

Mortero a Base de Geopolímero Utilizando Residuos de Aluminio y de Arroz

Castaneda Chinchilla, Mario Eduardo; López Daura, Rodrigo Antonio; Portillo Padilla, Manuel Josué y Méndez de Hasbun, Mary Patrice.

Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Departamento de Mecánica Estructural, El Salvador.

pdhasbun@uca.edu.sv

Abstract—En esta investigación se estudió la elaboración de un geopolímero a través de lodos de aluminio y ceniza de cascarilla de arroz. Los lodos procedieron de los residuos generados en ALDECA en el proceso de limpieza de dados utilizados en la elaboración de perfiles de aluminio a partir de lingotes de aluminio sólidos. Los lodos se utilizaron como fuente de aluminio y como activador alcalino, debido a su contenido de hidróxido de sodio. Como fuente de silicio se utilizó ceniza de cascarilla de Arroz procedente de la Arrocera San Francisco. La investigación se enfocó en determinar la factibilidad del uso de mortero a base de geopolímero como un sustituto en campo de mortero a base de cemento Portland. Se evaluaron las propiedades mecánicas de mezclas de geopolímero con relaciones molares Si:Al de 2, 3, 3.5 y 4. Se añadió agua a las mezclas hasta satisfacer el parámetro de fluidez conforme a la norma ASTM C 1437-15, el cual se utilizó como el criterio de aceptación. Se elaboraron especímenes cúbicos de 5x5x5cm según la norma ASTM C 109-16. El proceso de geopolimerización se realizó ingresando los especímenes frescos a un horno a 60° C durante 24 h. Posteriormente, los cubos se curaron en agua hasta sus respectivas edades de ensayo. Se realizaron ensayos a compresión a 1, 3, 7, 14 y 28 días con base en la norma ASTM C 109-16. Los resultados mostraron la incidencia en las resistencias a compresión de las relaciones molares Si:Al y de las cantidades de agua en las mezclas. La relación molar Si:Al de 3, con una resistencia última de 74.99 kg/cm², requirió menor cantidad de agua que la relación Si:Al de 4, con una resistencia última de 11.40 kg/cm², para cumplir con el criterio de trabajabilidad.

Palabras clave—Geopolímero, residuos de aluminio, ceniza de cascarilla de arroz, mortero a base de geopolímero.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aluminio comprende uno de los metales más importantes debido a su amplia variedad de aplicaciones, de las cuales muchas son indispensables para la vida moderna [1]. En El Salvador, en el año 2016 se anodizaron aproximadamente 3,400 toneladas métricas de aluminio en ALDECA, a partir de lo cual se generó una igual cantidad de residuos [2]. Estos desechos deben disponerse de manera segura, lo cual representa un costo económico para la empresa y un problema medioambiental para el país. Debido a lo anterior, resulta importante buscar vías que permitan el aprovechamiento de este tipo de residuos. Una aplicación importante de los desechos de aluminio se encuentra en la fabricación de geopolímeros.

Por definición, los geopolímeros son “una clase de materiales sólidos sintetizados por la reacción de aluminosilicatos con una solución alcalina” [3] con propiedades cementicias. Las soluciones alcalinas, o activadores alcalinos,

pueden obtenerse de cualquier tipo de hidróxido metálico. Los aluminosilicatos pueden obtenerse directamente, de fuentes naturales o artificiales, o indirectamente, mezclando una fuente de aluminio con una fuente de sílice. En el marco de la sostenibilidad, diversas investigaciones han evaluado fuentes artificiales directas e indirectas para la fabricación de geopolímeros a partir de residuos industriales. Así, por ejemplo, se han utilizado como fuentes directas cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín, puzolana y residuos de ladrillos [4-9]. Otras investigaciones han elaborado aluminosilicatos a partir de alúmina residual [11], lodos de anodizado de aluminio [2], metacaolín y ceniza volante [10] mezclados con fuentes de sílice como ceniza volante [10], ceniza de cascarilla de arroz [2] y desecho de sílice [11].

Los geopolímeros también buscan dar solución a otro problema ambiental importante: la fabricación de cemento. En el amplio uso del cemento en la construcción no se ha considerado por completo su impacto en el medio ambiente; la producción anual del cemento Portland ordinario, u “OPC” por sus siglas en inglés, es de 1.56 billones de toneladas de las cuales por cada tonelada producida se liberan a la atmósfera 800 kg de CO₂ [12].

Según Joseph Davidovits, el químico francés quien introdujo el concepto de geopolímeros, debido al agotamiento de grandes cantidades de recursos naturales y a la alta huella de carbono detrás de la producción de cemento Portland ordinario, es importante el desarrollo de cementantes alternativos que puedan sustituirle [13].

La presente investigación tiene por objetivo determinar la factibilidad del uso de mezclas de mortero a base de geopolímeros como sustituto de morteros fabricados a partir de cemento Portland, utilizando lodos residuales procedentes del proceso de limpieza de dados de la empresa ALDECA junto con desechos de ceniza de cascarilla de arroz de la Arrocera San Francisco.

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

La metodología de esta investigación partió de la obtención de los componentes del geopolímero, es decir los lodos, la ceniza y la arena, cada uno de los cuales fue caracterizado. Los lodos se caracterizaron a través de un balance de materia de la zona de procesos, a partir del cual se determinó su contenido de aluminio, de hidróxido de sodio y de agua. La ceniza se caracterizó con base en bibliografía. A la arena se le realizó un ensayo de impurezas orgánicas según la norma ASTM C 40-04, un ensayo de lavado de finos con base en la norma ASTM C 117-17, un análisis granulométrico bajo la norma ASTM C 136-14, y un ensayo de densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción conforme a la norma ASTM C 128-15.

Para las mezclas de mortero a base de geopolímero, el mezclado se llevó a cabo según la norma ASTM C 305-14, los

ensayos de fluidez para cada una con base en la norma ASTM C 1437-15 y el moldeado de los especímenes conforme a la norma ASTM C 109-16. La geopolimerización se llevó a cabo a 60 °C durante 24 h en un horno de convección. Los especímenes se curaron en agua hasta sus edades de ensayo. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a compresión según la norma ASTM C 109-16 a 1, 3, 7, 14 y 28 días.

A. Caracterización de los lodos.

1) *Balace de Materia:* El balance de materia fue realizado para caracterizar los lodos generados en el área de limpieza de dados de la empresa ALDECA. A partir de este, se obtuvo la cantidad de hidróxido de sodio, agua y aluminio presente en los lodos a la salida del proceso.

La cantidad de agua se determinó considerando que el nivel del líquido permaneció constante por un sistema de control externo. Al medir la altura, el ancho y la profundidad de los niveles indicados en la pila pudo obtenerse el volumen de agua global según se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Medición de las dimensiones de la pila.

La cantidad de aluminio presente en los lodos se calculó como la diferencia entre la masa de dados sucios y la masa de aluminio recuperado más la masa de dados limpios.

La medición de hidróxido de sodio residual y de alúmina presente en los lodos se realizó como un análisis complementario al balance de materia, empleando dos muestras recolectadas en la pila, una agitada y otra sin agitar. De esta manera, el análisis fue ejecutado en las instalaciones de la planta y la determinación se llevó a cabo por medio de una titulación con ácido clorhídrico y fluoruro de potasio como agente complejante, como se indica en la Fig. 2.



Fig. 2. Sistema de titulación empleado en la planta.

2) *Medición de pH en los lodos:* La medición del pH de los lodos se realizó in situ en las instalaciones de la universidad para seleccionar con mayor cuidado los materiales en los que se prepararían las mezclas y para tener un indicador sobre la basicidad del efluente. Para ello, se ocupó como indicador papel pH marca Neutralit con una escala del 5.5 al 9.0.

3) *Medición de densidad de los lodos:* La determinación de la densidad de los lodos se realizó registrando el peso de un volumen de muestra.

4) *Cálculo de la fracción de agua en los lodos:* La fracción de agua en los lodos se define como la masa de agua dividida entre la masa total de lodos húmedos.

5) *Cálculo de la fracción de lodo seco:* La fracción de lodo seco en la mezcla húmeda hace alusión al cociente entre la masa del lodo seco y la masa total húmeda. En tal sentido, la fracción de lodos secos se obtuvo como la unidad menos la fracción de agua en el lodo.

6) *Cálculo de la relación molar NaOH:H₂O:* A partir de la concentración de NaOH conocido a partir del balance de materia se determinaron los moles de NaOH. Por otra parte, los moles de agua se calcularon a partir de la masa de agua, obtenida a través del balance de materia. La relación molar NaOH:H₂O en los lodos se determinó a partir de la división de los moles de agua de NaOH y de agua.

7) *Cálculo de la concentración molar de NaOH:* A partir del volumen de agua resultante del balance de materia y de los moles de NaOH calculados en el aparatado anterior, la molaridad de hidróxido de sodio se calculó dividiendo los moles de soluto, es decir de NaOH, entre los litros de solución, es decir los 750 l de lodo.

B. Preparación de los lodos.

Se agitó vigorosamente el lodo dentro del bidón y luego se vertió en cinco pyrex. Se ingresaron los pyrex con las muestras de lodo al horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas.

C. Preparación y caracterización de la ceniza.

1) *Calcinación y molienda de la ceniza:* La obtención de la sílice a partir de la ceniza de cascarilla de arroz requirió inicialmente de un proceso de calcinación que permitiera disminuir el contenido de carbón en el material, posteriormente, de uno de molienda para llevar el tamaño de las partículas a uno similar al del cemento. El proceso de calcinación se realizó a través de una mufla analógica marca Thermolyne, la cual se programó para alcanzar y mantener una temperatura de 750 °C. La molienda de la ceniza se realizó a través de un molino de bola marca Norton, comprendido por un recipiente cerámico cilíndrico con pequeñas bolas en su interior.

2) *Determinación de la densidad de la ceniza:* La densidad aparente de la ceniza se determinó a partir del peso para un volumen de 100 ml.

D. Caracterización de la arena.

La arena utilizada en este trabajo fue proporcionada por la empresa ALDECA proveniente del banco de préstamo del río Las Cañas en la zona de Bosques del Río.

1) *Determinación de impurezas orgánicas:* Las impurezas orgánicas del agregado se determinaron conforme a la norma ASTM C 40-04.

2) *Limpieza del agregado:* La limpieza del agregado fino se realizó conforme a la norma ASTM C 117-17. Una muestra se utilizó para el análisis granulométrico realizado según la norma ASTM C 136-14.

3) *Análisis granulométrico:* El análisis granulométrico se realizó conforme a lo establecido por la norma ASTM C 136-14. A partir del análisis granulométrico se estableció el módulo de finura del agregado.

4) *Densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino:* El agregado fino se ensayó según la norma ASTM C 128-15 con el fin de determinar su densidad aparente, la cual es representativa de las condiciones en campo, conocer su gravedad específica y cuantificar su porcentaje de absorción.

E. Geopolímero.

1) *Cálculo de las proporciones de los componentes:* Las proporciones de los componentes en cada mezcla se determinaron a partir de una masa conocida de ceniza calcinada, para la cual se asumió un porcentaje másico de sílice de 85% con base en la literatura; la relación molar Si:Al deseada; la concentración de aluminio en los lodos; y un factor másico de arena según se esquematiza en la Fig. 3.

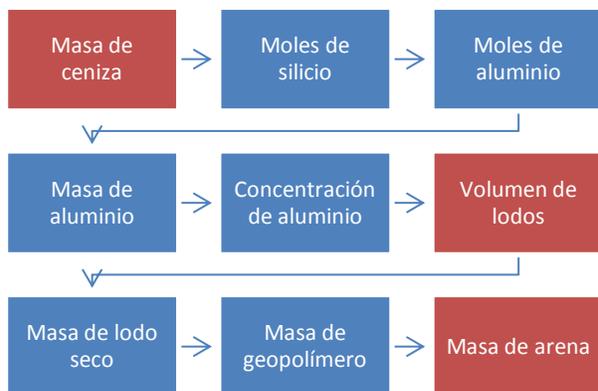


Fig. 3. Procedimiento para el cálculo de las dosificaciones del geopolímero.

2) *Modificación de la relación NaOH:H₂O:* La relación molar NaOH:H₂O inicial de los lodos se modificó únicamente para lograr en la mezcla una trabajabilidad adecuada

según la norma ASTM C 1437-15, es decir este parámetro no representó una variable de control.

3) *Fabricación, mezclado del geopolímero, moldeado, curado y ensayos de resistencia a la compresión:* En la Tabla 1 se resume el proceso de elaboración de los geopolímeros.

TABLA 1
ENSAYOS REALIZADOS SOBRE EL GEOPOLÍMERO FRESCO Y ENDURECIDO

Componente	Ensayo	Norma	Propósito del ensayo	Número de Ensayos
Geopolímero (Fresco)	Mezclado mecánico	ASTM C 305-14	Mezclar mecánicamente la mezcla de mortero	Según número de bachadas y corridas
	Fluidez	ASTM C 1437-15	Determinar si la trabajabilidad de la mezcla permita su fácil manejo para la colocación de bloques	Según número de bachadas y corridas
Geopolímero (Fresco)	Moldeado	ASTM C 109-16	Compactar la mezcla fresca para eliminar vacíos	15 por corrida
Geopolímero (Endurecido)	Resistencia a compresión	ASTM C 109-16	Establecer la resistencia mecánica de la mezcla endurecida a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días	15 por corrida

Inicialmente, para tratar de homogeneizar la muestra de lodo utilizada estos se mezclaron manualmente durante un periodo de cinco minutos. El mezclado del mortero se realizó con base en la norma ASTM C 305-14. La aceptación de cada mezcla se hizo con base en el criterio de fluidez establecido por la norma ASTM C 1437-15, una vez satisfecho dicho parámetro, el moldeado de los especímenes se llevó a cabo conforme la norma ASTM C 109-16. El proceso de geopolimerización se realizó en un horno a 60 °C durante 24 horas. Posteriormente, los especímenes se curaron en agua hasta sus edades de ensayo. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14 y 28 días.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. Caracterización de los lodos.

1) *Balance de Materia:* A partir del balance de materia, se determinaron las propiedades de lodo según se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2
PROPIEDADES DEL LODO

Parámetro	Valor
Agua (kg)	639.36
Cantidad de alúmina (g/l)	125.46
Hidróxido de sodio libre (g/l)	141.70

2) *Medición de pH en los lodos:* Niveles altos de pH permiten una disolución más rápida del aluminosilicato y una reacción de geopolimerización más acelerada [14-16]. Un rango de pH óptimo para la activación de escorias vítreas de alto horno se encuentra entre 13 y 13.6 [16]. Los silicatos de sodio tienen, por lo general, un pH entre 10.9 y 13.5 [14]. Con base en lo anterior, se observa que el nivel de pH en los lodos es bajo según los criterios establecidos en investigaciones anteriores.

3) *Medición de densidad de los lodos:* La masa registrada para un volumen de 1.75 l de lodos fue de 2.54 kg, a partir de lo cual se obtiene una densidad de 1.45 g/cm³.

4) *Cálculo de la fracción de agua en los lodos:* Se obtuvo una fracción de agua en los lodos de 58.80%.

5) *Cálculo de la fracción de lodo seco:* Para una fracción de agua en los lodos de 58.80%, se obtuvo una fracción seca respectiva de 41.20%.

6) *Cálculo de la relación molar NaOH:H₂O:* A partir de los moles de sodio y de agua, se obtuvo una relación molar NaOH:H₂O en los lodos de 0.0748. Equivalente a una relación molar H₂O:NaOH de 13.3689. Esta relación no representó una variable de control y se alteró únicamente para lograr la fluidez de 110 ± 5%, requerida por la norma ASTM C 1437 para moteros.

7) *Cálculo de la concentración molar de NaOH:* Con base en el volumen total de lodos, de 750 L, y en los 2,656.88 moles de hidróxido de sodio, se obtuvo una concentración molar de NaOH de 3.54 M.

B. Preparación de los lodos.

A diferencia de la investigación previa [2], donde tras secar lodo del proceso de anodizado de aluminio en un pyrex dentro de un horno a 115 °C durante 24 horas se obtuvo un material completamente seco y de aspecto blanco y uniforme, el lodo utilizado en la presente investigación nunca logró tal condición según se muestra en la Fig. 4. Debido a los resultados anteriores, se descartó por completo el secado de los lodos al horno y se decidió trabajarlos en forma líquida en la elaboración del geopolímero.

C. Preparación y caracterización de la ceniza.

1) *Calcinación y molienda de la ceniza:* Al calcinar ceniza de cascarilla de arroz se obtiene una ceniza con un alto contenido de sílice, de aproximadamente 87 a 97% [17], lo cual mejora su calidad [18]. Lo anterior puede verificarse visualmente, donde una ceniza con color gris indicará un alto contenido de sílice mientras que una de color negro indicará que aún existe un alto porcentaje de carbón en la muestra [2].

Con el proceso de molienda, el tamaño de partículas se logró disminuir considerablemente. Moler la ceniza aumenta la concentración de sílice, aumenta su nivel de reactividad y, como resultado, se logran geopolímeros con mejores propiedades mecánicas [18].



Fig. 4. Muestras de lodo secadas a 110 °C durante 60 horas y dejadas al aire libre posteriormente.

2) *Determinación de la densidad de la ceniza:* Para un volumen de 60 ml y una masa de 41.02 g, se obtuvo una densidad aparente de 0.68 g/cm³.

D. Caracterización de la arena.

1) *Determinación de impurezas orgánicas:* Según lo establecido por la norma ASTM C 40-04, un color más oscuro al número 3 podría contener impurezas orgánicas perjudiciales y deberían realizarse ensayos adicionales antes de aprobar el agregado para una mezcla de concreto o mortero. Lo anterior indica que la arena utilizada presentó un nivel de materia orgánica aceptable según se muestra en la Fig. 5.

2) *Análisis granulométrico:* En la Fig. 6 se presenta la curva granulométrica obtenida para el agregado fino. Se obtuvo un porcentaje de error en el ensayo de 0.02%, lo cual es satisfactorio según lo establecido por el apartado 8.7 de la norma ASTM C 136-16. Se calculó un módulo de finura de 2.99, el cual corresponde a una arena gruesa [19].



Fig. 5. Color de la solución de hidróxido de sodio en ensayo de impurezas orgánicas.

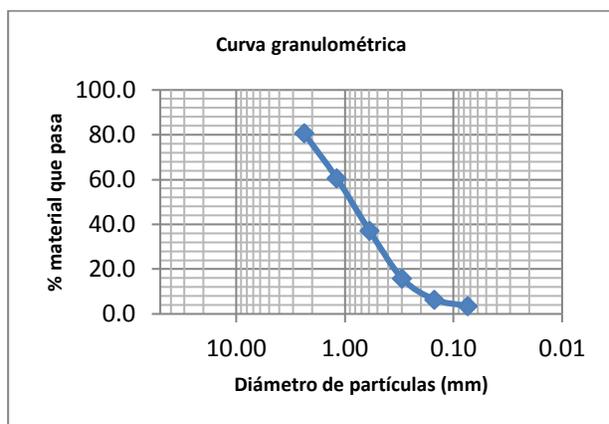


Fig. 6. Curva granulométrica del agregado fino utilizado en la fabricación de los geopolímeros.

3) *Densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino:* Conforme a la norma ASTM C 128-15, se obtuvo para la arena una densidad aparente de 2.55 g/cm^3 y un porcentaje de absorción de 3.10%.

La densidad aparente de los agregados para mortero o concreto influyen en la densidad y, por tanto, en la resistencia de los productos terminados [20-21]. Es recomendable que la densidad del agregado fino en una mezcla de mortero se encuentre dentro de un rango de 2.30 y 2.80 g/cm^3 [19]. Por lo general, buenos valores de densidad se encontrarán por encima de 2.25 g/cm^3 [21]. Debido a lo anterior, se observa que el valor de 2.55 g/cm^3 obtenido a través del ensayo gravimétrico representa un valor satisfactorio.

E. Geopolímero.

1) *Cálculo de las proporciones de los componentes:* Las proporciones de los componentes de cada mezcla se muestran en la Tabla 3.

2) *Ajustes en metodología a través del desarrollo de corridas para la fabricación de geopolímero:* Entiéndase corrida como la elaboración de una serie de cubos de mortero a base de geopolímero fabricados en un mismo día a partir de una o más batchadas con una misma relación molar Si:Al e igual proporción de materiales. En la Tabla 4 se muestra, de manera resumida, los cambios generales más significativos realizados entre las seis diferentes corridas ejecutadas en esta investigación.

Al evaluarse una relación molar Si:Al de 2, se obtuvo una mezcla demasiado fluida. Se añadió arena, llegándose a un factor másico de 3.05, con el fin de incrementar el porcentaje de fluidez de la mezcla; sin embargo, esto dio como resultado especímenes arenosos con baja resistencia. La temperatura de geopolimerización a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ también mostró ser insatisfactoria debido a la deformación sufrida por los especímenes según se muestra en la Fig. 7. Los especímenes además experimentaron eflorescencia según se muestra en la Fig. 8, fenómeno ocasionado por la reacción entre NaOH con el CO_2 del aire, lo cual indicó un exceso de hidróxido de sodio. A partir de lo anterior, se evaluó una relación molar Si:Al de 3 con un factor

másico de arena de 2 y una temperatura de geopolimerización a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Se añadió agua hasta alcanzar la trabajabilidad requerida según la norma ASTM C 1437-15. También se optó, para las corridas a partir de la segunda, implementar una junta entre los moldes y los especímenes utilizando papel para hornear como se muestra en la Fig. 9. En la sexta corrida no se buscó satisfacer el criterio de trabajabilidad para replicar la relación molar $\text{H}_2\text{O}:\text{NaOH}$ de la segunda corrida.

TABLA 3
PROPORCIONES DE LOS COMPONENTES EN LAS DISTINTAS CORRIDAS DE GEOPOLÍMERO

	Corrida					
	1	2	3	4	5	6
m_{ceniza} (g)	1,051.00	1,541.21	750.00	1,050.00	800.00	850.00
Rel. molar Si:Al	2	3A	3.5	4	3B	3C
V_{lodos} (ml)	1,774.84	1,735.11	723.74	886.58	900.65	956.94
m_{arena} (g)	6,123.13	4,954.38	2,280.82	3,056.50	2,571.68	2,732.4
Agua (ml)	0.00	100.00	120.00	590.00	70.00	55.14

TABLA 4
AJUSTES REALIZADOS ENTRE CORRIDAS

Parámetro	Corrida					
	1	2	3	4	5	6
Relación molar Si:Al	2	3	3.5	4	3	3
Factor másico de arena	3.05	2				
Lavado de finos de la arena	No	Sí				
Temperatura y tiempo de geopolimerización	80 °C, 3 horas	60 °C, 24 horas				
Moldeado usando papel para hornear	No	No	Sí			
Trabajabilidad	Sí					No



Fig. 7. Expansión hacia arriba de los especímenes secados a $80 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fig. 8. Eflorescencia desarrollada por especímenes con relación molar Si:Al de 2.



Fig. 9. Colocación de papel para hornear en moldes previo al moldeo de los especímenes.

3) *Relaciones molares $H_2O:NaOH$ modificadas:* En la Tabla 5 se presentan las relaciones molares $H_2O:NaOH$ modificadas en las distintas corridas de geopolímero.

TABLA 5
RELACIONES MOLARES $H_2O:NaOH$ MODIFICADAS

Corrida	Relación molar Si:Al	Relación molar $H_2O:NaOH$
1	2	13.3520
2	3A	14.2548
3	3.5	15.9492
4	4	23.7761
5	3B	14.5694
6	3C	14.2546

A partir de dichos datos se observó que mayores relaciones molares Si:Al requirieron mayores cantidades de agua para alcanzar la trabajabilidad requerida (ver Fig. 10). En una investigación se demostró que para mezclas con un mismo contenido de NaOH, incrementos en la cantidad de agua resultaron en resistencias menores [21].

A partir de lo anterior, se puede inferir que al incrementar el contenido de agua manteniéndose constante la concentración de NaOH la alcalinidad en el activador disminuye y las reacciones se vuelven menos eficientes. Considerando que mayores relaciones molares Si:Al habrían requerido mayores concentraciones de NaOH pero que al añadir más agua en proporción para alcanzar las fluideces requeridas sin agregar hidróxido de sodio se generó el efecto contrario, puede deducirse que se lograron niveles de geopolimerización menores en estas mezclas.

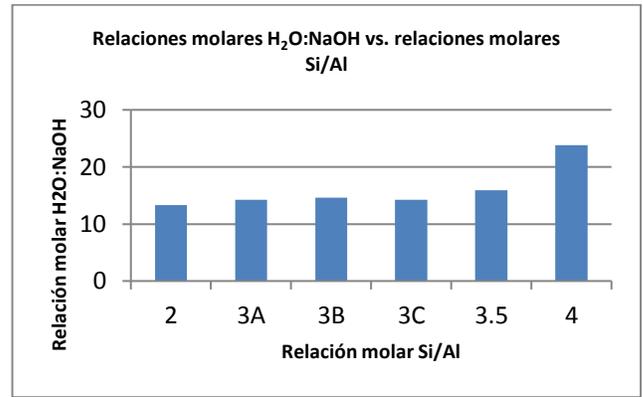


Fig. 10. Relaciones molares $H_2O:NaOH$ vs. relaciones molares Si/Al.

4) *Ensayos de Fluides:* Los valores de fluidez de las distintas corridas se presentan en la Tabla 6 junto con sus respectivas relaciones molares $H_2O:NaOH$. Al considerar las relaciones molares $H_2O:NaOH$ de las corridas 2 y 6, ambas con una relación molar Si:Al de 3 e igual proporción de ceniza, arena y agua, y comparar los valores de fluidez obtenidos, se observa que no fue posible lograr homogeneidad en las muestras de lodo utilizadas.

TABLA 6
VALORES DE FLUIDEZ OBTENIDOS EN LAS DISTINTAS CORRIDAS DE GEOPOLÍMERO

Corrida	Relación molar Si:Al	Fluidez (%)
1	2	110
2	3A	112
3	3.5	108
4	4	111
5	3B	109
6	3C	83

4) *Densidades promedio de los especímenes:*

A partir de la gráfica mostrada en la Fig. 11, se observa una tendencia que a mayor relación Si:Al menor densidad. Lo anterior resulta congruente al tomar en cuenta que una mayor relación molar implica una mayor cantidad de ceniza y menores cantidades de lodo y arena, cuyas densidades son mayores a las de la ceniza. Cabe notar, de igual manera, que por lo general la edad no tuvo impacto significativo en la densidad de los cubos en ninguna de las relaciones molares.

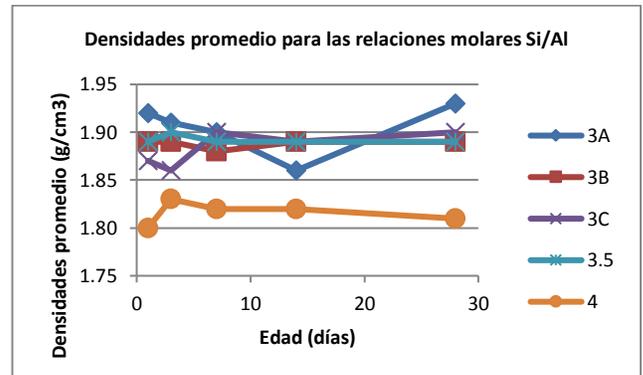


Fig. 11. Densidades promedio para las relaciones molares Si:Al a distintas edades de ensayo.

5) *Resistencias a compresión:* Sobre la base de la Fig. 12, se tiene que la relación molar Si:Al óptima estuvo dada por un valor de 3. No obstante, al comparar el desempeño mecánico de las relaciones molares 3A, 3B y 3C, donde para distintas muestras de lodos se obtuvieron densidades diferentes, se corrobora que la composición química no fue la misma en dichas muestras. Lo anterior implica que las concentraciones de alúmina, NaOH y agua en los lodos fueron distintas en cada corrida, resultando en reacciones de geopolimerización diferentes. Este efecto se evidencia en particular en la relación molar 3C para la cual se habrían esperado resistencias similares a las de la relación molar 3A debido a que se replicaron las proporciones de materiales; sin embargo, estas resultaron incluso menores a las de 3B, para la cual se añadió una cantidad de agua mayor en proporción. Cabe notar que en ninguno de los casos se alcanzó una resistencia mayor a 175 kg/cm², correspondiente a morteros para mampostería tipo M según la norma ASTM C 270-14.

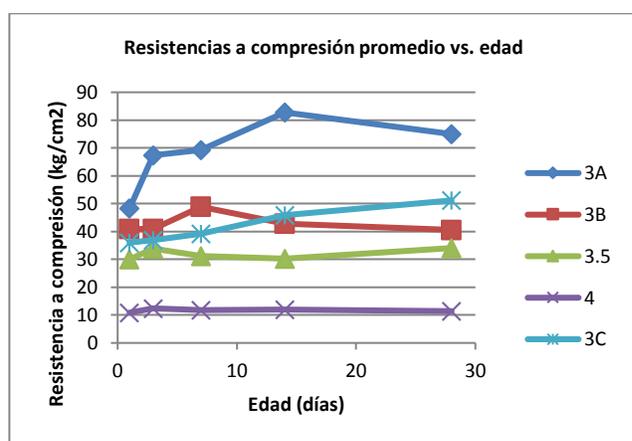


Fig. 12. Resistencias a compresión promedio vs. edad de las distintas relaciones molares Si:Al.

En la Tabla 7 se presentan las resistencias últimas promedio y sus valores respectivos de desviación estándar y coeficiente de variación. En el caso de la relación Si:Al 3A, la mayor dispersión de datos se atribuye a la metodología de moldeado, para la cual no se había contemplado aún el uso de papel para hornear, lo cual pudo haber dañado internamente los especímenes debido a la dificultad que presentaron para ser desmoldados y alterado sus propiedades mecánicas.

TABLA 7
RESISTENCIAS ÚLTIMAS PROMEDIO, DESVIACIONES ESTÁNDAR Y COEFICIENTES DE VARIACIÓN

Relación Si:Al	fm última promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)	Coficiente de variación (%)
3A	74.99	19.31	25.75
3B	40.58	4.78	11.78
3C	51.16	2.93	5.73
3.5	34.06	1.63	4.79
4	11.40	0.39	3.42

Adicionalmente, es importante considerar que tal y como se expuso en el apartado 3), debido a las mayores cantidades de agua añadidas a las relaciones molares Si:Al de 3.5 y 4 para alcanzar las fluideces requeridas y, por tanto, a la disminución en la concentración de NaOH, los niveles de

geopolimerización en estas mezclas fueron más débiles y existió una mayor proporción de partículas sin reaccionar. Esto se observa al demostrar que mayores relaciones molares teóricas H₂O:NaOH resultaron en menores resistencias últimas como se ilustra en la Fig. 13.

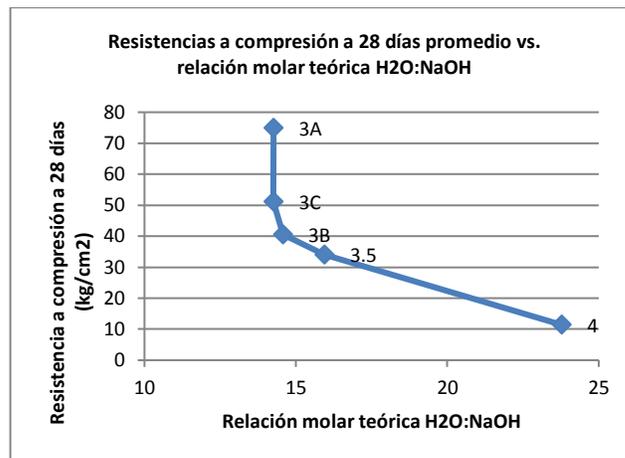


Fig. 13. Resistencias a compresión últimas vs. relaciones molares H₂O:NaOH.

IV. CONCLUSIONES.

Las relaciones molares Si:Al y el criterio de trabajabilidad en las mezclas tuvieron una incidencia directa en las resistencias a compresión en los geopolímeros. Mayores relaciones Si:Al requirieron mayores cantidades de agua para alcanzar la fluidez requerida y al no añadirse hidróxido de sodio adicional se incrementaron las relaciones molares H₂O:NaOH, es decir, se disminuyó la alcalinidad de los lodos, incurriendo en procesos de geopolimerización menos eficientes y resistencias menores. Esto se comprobó al observar que en el caso de la relación molar Si:Al de 4, para la cual se tuvo una relación molar H₂O:NaOH de 23.7761, se obtuvo una resistencia última de 11.40 kg/cm². Por otra parte, para relación molar Si:Al de 3.5 se obtuvo una resistencia última de 34.06 kg/cm² bajo una relación molar H₂O:NaOH de 15.9492. Finalmente, en el caso de las relaciones molares Si:Al de 3, se logró una resistencia última máxima de 74.99 kg/cm² con una relación molar H₂O:NaOH de 14.2548. A partir de lo anterior se concluye que la relación molar Si:Al óptima fue la de 3 ya que cumplió con el criterio de trabajabilidad y ofreció la mayor resistencia.

Adicionalmente, debido al alto volumen de los lodos proporcionados por ALDECA y a que su proceso de mezclado al inicio de cada corrida fue realizado de forma manual, no fue posible lograr homogeneidad en las distintas muestras de lodo. Lo anterior se evidencia al comparar las corridas 2 y 6, para las cuales se utilizó una misma relación molar Si:Al de 3 e igual proporción de ceniza, lodo, arena y agua como se muestra en la Tabla 3. En el caso de la segunda corrida se obtuvo una fluidez de 112% y una resistencia última de 74.99 kg/cm², mientras que en el caso de la sexta corrida se obtuvo una fluidez de 83% y una resistencia última de 51.16 kg/cm². Como consecuencia, se concluye que aún para una misma relación molar Si:Al se tuvieron geopolímeros con características químicas diferentes.

Asimismo, en cada proceso de limpieza de dados se producen lodos residuales con concentraciones diferentes de

aluminio e hidróxido de sodio libre. La cantidad de NaOH libre depende de la cantidad de aluminio disuelto en el lodo, el cual a su vez depende de la masa de dados sucios y de aluminio recuperado. Debido a que el aluminio y el hidróxido de sodio representan variables importantes en el comportamiento del geopolímero como material cementicio, es necesaria una caracterización previa de cada lodo procedente de este proceso para establecer dosificaciones en las mezclas de geopolímero que permitan reproducir sus propiedades físicas y mecánicas.

Por último, el proceso de geopolimerización, que implicó en la presente investigación un período de calentamiento a 60 °C durante 24 horas, hace que la fabricación del geopolímero in situ no sea posible para mezclas cementicias a base de este material tales como mortero, concreto, entre otras. Es por tal motivo que el geopolímero podría aprovecharse en el ámbito constructivo a nivel industrial en la fabricación de productos terminados como ladrillos, bloques o adoquines que únicamente requieren colocación en campo.

A partir de lo anterior, se recomienda que para reproducir geopolímeros con igual composición química, se establezca un proceso de caracterización de los lodos en la zona de proceso que permita dosificar mezclas con igual proporción de silicio, aluminio e hidróxido de sodio. También, debido a la cantidad de tiempo y de recursos necesarios en la preparación de la ceniza de cascarilla de arroz, se recomienda buscar una fuente alternativa. En cuanto a las relaciones molares Si:Al, se recomienda evaluar relaciones Si:Al entre aquella que produce un efecto de eflorescencia, es decir, una relación molar muy baja, y aquella a partir de la cual decrecen las resistencias para determinar la relación óptima. La temperatura de geopolimerización debe determinarse en el laboratorio partiendo de un valor de temperatura con base en bibliografía y observando cualquier dilatación en los especímenes u otro tipo de efectos indeseados. De igual forma, debido al efecto corrosivo del geopolímero, se recomienda la utilización de moldes de otro tipo de material que soporte temperaturas iguales o superiores a 60 °C. Por otra parte, como resultado del efecto adverso en la resistencia del geopolímero ocasionado por añadir agua en la mezcla, se recomienda evaluar el material en la fabricación de ladrillos. Finalmente, se recomienda ensayar a compresión, de ser posible, a 56 y 90 días para determinar con certeza el comportamiento del geopolímero a través del tiempo y verificar si la resistencia continúa variando respecto a la resistencia de 28 días.

REFERENCIAS

- [1] MENZIE, W.D., BARRY, J.J., BLEIWAS, D.I., BRAY, E.L., GOONAN, T.G., MATOS, G. (2010). The global flow of aluminum from 2006 through 2025. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1256.
- [2] GÓCHEZ, R., MENÉNDEZ, C., RIVERA, X. (2017). Aprovechamiento de lodos de anodizado en el desarrollo de geopolímeros. Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- [3] PROVIS, J., VAN DEVENTER, J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Boca Raton: CRC.
- [4] HARDJITO, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Trabajo de graduación para optar al título de Doctor en Filosofía en la Universidad de Tecnología de Curtin. Bentley, Australia.
- [5] CHENG, T.W., CHIU, J.P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16, 205-210.
- [6] NOORLIYANA, H., AL BAKRI, A., AZIRA, M., MARIAMADZILIZA, M.N., KAMROSNI, A.R., KAMARUDIN, H. (2013). Alkali Activated Blast-Furnace Slag Cement: The Opportunity to Solve Sustainable Issues. International Conference of Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2013), Bandung, Indonesia, 28-29 de Noviembre.
- [7] RAMANI, P., CHINNARAJ, P. (2015). Geopolymer Concrete with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash. *Gradevinar*, 67, 741-747.
- [8] ALLAHVERDI, A., NAJAF, E., YAZDANIPOUR, M. (2010). Effects of Blast-Furnace Slag on Neutral Pozzolan-Based Geopolymer Cement. *Ceramics – Silikaty*, 55, 68-78.
- [9] MÚNERA, J., MULFORD, A. (2015). Aprovechamiento de Desechos de Ladrillo para la Síntesis de Geopolímero. Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- [10] ONUTAI, S., JIEMSIRILERS, S., THAVORNITI, P., KOBOYASHI, T. (2015). Aluminum hydroxide waste based geopolymer composed of fly ash for sustainable cement materials. *Construction and Building Materials*, 101, 298-308.
- [11] CHAWAKITCHAREON, P., KINGTHONG, P. (2016). Utilization of Alumina Waste and Silica Waste for Geopolymer Production. *Engineering Journal*, 20, 52-57.
- [12] FITZPATRICK, K., HORSLEY, C., TSAKNOPOULOS, D., ZHANG, Y. (2015). *Geopolymer – The Green Cement*. Trabajo de graduación para aplicar al grado de Licenciado en Ciencias. Worcester, Massachusetts.
- [13] DAVIDOVITS, J. (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Francia: Institut Géopolymère
- [14] CHRISTIANSEN, M. (2013). An investigation of waste glass-based geopolymers supplemented with alumina. Trabajo de graduación para optar al título de Doctor de Filosofía en Ingeniería Civil, Michigan Technological University, Estados Unidos.
- [15] TORRES, M., PUERTAS, F. (2017). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32.
- [16] ARCOS, C., MACÍAZ, D., RODRÍGUEZ, J. (2007). La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 41, 7-20.
- [17] RODRÍGUEZ, E. (2009). Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante. Universidad Politécnica de Valencia.
- [18] GUTIÉRREZ, O. (2011). *Estudio para calibración de molinos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- [19] RIVERA, G. (s.f.). Agregados para mortero o concreto. *Concreto Simple*, Vol 1., 41-75.
- [20] CHAN, J., SOLÍS, R., MORENO, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 7 (2), 39-46.
- [21] DEGIRMENCI, N. (2017). Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on durability of geopolymer mortars containing natural and artificial pozzolans. *Ceramics-Silikaty*, 61, 340-350.