIAS, www.colciencias.gov.co

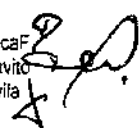
PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

21 DIC. 2018

Dada en Bogotá D.C. a los


SONIA ESPERANZA MONROY VARELA
Subdirectora General

VoBo OJ Fonseca
Revisó: IM Garavito
Elaboró: EJ Dávila



Lugar on el banco	Código Registro	Cumplimiento de requisitos					Cumple	Condiciones		Resultados de la evaluación				Puntaje Final	Observaciones del desempeño	Elegible preliminar	Se presentaron anotaciones a la publicación de los preliminarios de elegibles que modifican el monto de propuestas elegibles	Elegible definitivo	Recursos anticipados a Colecciones	Financiable
		R1	R2	R3	R4	R5		Habilidad	Inhabilitado	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4							
35	84253	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		65.00	10.00	20.00	1.00	86.00	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 241,226,000.00	NO
36	83468	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		55.00	10.00	20.00	1.00	86.00	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 241,736,880.00	NO
37	84527	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.00	10.00	19.00	5.00	86.00	Criterio 3	SI	NO	SI	\$ 239,984,850.00	NO
38	84599	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.50	8.50	18.00	10.00	88.50	Criterio 3	SI	NO	SI	\$ 348,806,540.00	NO
39	84614	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		58.00	9.00	15.50	5.00	87.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,782,200.00	NO
40	84600	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		82.00	8.50	20.00	5.00	89.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 242,900,000.00	NO
41	83952	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.50	8.50	18.50	10.00	87.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 277,829,235.00	NO
42	84748	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		56.00	9.00	19.00	1.00	89.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,135,212.00	NO
43	84100	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		55.00	10.00	19.00	1.00	86.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,831,400.00	NO
44	83916	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.00	9.50	17.50	10.00	85.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,880,091.00	NO
45	83293	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.00	9.50	18.00	5.00	84.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 205,772,370.00	NO
46	83818	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		60.50	10.00	19.00	5.00	84.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,484,065.00	NO
47	84130	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.50	8.00	17.00	10.00	84.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 313,999,311.00	NO
48	83434	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.90	8.50	20.00	10.00	83.50		SI	NO	SI	\$ 327,510,258.00	NO
49	83510	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		62.00	10.00	20.00	1.00	83.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 234,840,000.00	NO
50	84291	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		60.00	9.00	18.00	5.00	83.00	Criterio 3	SI	NO	SI	\$ 240,257,880.00	NO
51	84547	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.00	8.50	18.50	5.00	83.00	Criterio 3	SI	NO	SI	\$ 241,580,320.00	NO
52	84764	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.50	8.50	20.00	5.00	83.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,350,234.00	NO
53	83607	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		40.00	8.50	18.00	10.00	82.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,046,400.00	NO
54	84676	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	8.50	19.00	10.00	82.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 234,373,494.00	NO
55	84104	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		55.50	5.00	10.50	10.00	82.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 313,919,430.00	NO
56	84350	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		64.50	7.50	15.00	5.00	82.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 227,138,690.00	NO
57	84170	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.00	10.00	18.00	5.00	82.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,886,113.00	NO
58	84899	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		53.00	9.50	14.00	5.00	81.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,686,533.00	NO
59	84233	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.50	9.00	19.00	1.00	81.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 238,646,004.00	NO
60	83667	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.50	9.00	19.00	1.00	81.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 241,944,813.00	NO
61	84038	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		81.50	10.00	19.00	1.00	81.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 134,511,900.00	NO
62	83295	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		51.50	10.00	19.00	1.00	81.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 241,868,544.00	NO
63	84119	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		51.00	9.50	20.00	1.00	81.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,899,993.00	NO
64	83845	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.50	10.00	20.00	1.00	81.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,888,097.00	NO
65	83993	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.00	8.00	18.00	5.00	81.00	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 241,997,833.00	NO
66	84013	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.00	10.00	20.00	1.00	81.00	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 241,882,344.00	NO
67	84482	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.50	7.00	18.50	5.00	81.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,741,000.00	NO
68	83098	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.00	7.00	20.00	6.00	81.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,979,162.00	NO
69	84836	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		62.00	9.00	8.50	10.00	80.50	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 238,753,697.00	NO
70	84127	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.00	8.50	19.00	1.00	80.50	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 241,994,792.00	NO
71	84240	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		51.50	8.50	19.50	1.00	80.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 240,331,271.00	NO
72	82989	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		56.00	9.00	14.00	1.00	80.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,885,671.00	NO
73	84318	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		47.50	9.50	13.00	10.00	80.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,751,950.00	NO
74	84449	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		47.00	9.00	14.00	10.00	80.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 200,912,830.00	NO
75	83350	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		53.00	7.00	18.50	1.00	79.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 242,000,000.00	NO
76	84749	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.50	9.00	20.00	1.00	79.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,999,909.00	NO
77	82877	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.00	8.00	20.00	1.00	79.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,913,383.00	NO
78	84480	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	10.00	19.00	5.00	79.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,859,600.00	NO
79	83882	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	8.50	14.00	10.00	78.50	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 343,414,380.00	NO
80	84491	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	8.50	20.00	5.00	78.50	Criterio 4	SI	NO	SI	\$ 313,988,279.00	NO
81	83557	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.50	8.50	18.00	1.00	78.00		SI	NO	SI	\$ 241,941,897.00	NO
82	84625	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.50	7.50	13.00	10.00	76.00		SI	NO	SI	\$ 348,859,755.00	NO
83	84713	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.00	6.00	18.50	1.00	75.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,722,254.00	NO
84	84511	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.00	8.50	18.00	1.00	75.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 150,305,294.00	NO
85	84514	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		47.50	8.00	10.00	1.00	75.50	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 239,343,160.00	SI
86	84542	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.50	7.50	18.00	1.00	75.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,782,200.00	NO
87	83033	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		47.00	7.00	16.00	5.00	75.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,910,950.00	NO
88	84131	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.50	8.50	19.00	1.00	75.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,535,000.00	NO
89	84831	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	9.00	20.00	1.00	75.00	Criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,994,377.00	NO

Lugar en el banco	Código Registro	Cumplimiento de requisitos					Cumple	Condiciones		Resultados de la evaluación				Puntaje Final	Observaciones del desempeño	Elegible preliminar	Se presentarán observaciones a la producción de banco preliminar de elegibles que modifiquen el banco de propuestas elegibles	Elegible definitivo	Recursos solicitados a Colciencias	Financiable
		R1	R2	R3	R4	R5		Habilitado	Inhabilitado	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4							
EJE 3. AGREGACIÓN DE VALOR A RECURSOS RENOVABLES Y NO RENOVABLES																				
Lugar en el banco	Código Registro	Cumplimiento de requisitos					Cumple	Condiciones		Resultados de la evaluación				Puntaje Final	Observaciones del desempeño	Elegible preliminar	Se presentarán observaciones a la producción de banco preliminar de elegibles que modifiquen el banco de propuestas elegibles	Elegible definitivo	Recursos solicitados a Colciencias	Financiable
		R1	R2	R3	R4	R5		Habilitado	Inhabilitado	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4							
1	63720	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		68.50	9.50	18.00	10.00	97.00		SI	NO	SI	\$ 347,482,130.00	SI
2	62940	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		58.33	9.67	20.00	10.00	96.00		SI	NO	SI	\$ 242,000,000.00	SI
3	63462	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		54.00	9.54	18.00	10.00	92.54		SI	NO	SI	\$ 241,910,950.00	SI
4	63881	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.00	10.00	18.00	10.00	92.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 310,758,028.00	SI
5	64505	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		63.66	9.45	19.00	10.00	92.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 238,946,534.00	SI
6	63604	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		83.50	9.00	19.00	10.00	91.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 348,999,999.00	SI
7	63096	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.50	9.00	20.00	10.00	91.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,916,750.00	SI
8	63763	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		65.00	7.00	19.00	10.00	91.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,952,801.00	SI
9	64255	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		64.60	9.80	17.00	10.00	90.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 195,071,700.00	SI
10	64094	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		60.50	10.00	20.00	10.00	90.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,885,000.00	SI
11	64296	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		63.00	9.00	18.00	10.00	90.00		SI	NO	SI	\$ 337,858,419.00	SI
12	64591	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		62.29	9.43	18.00	10.00	89.72		SI	NO	SI	\$ 310,782,500.00	SI
13	63381	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		51.00	9.50	19.00	10.00	89.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,971,855.00	SI
14	64807	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.50	10.00	19.00	10.00	89.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,999,999.00	SI
15	63981	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		51.60	8.50	19.00	10.00	89.00		SI	NO	SI	\$ 312,919,253.00	SI
16	63997	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.60	9.50	19.00	10.00	88.00		SI	NO	SI	\$ 349,950,985.00	SI
17	64729	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		66.78	10.00	20.00	1.00	87.78		SI	NO	SI	\$ 239,816,860.00	SI
18	63426	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.35	9.00	19.00	10.00	87.35		SI	NO	SI	\$ 326,277,360.00	SI
19	63424	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		67.50	9.50	19.00	1.00	87.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,955,739.00	SI
20	62830	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		56.50	9.50	20.00	1.00	87.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,989,127.00	SI
21	63338	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		54.00	10.00	18.00	5.00	87.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,921,971.00	SI
22	64185	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.00	9.00	20.00	10.00	87.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 313,989,311.00	SI
23	64765	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.00	0.50	19.00	10.00	86.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 349,988,358.00	SI
24	63567	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.00	8.50	19.00	10.00	86.50	Orden de inscripción	SI	NO	SI	\$ 241,541,208.00	SI
25	64498	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		63.50	8.50	19.00	5.00	86.00		SI	NO	SI	\$ 229,764,288.00	SI
26	63560	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.67	10.00	18.00	5.00	85.67	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,999,944.00	SI
27	64546	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.67	10.00	20.00	10.00	85.67	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,806,540.00	SI
28	64258	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		62.00	9.50	19.00	5.00	85.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,921,971.00	SI
29	64892	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		64.00	9.00	17.00	5.00	85.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,910,103.00	SI
30	64120	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		53.00	9.00	18.00	5.00	85.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 230,118,480.00	SI
31	64528	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.00	9.00	19.00	5.00	85.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,782,200.00	SI
32	63294	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		60.50	9.50	20.00	5.00	85.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 230,176,429.00	SI
33	63414	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.33	9.33	20.00	10.00	84.66		SI	NO	SI	\$ 277,949,620.00	NO
34	62944	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		61.60	10.00	18.00	5.00	84.60		SI	NO	SI	\$ 241,064,163.00	NO
35	64544	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		54.22	9.56	19.00	1.00	83.78		SI	NO	SI	\$ 242,000,000.00	SI
36	63885	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		56.00	8.50	18.00	1.00	83.60		SI	NO	SI	\$ 241,809,680.00	NO
37	64426	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		53.50	8.50	19.00	1.00	83.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,899,118.00	NO
38	64184	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		50.50	8.50	19.00	5.00	83.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,833,825.00	NO
39	64702	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		49.50	9.00	17.50	10.00	83.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 349,577,303.00	NO
40	64078	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	8.00	20.00	10.00	83.00	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,778,108.00	NO
41	64559	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		62.00	10.00	19.00	1.00	82.00		SI	NO	SI	\$ 217,754,004.00	NO
42	63438	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.00	8.83	20.00	1.00	81.83		SI	NO	SI	\$ 241,876,121.00	NO
43	63451	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		61.67	9.00	20.00	1.00	81.67		SI	NO	SI	\$ 241,810,950.00	NO
44	64254	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		52.50	9.00	19.00	1.00	81.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,161,522.00	SI
45	64693	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.00	8.50	20.00	5.00	81.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 242,000,000.00	NO
46	63892	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		45.00	8.50	18.00	10.00	81.50	criterio 1	SI	NO	SI	\$ 241,032,678.00	NO
47	63007	SI	SI	SI	SI	SI	SI	X		48.40	8.80	19.00	5.00	81.20		SI	NO	SI	\$ 241,766,390.00	NO

2/6

CONSTANCIA
ESTUDIANTES ADSCRITOS A PROGRAMAS DE POSGRADO
DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

La Coordinación de Posgrados de la Escuela de Ingeniería de Materiales, hace constar que los siguientes estudiantes han estado adscritos a los programas de Posgrados de la siguiente manera:

JUAN DAVID PARDO ESTRADA

CÓD. 201402788

PROGRAMA: 7717 MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN ING. DE MATERIALES

ESTADO: Realizó y sustentó su tesis de Maestría el 26 de febrero de 2019.

MICHAEL ANDRÉS GOMEZ RIVERA

CÓD. 201703420

PROGRAMA: 9704 DOCTORADO EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN ING. DE MATERIALES

ESTADO: Estuvo matriculado en el programa desde el periodo AGOSTO – DICIEMBRE 2017 al periodo FEBRERO – JUNIO 2018

JOHN ALEXANDER TORRES LEÓN

CÓD. 201700021

PROGRAMA: 9704 DOCTORADO EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN ING. DE MATERIALES

ESTADO: Estudiante ACTIVO del programa, se encuentra matriculado desde el periodo FEBRERO-JUNIO 2017 al periodo FEBRERO-JUNIO 2019

GUSTAVO ADOLFO ACEVEDO ZAPATA

CÓD. 201802802

PROGRAMA: 7717 MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN ING. DE MATERIALES

ESTADO: Estudiante ACTIVO del programa, se encuentra matriculado desde el periodo FEBRERO-JUNIO 2018 al periodo FEBRERO-JUNIO 2019

ELIANA RODRIGUEZ CABRERA

CÓD. 201605012

PROGRAMA: 7717 MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÉNFASIS EN ING. DE MATERIALES

ESTADO: Estuvo matriculada en el programa en el periodo (1) AGOSTO – DICIEMBRE 2016.

Fue joven investigadora durante el semestre cursado en el programa de maestría.

**ESTE DOCUMENTO SE REALIZA A LOS 26 DÍAS DEL MES DE JUNIO DE 2019
A SOLICITUD DE LOS INTERESADOS.**

Firma el Coordinador de Posgrados



JULIO CESAR CAICEDO

Escuela de Ingeniería de Materiales

De requerir algún documento soporte, por favor remitirse a la oficina de Posgrados de la EIMAT al correo posgrados.eimat@correounivalle.edu.co.

**EL SUSCRITO DIRECTOR DEL PROGRAMA ACADEMICO DE
INGENIERIA DE MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

NIT: 890399010-6

INFORMA:

Que el profesor, SILVIO DELVASTO ARJONA, dirigió el Trabajo de Grado de los estudiantes, DAVID STEVEN CALAMBAS GALVIS y LAURA MARCELA BERNAL MEDAGLIA, titulado **“UTILIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE HUEVO COMO MATERIAL BASE EN LA SÍNTESIS DE WHISKERS DE CARBONATO DE CALCIO POR SOL-GEL”**, el cual se llevo a cabo en el marco del Proyecto 2910 de la Convocatoria interna VRI 3-2016 “aerogeles de nanosílice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles” y finalizo en Agosto de 2018.

Para constancia de la presente, se firma en Cali a los Veintiseis (26) dias del mes de Junio de 2019.

Cordialmente,



FERNANDO FRANCO ARENAS
Director
Programa Académico de Ingeniería de Materiales