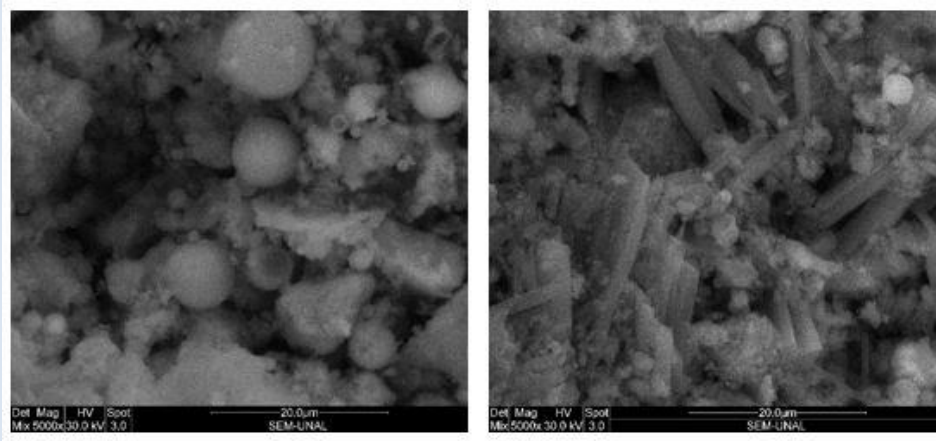


ACTIVACIÓN DE LAS PROPIEDADES CEMENTICIAS DE LA CENIZA VOLANTE MEDIANTE ELECTROMUTAGÉNESIS QUÍMICA

Juan Lizarazo-Marriaga*, Fredy García, Camilo Higuera

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

*e-mail: : jmlizarazom@unal.edu.co



RESUMEN

Teniendo en cuenta los problemas ambientales asociados con la producción del Cemento Portland (CP), en los últimos años se ha promovido el uso de la Ceniza Volante (CV) en la producción de concretos. La utilización de la CV se ha dado principalmente mediante su activación con el CP y como material cementante geopolimérico. En este artículo una tercera técnica de activación de la CV conocida como electromutagénesis es investigada. Esta consiste en la activación de la CV, a partir del ingreso de iones de una solución alcalina mediante la aplicación de un campo eléctrico a través del concreto endurecido. Como fuente de iones alcalinos se usaron soluciones de hidróxido de sodio/silicato de sodio con varias relaciones molares. Una vez terminado el tratamiento se evaluó la variación en la resistencia a la compresión, la velocidad de pulso ultrasónico y la microestructura de la matriz del concreto. Los resultados mostraron que los iones alcalinos migrados dentro del concreto reaccionaron con las partículas de CV mutando estas a nuevas fases, produciendo un aumento en sus propiedades.

Palabras Claves: Ceniza Volante, Activación Alcalina, Electroquímica, Electromutagenesis

CHEMICAL ELECTROMUTAGENIC ACTIVATION OF THE CEMENTITIOUS PROPERTIES OF FLY ASH

ABSTRACT

Taking into account the environmental problems associated with the production of Portland cement (PC), in recent years the use of Fly Ash (FA) in the production of concrete has been promoted. The use of fly ash has been possible through the activation with Portland cement and as a geopolymeric cementitious material. In this paper, a third activation technique for fly ash, known as electrometagenesis, was investigated. This treatment consists in the activation of fly ash after the migration of ions from an external alkaline solution, by applying an electric field across the hardened concrete. As a source of alkaline ions, solutions of sodium hydroxide and sodium silicate with various molar ratios were used. After finishing the treatment, the variation in the compressive strength, the ultrasound pulse, and the microstructure of concrete matrix were evaluated. Results showed that the alkaline ions migrated into the concrete matrix, reacted with fly ash, and mutated in new phases, producing an improvement in their physical properties.

Keywords: Fly Ash, Alkaline activation, Electrochemistry, electromutagenesis

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales asociados a la producción del cemento Portland normal (CP) son en la actualidad muy importantes. Se calcula que el CO₂ liberado durante la etapa de clinkerización es aproximadamente del orden de 0.8 a 0.9 Toneladas de CO₂ por cada Tonelada de CP; lo anterior se traduce en que la industria cementera genera alrededor del 7% del total de emisiones de CO₂ a nivel mundial [1] [2]. Debido a lo anterior y a la creciente demanda de concreto, las investigaciones en torno a materiales alternativos han aumentado en los últimos años. En este panorama de materiales alternativos al CP, aparecen las Cenizas Volantes (CV), las cuales son un sub-producto de la generación termoeléctrica [3].

La utilización de la CV se ha dado tradicionalmente mediante su activación con el CP, en la cual es frecuente encontrar porcentajes de remplazo que van desde el 10 hasta el 60%. Adicionalmente, en los últimos años se ha incrementado el uso de geopolímeros, en los cuales el aprovechamiento de la CV se realiza mediante la activación con una solución alcalina, a esto se conoce como “activación alcalina” y consiste en un proceso químico que permite la transformación de un material con una estructura parcial o totalmente amorfa, en compuestos cementantes compactos [4]. La CV, al ser un material sílico-aluminoso, reacciona en presencia de una solución que tenga una alta concentración de un hidróxido alcalino, produciendo con esta reacción un sólido alcalino sílico-aluminoso sintético, el cual de acuerdo a las características de los materiales y de los procesos usados, puede alcanzar características similares al CP [3] [5].

Entre los activantes químicos que mejor desempeño presentan sobresale la combinación Hidróxido de Sodio (NaOH) - Silicato de Sodio. El hidróxido de sodio genera la disolución en la ceniza volante de la alúmina (Al) y sílice (Si), las cuales constituyen los precursores principales de los compuestos que se producen en el proceso de hidratación del cemento. Durante la disolución, el silicato de sodio actúa como catalizador aumentando la velocidad de dicha reacción [3] [6]. El proceso de activación alcalina que se lleva a cabo en la CV, y en otros materiales Sílico-Aluminosos, es diferente del proceso de hidratación que se produce entre las partículas de CP y el agua, aunque es similar al proceso químico

llevado a cabo en la síntesis de Zeolitas [7].

Los tratamientos electroquímicos se basan en la electromigración, la cual puede definirse como el transporte de especies iónicas bajo la influencia de un campo eléctrico. En el concreto los iones deben moverse a través de un camino tortuoso definido por la interconexión de los poros del material, por lo que las ecuaciones del transporte se definen de manera similar a las de un medio poroso [8]. En la actualidad existen aplicaciones electroquímicas en estructuras de concreto reforzado, entre las cuales se encuentra la extracción electroquímica de cloruros (EEC), la cual busca mediante la aplicación de un campo eléctrico extraer los iones cloruro depositados cerca de las barras de refuerzo [9] [10]. Otras técnicas electroquímicas aplicadas en estructuras de concreto son la re-alkalinización electroquímica y la protección catódica.

Una técnica nueva de electromigración usada para mitigar daños y densificar matrices de concreto es la electrodeposición de nano-partículas de materiales puzolánicos dentro de los poros capilares del concreto [11] [12]. Mediante la aplicación de una corriente eléctrica entre el acero de refuerzo (Cátodo) y un electrodo externo (Ánodo), es posible generar la electrodeposición de materiales que sirvan como barrera física evitando el ingreso de gases o contaminantes dentro del material [13] [14].

Los tratamientos electroquímicos de electrodeposición, además de solucionar problemas que afectan la durabilidad de las estructuras en concreto, permiten obtener beneficios adicionales como el aumento de la resistencia. El aumento en esta propiedad mecánica está relacionado con la disminución en la porosidad del concreto durante la aplicación del tratamiento, la cual a su vez se da gracias a que los materiales puzolánicos que migran dentro del concreto mediante un campo eléctrico se depositan en los poros del concreto y se transforman en productos de hidratación tardíos. Dicha transformación de los materiales se conoce en la literatura como electromutagenesis. [15]

En este artículo se presentan los resultados de una investigación orientada al estudio del proceso experimental de activación de la CV mediante la aplicación de un método electroquímico. El tratamiento utilizado para la activación de la CV consistió en la migración electroquímica de iones alcalinos dentro de probetas de concreto en muestras previamente fabricadas con alto contenido de CV.

Para el montaje experimental se desarrolló una celda con reservorios externos con soluciones de hidróxido de sodio/silicato de sodio con varias relaciones molares. Una vez terminado el proceso electroquímico se evaluó la variación en la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en las probetas con y sin tratamiento; adicionalmente se evaluaron los cambios en la microestructura de la matriz del concreto mediante observaciones bajo un microscopio electrónico de barrido (MEB).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

La CV utilizada en esta investigación se obtuvo de la Central Termoeléctrica TERMOTASAJERO, ubicada en el departamento Norte de Santander, zona Norte Colombiana. En esta planta se utiliza carbon mineral pulverizado como combustible para la generación, y la ceniza se obtiene mediante filtros de precipitación electrostática [16]. La Tabla 1 presenta la composición química de la Ceniza Volante de Termotasajero (FAT) obtenida mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Tabla 1. Composición química de la Ceniza Volante Termotasajero.

COMPUESTO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O	MnO	Pb
%	53.3	29.2	10.9	1.2	1.4	1.6	0.843	0.213	0.488	0.298	0.023	0.021

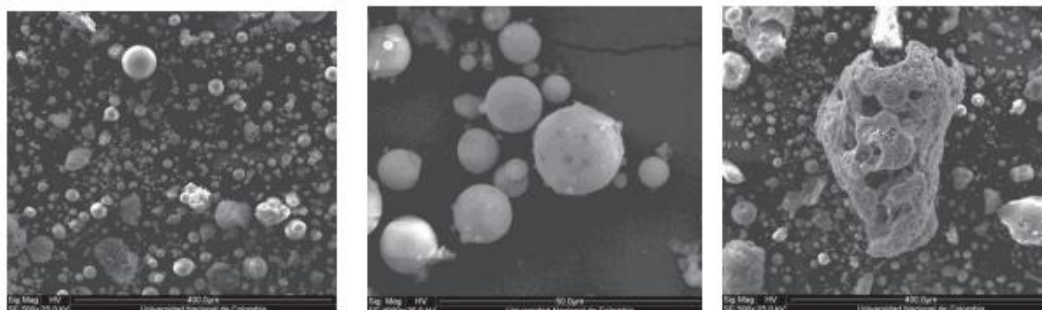


Figura 1. Imágenes MEB. Ceniza Volante utilizada.

En la Figura 1 se muestra el aspecto morfológico de la ceniza utilizada. Se observan imágenes obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB). La ceniza tiene preferencialmente una forma esférica, que efectivamente muestra su naturaleza volante; sin embargo, se aprecian residuos de otros materiales con formas irregulares que no corresponden a las partículas volantes y que probablemente corresponden a residuos de la combustión o inquemados del carbón. El contenido total de inquemados de la ceniza se midió en 13%, valor que se considera alto de acuerdo con la norma **ASTM C 618**; sin embargo, es la ceniza que industrialmente se produce en Colombia, razón por la cual se decidió trabajar con ella.

La Ceniza utilizada tuvo una densidad de 2.14 g/cm³. La Figura 2 muestra la granulometría del material, donde se observa que el tamaño de partícula varía entre 0.33 y 600 μm, con un tamaño promedio de 80 μm aproximadamente.

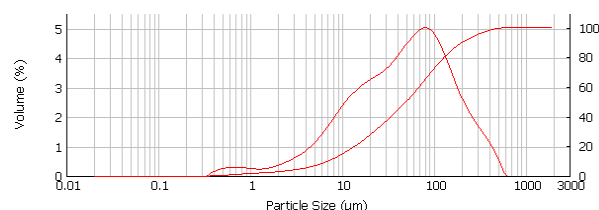


Figura 2. Curva Granulométrica Ceniza Volante utilizada

Para la elaboración de las mezclas se utilizó cemento Portland ordinario, marcado como tipo I según la Norma Técnica Colombiana NTC 121 “Cemento Portland - Especificaciones físicas y mecánicas”. Los agregados usados correspondieron a materiales pétreos, de origen silíceo y provenientes de una fuente de trituración de la zona de influencia de la Sabana de Bogotá – Colombia. El agua usada en la preparación de los concretos correspondió a la que suministra el acueducto de la ciudad de Bogotá.

Los materiales químicos utilizados fueron de origen

industrial, principalmente debido a los altos costos de los reactivos analíticos. Esto sin embargo, se consideró una condición positiva debido a la viabilidad económica de los concretos activados.

Se utilizó hidróxido de sodio (NaOH), comercial, conocido como soda caustica, con una pureza cercana al 100% y con un peso de 40 g/mol aproximadamente, según el proveedor del producto (Profinas Ltda). El silicato de sodio líquido o “waterglass”, es un producto comercial obtenido a partir de la fusión de arena y ceniza de sosa. Como se mencionó anteriormente, los anteriores productos químicos generan los procesos de activación de la Ceniza Volante. El silicato de sodio correspondió a un líquido industrial denso, con una densidad de 1.38 g/cm³.

2.2 Mezclas de concreto

Para la elaboración de las probetas de concreto se utilizó como material cementante una mezcla de Ceniza Volante y Cemento Portland, en una combinación de 60% y 40%, respectivamente, buscando que una cantidad importante de ceniza no tuviera ningún tipo de activación por el CP. Se prepararon un total de 26 cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Teniendo en cuenta que el objeto de la presente investigación fue evaluar la activación de la CV mediante un procedimiento electroquímico, se diseñó el concreto utilizando una relación agua/cementante alta, con el objetivo que las muestras sin tratamiento tuvieran una resistencia baja y una permeabilidad alta. La relación agua material cementante adoptada fue de 1. La Tabla 2 resume las proporciones de material usado para la fabricación de los concretos empleados.

Tabla 2. Diseño de mezcla.

Material	[kg]/[m ³ (concreto)]
Cemento (40%)	114
Ceniza Volante (60%)	172
Agregado grueso	1111
Agregado fino	1064
Agua	286

De las 26 Probetas fundidas, se dispusieron 13 de ellas para un curado en agua y las restantes 13 se dejaron al aire libre bajo las condiciones del

laboratorio con el propósito de identificar si el ambiente de curado afecta los procesos electroquímicos de activación.

2.3 Diseño solución alcalina

Como se mencionó anteriormente, las soluciones alcalinas que más se han usado en la investigación de la activación de la ceniza volante son el Hidróxido de Sodio y el Silicato de Sodio [3]. Se reportan buenos resultados en la activación directa de la ceniza usando concentraciones de [NaOH] del orden de 10 M a 16 M y una relación en peso del silicato de sodio respecto al [NaOH] entre 1 y 3. [17]

Bajo la hipótesis preliminar que el tratamiento de electrodeposición es más eficiente que las mezclas directas y que la reacción de la solución alcalina y las partículas de ceniza se producirá a una escala micrométrica, se decidió hacer los ensayos reportados en este artículo con concentraciones de [NaOH] de [4M], [5M] y [6M] y una relación de silicato de sodio/[NaOH] de 1. Con base en las concentraciones seleccionadas, se planteó el esquema de ensayos presentado en la Tabla 3.

Tabla 3. Probetas utilizadas por Ensayo.

	Muestras Patrón (sin tratamiento)	Concentración [NaOH]		
		[4M]	[5M]	[6M]
Curadas en Agua	4 Probetas	3 Probetas	3 Probetas	3 Probetas
Curadas al Aire Libre	4 Probetas	3 Probetas	3 Probetas	3 Probetas

2.4 Montaje experimental y ensayos de evaluación del tratamiento

A continuación se presenta en la Figura 3 una descripción detallada de la celda electroquímica de ensayo propuesta en esta investigación. El ensayo se planteó para un voltaje (corriente directa) constante de 20V y una duración de 4 días. Esta condición fue adoptada según los ensayos de electrodeposición presentados en la referencia [15], enfocados principalmente en la reparación de grietas en el concreto. Para generar mayor eficiencia y control de los ensayos, se conectaron las probetas mediante un circuito en paralelo, manteniendo el voltaje constante en todas las probetas. Con este propósito

se implementó una caja de distribución.

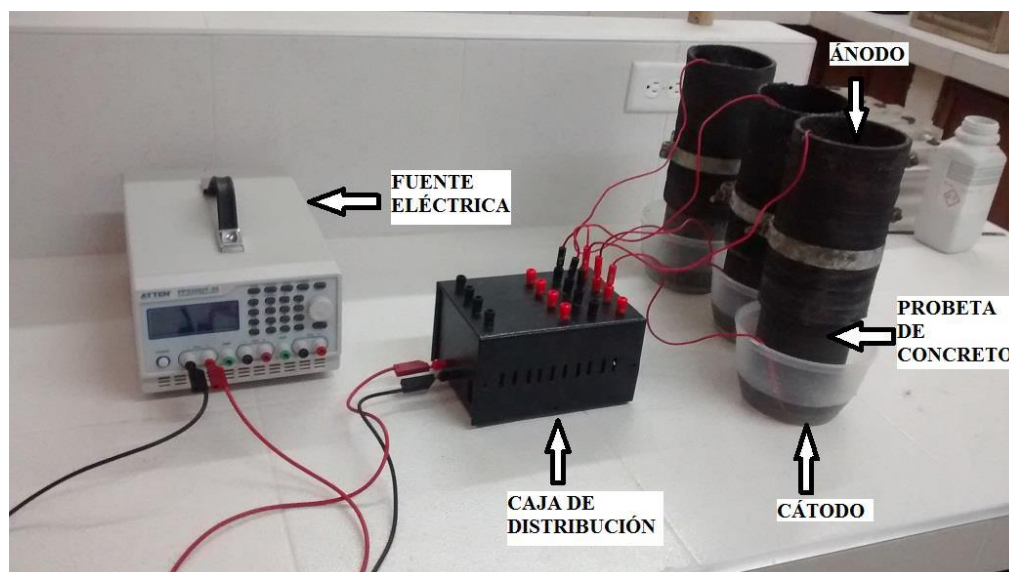


Figura 3. Celda electroquímica de ensayo.

Tabla 3. Edades de los Ensayos.

Ensayo	Edad Probetas (días)
Inicio tratamiento de electrodeposición	180
Fin tratamiento de electrodeposición	184
Ultrasonido	190
Resistencia a la compresión	200
Análisis MEB	205

Durante la realización de los ensayos de Electrodeposición se conectaron tres probetas de concreto para cada concentración de la solución alcalina escogida a la caja de distribución. La medición de la corriente a lo largo de cada probeta se monitoreó durante todo el ensayo (los cuatro días de tratamiento), midiendo el voltaje a través de una resistencia fija y calibrada (1Ω) [18].

Como ánodo y cátodo se utilizaron discos en acero inoxidable, los cuales estaban conectados a la caja de distribución y en contacto con los extremos del cilindro. Dichos electrodos se mantuvieron sumergidos en los reservorios externos con la solución alcalina correspondiente.

Todas las probetas, previo al tratamiento y posterior a él, fueron sometidas a varios ensayos con el objeto de evaluar el efecto del mismo en sus propiedades físicas. La resistencia a la compresión fue medida de

acuerdo con las recomendaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 673 “Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”.

La velocidad de pulso se midió siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597-09 “Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto”. Mediante este ensayo se busca establecer una relación entre la velocidad de onda previa al tratamiento y la que se presenta una vez éste es realizado. Partiendo del principio que al activarse la ceniza volante aumentará su densidad y sus propiedades elásticas. De acuerdo con la norma en cuestión, la velocidad de onda se define de acuerdo con la ecuación (1), donde E corresponde al módulo dinámico de elasticidad, μ es el coeficiente de Poisson y ρ corresponde a la densidad del material. El instrumento usado fue equipado con transductores

de 54kHz.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

Por otro lado, las variaciones en la microestructura de la matriz del concreto se investigaron mediante un microscopio electrónico de barrido. En la Tabla 4 se presentan las edades de las probetas al momento de realizar los ensayos.

3. RESULTADOS Y DISCUSSION

A continuación se presentan los resultados del tratamiento realizado a las probetas de concreto, en función de las variables medidas en el laboratorio. Las Figuras 4 y 5 presentan la evolución de la corriente promedio medida durante los 4 días de tratamiento para las probetas curadas al aire y en inmersión de agua respectivamente. Se observa en ellas que a medida que avanza el tratamiento electroquímico se produce un incremento de la corriente eléctrica medida, situación que se atribuye a los complejos fenómenos de transporte y a las diferencias de movilidad de las diferentes especies iónicas involucradas durante el ensayo. Adicional a las especies alcalinas introducidas desde el exterior, la solución de poros de las muestras de concreto es rica en iones potasio, sodio, calcio e hidroxilo.

De las figuras es evidente que en ninguno de los casos es posible determinar un patrón definido en el comportamiento de la corriente en función de la concentración de la solución. La evolución de la corriente durante un ensayo electroquímico en el concreto es un problema complejo que aún se encuentra en discusión por parte de la comunidad científica. En caso que el lector quiera profundizar en el tema se recomienda revisar la referencia [14].

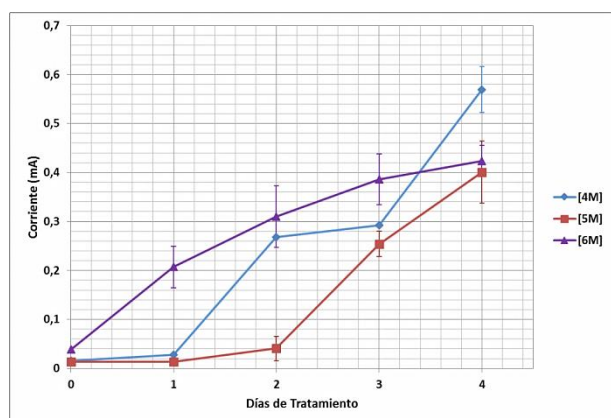


Figura 4. Variación de la Corriente durante el tratamiento: probetas curadas al aire.

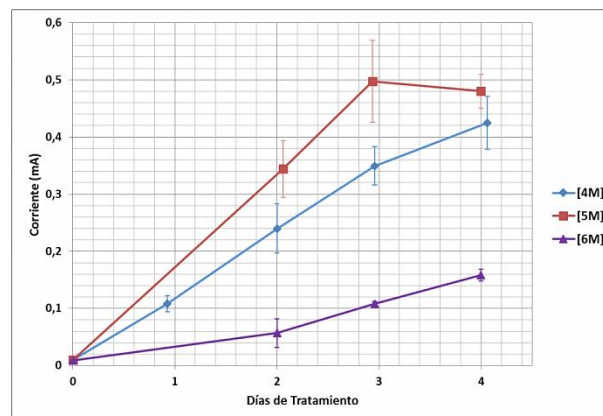


Figura 5. Variación de la Corriente durante el tratamiento: probetas curadas en agua.

La Figura 6 presenta los resultados del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico realizados sobre la muestra patrón (sin tratamiento) y sobre las muestras tratadas con diferentes concentraciones (4M, 5M y 6M). Se observa que para el patrón, el método de curado tuvo un efecto muy importante, pues la velocidad de pulso se incrementó en aproximadamente 30%. Esta situación es ampliamente conocida en tecnología de materiales, pues teniendo en cuenta que el concreto sufre un proceso de transición durante su fraguado y que pierde sus propiedades reológicas a las pocas horas, parte del agua de mezcla que no se usa en la hidratación tiende a evaporarse. Si la pérdida de esta agua de mezcla es alta a edades tempranas, el material no desarrolla sus propiedades mecánicas y presenta una alta permeabilidad. La rápida evaporación del agua de mezcla hace que el material cementante no reaccione quedando en condición anhidra sin aportar a las propiedades finales. De la misma forma, la evaporación del agua superficial hace que el agua interna que migra hacia la superficie produzca múltiples capilares interconectados, aumentando la permeabilidad del material. Finalmente, la pérdida acelerada de agua de mezcla genera problemas de retracción hidráulica y de secado, situación que puede regenerar fisuración en el material.

Para todas las muestras tratadas electroquímicamente se encontró una velocidad de pulso similar, aproximadamente 2600 m/s sin importar el método de curado y la concentración alcalina usada. El tratamiento tuvo efectos muy positivos en el concreto, pues se incrementó la velocidad de onda en un 45% para las mezclas

curadas al aire y aproximadamente 10% para las mezclas curadas en agua. El mayor incremento obtenido en las muestras curadas al aire se atribuye a la mayor permeabilidad de dichas muestras, lo que facilitó el transporte iónico durante el tratamiento. Adicionalmente, en las muestras curadas al aire existe mayor disponibilidad de ceniza volante en estado anhidro (sin reaccionar).

El incremento en la velocidad de pulso se atribuye a un incremento en las propiedades mecánicas del material, específicamente el módulo elasticidad dinámico E . Mediante el tratamiento electroquímico, los iones alcalinos migran desde las celdas externas a través de la red capilar del concreto saturada con la solución de poros. Allí, se estima que algunos de los granos de ceniza volante anhidros reaccionan con dichos iones mutando a estructuras formadas principalmente por cadenas de hidratos silico-aluminosos de calcio, que corresponden de manera general a los productos de hidratación de los geopolímeros. Las nuevas estructuras formadas dentro del concreto sufren simultáneamente dos condiciones, inicialmente su densidad aumenta en la medida que la ceniza reacciona formando nuevos productos, disminuyendo la porosidad del material. De la misma forma, los nuevos productos de hidratación mejoran notablemente el comportamiento mecánico del material. Se estima que el incremento en las propiedades mecánicas es muy superior al incremento de la densidad, razón por la cual se da el aumento en la velocidad de pulso ultrasónico.

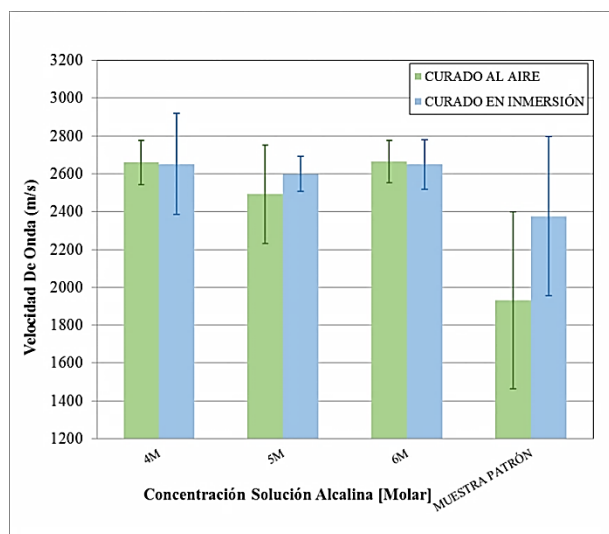


Figura 6. Ensayo Ultrasonido

Los resultados de resistencia a la compresión se muestran en la Figura 7. Tal y como se esperaba, la resistencia promedio de la mezcla patrón fue baja, principalmente por la muy alta relación agua cemento (cercana a 1) y por la importante cantidad de ceniza volante usada (60%). Igualmente, el valor obtenido para la mezcla patrón curada en agua fue el doble de su par curada al aire.

Al igual que en los resultados de la velocidad de pulso, el tratamiento alcalino generó un incremento en la resistencia de todas las muestras. Aunque las muestras curadas en agua presentaron valores de resistencia numéricamente mayores, en las muestras curadas al aire fueron mayores los incrementos de resistencia debido al tratamiento. De este modo, se confirma las observaciones dadas anteriormente en relación a la velocidad de pulso.

Después del tratamiento electroquímico las muestras curadas al aire presentaron un incremento de resistencia entre el 40 y el 75%, siendo la concentración óptima la correspondiente a 6M. En cambio, las muestras curadas en agua tuvieron incrementos entre el 6 y el 50% siendo la óptima la que tuvo una concentración de 5M.

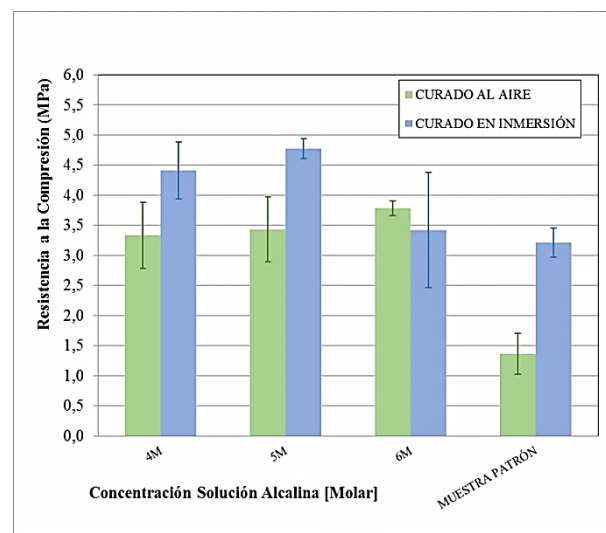


Figura 7. Resistencia a la Compresión

Con el objetivo de comprender los cambios en la microestructura del concreto una vez realizado el tratamiento de electrodeposición, se sometieron algunas muestras de las probetas elaboradas y tratadas a un análisis morfológico superficial mediante MEB. Con este, se tomaron microfotografías a una escala de magnificación de 5000X. La Figura 8 muestra en la foto A, el estado

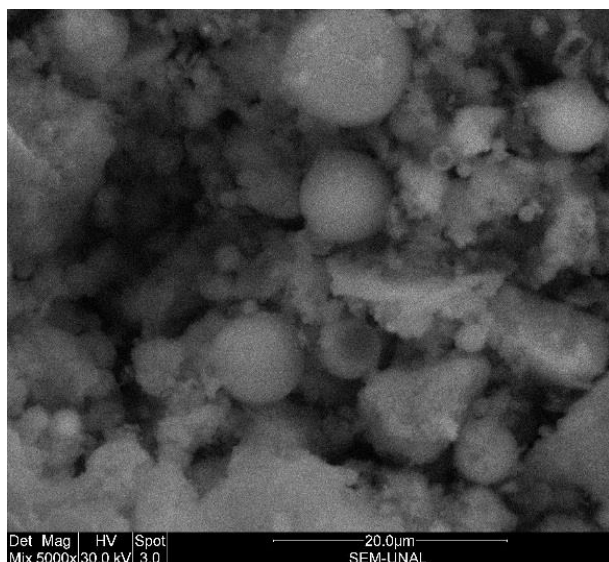
inicial de las probetas que fueron curadas en agua. Se observan principalmente dos grupos de materiales, una fase continua formada por los productos, bien sea de la hidratación del cemento, como los de la reacción puzolánica primaria, y una fase discreta formada principalmente por la partículas esféricas de ceniza volante anhidra. De la misma forma, en la fotografía 8A no se aprecian estructuras asociadas con la portlandita (hidróxido de calcio), esto debido a que con la cantidad de ceniza usada en la mezcla, se presume que toda la portlandita generada en la hidratación del cemento se consumió en la reacción puzolánica primaria.

De forma paralela, en la Figura 8B se muestra la morfología superficial de una muestra curada en agua y sometida al tratamiento electroquímico. Se aprecian grandes diferencias atribuibles al tratamiento: 1) la cantidad de ceniza volante en estado anhidro es mucho menor. Se considera que el proceso fue exitoso en la medida que muchas de estas partículas mutaron por causa del tratamiento, produciéndose una hidratación secundaria de tipo electroquímica. 2) Se aprecia que la porosidad de las muestras tratadas es mucho menor que su par no

tratado. Esta situación es concordante con los resultados de resistencia a la compresión y pulso ultrasónico presentados anteriormente. 3) Adicional a las estructuras correspondientes a los productos de hidratación, se observan en la microfotografía algunos cristales muy bien definidos y con forma de aguja. Se pudo comprobar que este material correspondió a cristales de hidróxido de sodio proveniente del tratamiento electroquímico.

Las muestras curadas en el aire se muestran en la Figura 9. Allí se observa que para muestra sin tratamiento se tiene igualmente una importante cantidad de ceniza volante en condición anhidra, Igualmente se observa que existe una muy alta porosidad. La Figura 9C muestra una situación similar a la reportada en la Figura 8B; sin embargo, no se aprecian cantidades importantes de cristales de hidróxido de sodio. Se considera que estos fueron incorporados en los nuevos productos de hidratación secundarios generados mediante la activación electroquímica. Esto explicaría por qué las muestras curadas al aire, presentaron mayores ganancias de resistencia que sus pares curados en agua.

A. Concreto curado en agua
(Sin Tratamiento Electroquímico)



B. Concreto curado en agua
(Con Tratamiento Electroquímico)

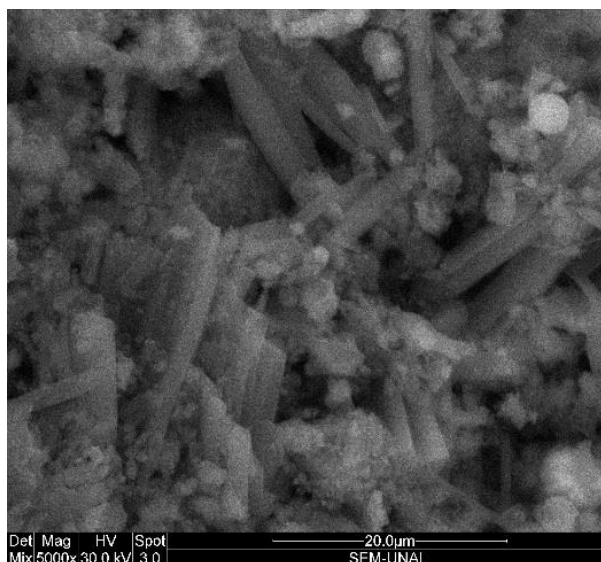
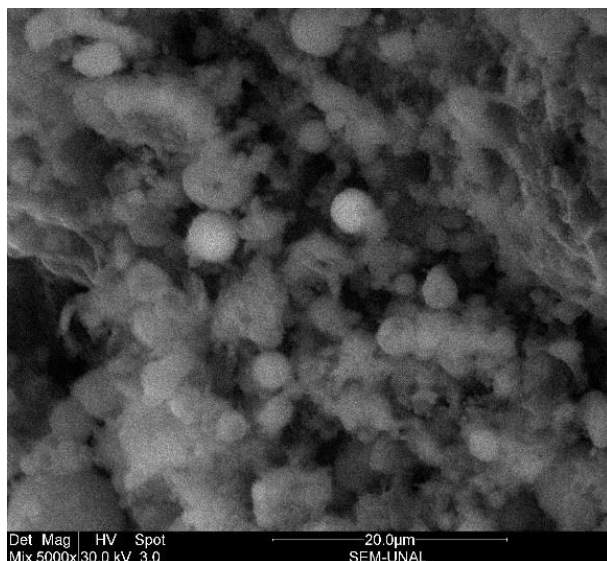


Figura 8. Imágenes SEM Probetas curadas en agua

C. Concreto curado al aire
(Sin Tratamiento Electroquímico)



D. Concreto curado al aire
(Con Tratamiento Electroquímico)

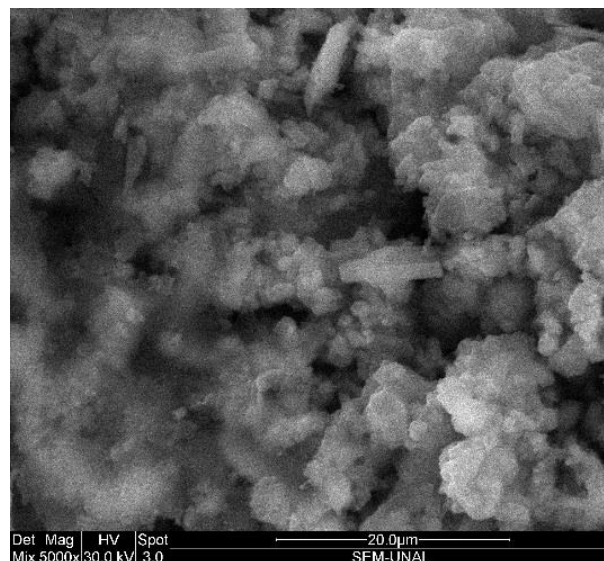


Figura 9. Imágenes SEM Probetas curadas en el aire

4. CONCLUSIONES

La reacción entre los iones alcalinos migrados eléctricamente y la CV genera un cambio en la microestructura de la ceniza, por tal razón a este proceso de activación se le denomina de Electromutagénesis Química. Los iones alcalinos migrados dentro del concreto pueden reaccionar con las partículas de CV produciendo una nueva fase, similar a la generada en el proceso de hidratación de un geopolímero.

Mediante esta investigación se demostró la potencialidad y efectividad de las técnicas de electromutagénesis como mecanismos de activación alcalina. Cuantitativamente, mediante ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso, se evaluó la efectividad del tratamiento.

A partir del análisis morfológico de la superficie de las diferentes muestras analizadas (microfotografías MEB), se pudo observar como en los concretos sometidos al tratamiento de electrodeposición es menor el número de partículas de ceniza disponible, respecto a las probetas sin tratamiento. Lo anterior refleja una mayor proporción de productos de hidratación secundarios, una disminución de la porosidad con un respectivo mejorando las diferentes propiedades físicas del concreto

El tratamiento electroquímico fue más eficiente para las muestras curadas al aire, lo que abre la posibilidad de mejorar las propiedades físicas de concretos de muy baja especificación (calidad). Es necesario aclarar que todas las anteriores conclusiones son preliminares y están sujetas a un estudio más profundo que permita determinar a cabalidad la relación que existe entre las variables de estudio.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de la Universidad Nacional de Colombia, mediante el financiamiento del proyecto 18519.

6. REFERENCIAS

- [1]. Y. Keun-Hyeok, "Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete", Journal of Cleaner Production, vol. 39, pp. 265-272, 2013.
- [2]. Y. Keun-Hyeok, . L. Kyung-Ho, S. Jin-Kyu y G. Min-Ho, "Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete", Journal of Cleaner Production, vol. 68, pp. 226-233, 2014.
- [3]. A. Motorwala, V. Shah, R. Kammula, P. Nannapaneni y P. D. B. Raijiwala, "ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, pp. 159-

- 166, 2008.
- [4]. A. Palomo, M. Grutzeck y M. Blanco , “Alkali-activated fly ashes A cement for the future”, *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1323-1329, 1999.
- [5]. A. Palomo y A. Fernández-Jiménez, “Alkaline activation, procedure for transforming fly ash into new materials. Part I: Applications.”, de *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Denver, CO, USA, 2011.
- [6]. U. Rattanasak y P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, *Minerals Engineering*, vol. 22, p. 1073–1078, 2009.
- [7]. A. M. Mustafa Al Bakri, H. Kamadurin , M. Bnhussain, I. Khairul Nizar, A. R. Rafiza y Y. Zarina, “Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement”, *Journal of Engineering and Technology Research*, pp. 44-49, 2011.
- [8]. L. M. Ottosen, I. V. Christensen, I. Rørig-Dalgard, P. E. Jensen Y H. K. Hansen, “Utilization of electromigration in civil and environmental engineering-Processes, transport rates and matrix changes”, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, pp. 795-809, 2008.
- [9]. L. Yajun y X. Shi, “Electrochemical Chloride Extraction and Electrochemical Injection of Corrosion Inhibitor in Concrete: State of the Knowledge”, *Corrosion Reviews*, vol. 27, n° 1-2, 2009.
- [10]. L. Yajun y X. Shi, “Ionic transport in cementitious materials under an externally applied electric field: Finite element modeling”, *Construction and Building Materials*, vol. 27, p. 450–460, 2012.
- [11]. H. Cardenas, K. Kupwade-Patil y S. Eklund, “Corrosion Mitigation in Mature Reinforced Concrete Using Nanoscale Pozzolan Deposition”, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.*, 2010.
- [12]. H. Cardenas, J. Alexander, K. Kupwade-Patil y L. M. Calle, “Field Testing of High Current Electrokinetic Nanoparticle Treatment for Corrosion Mitigation in Reinforced Concrete».
- [13]. [13] J.-S. Ryua y N. Otsukib, “Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique”, *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 159-164, 2002.
- [14]. J. Ryou y P. Monteiro, “Electrodeposition as a rehabilitation method for concrete materials”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 31, n° 5, 2004.
- [15]. H. E. Cardenas, *Nanomaterials in Concrete; Advances in Protection, Repair and Upgrade.*, DEStech Publications, Inc., 2012.
- [16]. C. H. Florez G, R. Zarate C, Z. K. Caicedo O y B. A. Contreras, “Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes”, *Respuestas*, pp. 19-31, 2008.
- [17]. J. E. Santacruz, “Estudio Preliminar De La Activación Alcalina De Una Ceniza Volante Colombiana, Como Material Cementante.”, Bogotá, 2014.
- [18]. J. M. Lizarazo Marriaga, “Transport properties and multi-species modelling of slag based concretes”, *Coventry University*, 2009.