



**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A  
PARTIR DE LA ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO COMO USO  
ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND**

**ARNOLD GIUSEPPE GUTIÉRREZ TORRES**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A  
PARTIR DE LA ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO COMO USO  
ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND.**

**ARNOLD GIUSEPPE GUTIÉRREZ TORRES**

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ingeniería - Estructuras**

**Director: Juan Manuel Lizarazo Marriaga  
PhD Coventry University - UK (2010)  
Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia - Bogotá**

**Línea de Investigación:  
Materiales para estructuras**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico este encuentro fascinante y siempre insondable camino al conocimiento. A mis padres que me enseñaron la firmeza y constancia en el obrar. A mi compañera y amiga Esperanza por su comprensión y apoyo. A mis hijas Isabella y Daniela que entendieron y aceptaron mis momentos de ausencia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que contribuyeron con su apoyo y colaboración en el desarrollo del trabajo. A mi director Doctor Juan Manuel Lizarazo Marriaga por su constante dedicación, orientación y aportes al trabajo. A los técnicos de los laboratorios que me acompañaron en la elaboración de ensayos y pruebas de laboratorio. Al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá por la formación recibida.

## Resumen

Como parte del compromiso frente a la protección del medio ambiente y el interés en la aceptación y utilización de materiales conglomerantes alternativos al cemento Portland, que permitan el aprovechamiento de los residuos industriales y el avance en el conocimiento de la activación alcalina, se presenta el siguiente trabajo, que consiste en identificar el tipo de solución activante y la dosificación que arroje los mejores resultados de resistencia a compresión en morteros. Para ello, se utilizaron como activantes hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) de origen industrial y la combinación de ambos. Como precursor la escoria granulada de alto horno (EGAH) de producción nacional. Una vez optimizado los materiales a usar se modificaron las condiciones de curado para identificar su influencia, de igual forma, las muestras se sumergieron en agua salada, sulfatada, destilada y la que suministra el acueducto con el fin de medir su deterioro frente a ciertos ambientes.

Se midió el calor generado por las pastas activadas en un calorímetro semi-adiabático y se intentó correlacionar los resultados con la microscopía electrónica de barrido, la difracción de rayos x y la impedancia electroquímica. Lo anterior con el fin, de establecer los mecanismos de activación y así poder identificar en el tiempo los productos de reacción. Finalmente se elaboró un diseño de mezcla de concreto con la mejor dosificación y se midió la penetración del ion cloruro por el método RCPT. Los resultados asociados con la resistencia y durabilidad suministraron información que permitió caracterizar mejor este material.

**Palabras claves:** escoria granulada de alto horno, activación alcalina, resistencia, durabilidad.

## Abstract

As part of the commitment to the protection of the environment and interest to accept and use the binder alternative materials to Portland cement, to allow the use of industrial residue and the progress in the knowledge of alkaline activation, it shows this work, which consists in identifying the type of activating solution and the concentration to get the best results of compression resistance in mortars. For this, we used sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) of industrial origin and a combination of these two. As precursor the granulated furnace slag (EGAH) in national production. Once optimized the materials to use, the curing conditions were changed to identify their influence, also the samples were submerged in salted, sulfated, distilled water and the one supplied by the aqueduct in order to observe some deterioration.

The heat generated by the activated pulps in the adiabatic calorimeter was measured and it tried to correlate the results with scanning electron microscopy, x-ray diffraction and electrochemical impedance. The above in order to establish the activation mechanisms and identify the products in time of reaction. Finally, a concrete mixing design was developed with the best dosage and the ion penetration was measured by the RCPT method. The results in relation with the resistance and durability gave information to characterize in a better way this material.

**Key words:** Granulated furnace slag, alkaline activation, resistance and durability.

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	17
1.1.	Planteamiento del problema.....	18
1.2.	Justificación.....	19
1.3.	Objetivos .....	21
2.	Generalidades .....	22
2.1.	Aspectos históricos de la activación alcalina .....	23
2.2.	Terminología de la activación alcalina.....	26
2.2.1.	Activación alcalina en sistemas con moderado contenido de calcio. ....	28
2.2.2.	Activación alcalina en sistemas con bajo calcio.....	31
2.2.3.	Geopolímeros.....	38
2.3.	Precusores para cementos activados alcalinamente.....	41
2.3.1.	Escoria granulada de alto horno.....	45
2.3.2.	Escoria granulada de fósforo. ....	51
2.3.3.	Escoria de acero .....	52
2.3.4.	Puzolanas .....	54
2.4.	Composición y activación de la escoria granulada de alto horno .....	60
2.4.1.	Propiedades físicas.....	60
2.4.2.	Composición química .....	61
2.4.3.	Composición mineralógica .....	62

2.4.4.	Agentes activantes .....	66
2.4.5.	Productos de reacción .....	71
2.5.	Cementos de escoria activada alcalinamente .....	75
2.5.1.	Propiedades mecánicas. ....	76
2.5.2.	Calor de hidratación.....	77
2.5.3.	Fraguado rápido. ....	78
2.5.4.	Formación de eflorescencias.....	80
2.5.5.	Durabilidad .....	81
2.5.6.	Aplicaciones y especificaciones .....	85
3.	Desarrollo experimental .....	88
3.1.	Técnicas de caracterización.....	88
3.1.1.	Fluorescencia de Rayos X (FRX). ....	88
3.1.2.	Difracción de Rayos X (DRX).....	89
3.1.3.	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). ....	90
3.1.4.	Espectroscopia de Impedancias Electroquímicas (EIS).....	90
3.1.5.	Microscopía de fuerza atómica .....	91
3.2.	Metodología experimental.....	92
3.3.	Caracterización de los materiales de partida .....	93
3.3.1.	Escoria granulada de alto horno.....	93
3.3.2.	Arena.....	97

3.3.3.	Grava.....	99
3.3.4.	Activadores alcalinos y agua.....	100
3.4.	Solución Activante.....	102
3.4.1.	Tipo de Activador.....	102
3.4.2.	Concentración del activador.....	102
3.4.3.	Preparación de la solución activante.....	103
3.5.	Dosificación de las mezclas.....	104
3.5.1.	Mezclas de pastas y mortero.....	104
3.5.2.	Mezcla para concreto.....	108
3.6.	Elaboración de probetas.....	109
3.7.	Ensayos realizados.....	112
3.7.1.	Resistencia mecánica.....	112
3.7.2.	Durabilidad.....	113
3.7.3.	Microestructura.....	115
4.	Resultados y discusión.....	119
4.1.	Resistencia a la compresión de morteros.....	119
4.1.1.	Morteros activados con hidróxido de sodio (NaOH).....	119
4.1.2.	Morteros activados con silicato de sodio (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ).....	122
4.1.3.	Morteros activados con silicato de sodio y su módulo (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O).....	124
4.2.	Resistencia a la flexión de morteros.....	130

4.3.	Resistencia a la tensión .....	131
4.4.	Durabilidad.....	132
4.5.	Calorimetría.....	135
4.6.	Microscopia electrónica de barrido .....	137
4.7.	Difracción de Rayos X (DRX) .....	141
4.8.	Microscopia de fuerza atómica .....	143
4.9.	Impedancia electroquímica .....	146
5.	Conclusiones.....	151
6.	Anexos .....	154
	ANEXO A: Calorimetría.....	154
	ANEXO B: Imágenes microscopia electrónica.....	160
	ANEXO C: Resumen impedancia.....	217
7.	Referencias .....	243

*Lista de figuras*

<b>Figura 1</b> Clasificación de AAMs.....	27
<b>Figura 2</b> Nomenclatura aluminosilicatos en RM.....	29
<b>Figura 3</b> Modelo estructural para el contenido de Al del gel C-S-H.....	31
<b>Figura 4</b> Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín.....	34
<b>Figura 5</b> Estructura tridimensional de un gel N-A-S-H .....	35
<b>Figura 6</b> Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín.....	37
<b>Figura 7</b> Diagrama de fase CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :sistema hidráulico Ligantes .....	42
<b>Figura 8</b> Esquema del proceso de fundición en un alto horno .....	48
<b>Figura 9</b> Esquema a) Horno oxígeno básico (BOF) b) horno arco eléctrico (EAF) .....	53
<b>Figura 10</b> Representación bidimensional de la estructura cristalina y vítrea .....	63
<b>Figura 11</b> Disolución de materiales con alto contenido de calcio .....	68
<b>Figura 12</b> Estructura "dreierkette" cadenas infinitas (A) 14Å tobermorita y (B) jennita... 73	
<b>Figura 13</b> Representación esquemática del desarrollo experimental .....	92
<b>Figura 14</b> Escoria granulada de alto horno y secado.....	93
<b>Figura 15</b> Equipo de molienda y producto .....	94
<b>Figura 16</b> a) Arena sílicea; b) Arena de peña; c) Arena lavada .....	97
<b>Figura 17</b> Grava.....	99
<b>Figura 18</b> Moldes, cubos y mortero.....	110
<b>Figura 19</b> Aspecto del tronco de cono del mortero Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....	111
<b>Figura 20</b> Cilindros de concreto activados alcalinamente.....	111
<b>Figura 21</b> Ensayos a flexión y tensión.....	113
<b>Figura 22</b> Inmersión de probetas .....	114

<b>Figura 23</b> Ensayo RCPT.....	115
<b>Figura 24</b> Montaje circuito de impedancia eléctrica y probeta .....	117
<b>Figura 25</b> Resultados de colocación de morteros con módulos de 0.75, 1, 1.25.....	126
<b>Figura 26</b> Secciones de las probetas utilizadas en el ensayo de tensión. ....	131
<b>Figura 27</b> Micrografías de las pastas activadas .....	137
<b>Figura 28</b> Micrografía de la escoria activada con $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ .....	138
<b>Figura 29</b> Micrografía de un mortero .....	139
<b>Figura 30</b> Micrografías con diferentes activantes .....	140
<b>Figura 31</b> Difractograma de una pasta activada con NaOH para diferentes días.....	141
<b>Figura 32</b> Difractograma: pasta activada con silicato de sodio para diferentes días.....	142
<b>Figura 33</b> Imágenes AFM para una pasta activada con NaOH a 6 y 24 horas.....	143
<b>Figura 34</b> Imágenes AFM para diferentes activantes hidróxido y silicato a las 24 horas	144
<b>Figura 35</b> Imágenes AFM pasta activada con silicato de sodio, 1.5 a las 24 horas .....	145
<b>Figura 36</b> Diagramas de Nyquist para la activación con NaOH .....	147
<b>Figura 37</b> Diagramas de Nyquist para la activación con $\text{Na}_2\text{SiO}_3 +\text{NaOH}$ .....	147
<b>Figura 38</b> Diagramas de Nyquist para la activación con $\text{Na}_2\text{SiO}_3 +\text{NaOH}$ .....	148
<b>Figura 39</b> Diagramas de Bode para una mezcla activa con $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ a los 3 días .....	149
<b>Figura 40</b> Diagramas de frecuencias para un tiempo de 72 horas .....	149

*Lista de gráficas*

<b>Gráfica 1</b> Efecto de la finura Blaine de la escoria del alto horno en el tiempo de fraguado de las pastas de cemento activado alcalinamente.....	79
<b>Gráfica 2</b> Efecto del módulo de solución de silicato de sodio en los tiempos de fraguado de las pastas de cemento de escoria de fósforo activadas con álcali.....	80
<b>Gráfica 3</b> Permeabilidad al agua de morteros de escorias y cemento Portland.....	82
<b>Gráfica 4</b> Corrosión de pastas de cemento en solución de ácido nítrico a pH 3 .....	83
<b>Gráfica 5</b> Corrosión de pastas de cemento en solución de ácido acético a pH 3 .....	84
<b>Gráfica 6</b> Curva granulométrica.....	96
<b>Gráfica 7</b> Curva granulométrica.....	98
<b>Gráfica 8</b> Curva granulometría grava.....	100
<b>Gráfica 9</b> Resistencia de morteros a compresión activados con NaOH.....	120
<b>Gráfica 10</b> Resistencia de morteros a compresión con diferente relación agua/escoria y activador NaOH.....	120
<b>Gráfica 11</b> Resistencia de morteros a compresión con mayor concentración y activante NaOH.....	121
<b>Gráfica 12</b> Resistencia de morteros a compresión activados con Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....	122
<b>Gráfica 13</b> Resistencia de morteros a compresión activados con Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> de diferente módulo.....	124
<b>Gráfica 14</b> Resistencia de morteros activados con Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> de módulo 1.5 .....	125
<b>Gráfica 15</b> Resistencia de morteros a compresión con las mejores mezclas.....	126
<b>Gráfica 16</b> Resistencia de morteros a compresión con las mezclas y diferente curado ...	128
<b>Gráfica 17</b> Resistencia de morteros a compresión con las mejores mezclas y arena.....	129

<b>Gráfica 18</b> Resistencia de morteros a flexión.....	130
<b>Gráfica 19</b> Resistencia de morteros a tensión .....	131
<b>Gráfica 20</b> Resistencia a compresión de morteros sometidos a la acción de sulfatos y agua de mar .....	133
<b>Gráfica 21</b> Curvas calorimétricas de las diferentes pastas estudiadas.....	135
<b>Gráfica 22</b> Calor específico de las pastas .....	136

*Lista de tablas*

<b>Tabla 1</b>	Acontecimientos históricos sobre los cementos activados con álcalis.....	25
<b>Tabla 2</b>	Clasificación y uso de Geopolímeros .....	39
<b>Tabla 3</b>	Clasificación y uso de Geopolímeros .....	40
<b>Tabla 4</b>	Composición química de las escorias de acero .....	53
<b>Tabla 5</b>	Composición típica de las EGAH.....	61
<b>Tabla 6</b>	Factores que determinan la geopolimerización .....	70
<b>Tabla 7</b>	Difusión de cloruro en cemento Portland y pastas de cemento de escoria.....	83
<b>Tabla 8</b>	Propiedades físicas de la escoria .....	94
<b>Tabla 9</b>	Composición química de la escoria.....	95
<b>Tabla 10</b>	Composición química de la arena.....	97
<b>Tabla 11</b>	Granulometría arena .....	98
<b>Tabla 12</b>	Granulometría grava.....	99
<b>Tabla 13</b>	Propiedades físico químicas del silicato de sodio .....	101
<b>Tabla 14</b>	Propiedades físico químicas del hidróxido de sodio .....	101
<b>Tabla 15</b>	Cantidades de material en la mezcla de concreto.....	108
<b>Tabla 16</b>	Consistencia y tiempos de fraguado .....	109
<b>Tabla 17</b>	Fluidez en morteros .....	110
<b>Tabla 18</b>	Matriz de ensayos a compresión de morteros.....	112
<b>Tabla 19</b>	Matriz de ensayos a compresión de morteros.....	114
<b>Tabla 20</b>	Ensayo prueba rápida de permeabilidad de cloruros .....	134

**Lista de símbolos y abreviaturas**

**CPO.** Cemento Portland Ordinario.

**CAA.** Cementos Activados Alcalinamente.

**MAA.** Materiales Activados Alcalinamente.

**MK.** Metacaolín.

**CV.** Ceniza volante.

**EIS.** Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas.

**RC.** Resistencia a la compresión.

**RF.** Resistencia a la Flexión.

**IR.** Espectroscopia de Infrarrojo.

**SEM.** Microscopia Electrónica de Barrido.

**CSH.** Silicato de Calcio Hidratado.

**CASH.** Silicoaluminato Cálcico Hidratado.

**NASH.** Silicoaluminato Sódico Hidratado.

**AFM.** Microscopia de Fuerza Atómica.

**EGAH.** Escoria Granulada de Alto Horno.

**A/C.** Relación agua/cementante.

**FRX.** Fluorescencia de rayos x.

**DRX.** Difracción de rayos x.

**EDS.** Espectroscopia por Dispersión de Energía.

**Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.** Silicato de sodio.

**NaOH.** Hidróxido de Sodio

.

## **1. Introducción**

El cemento Portland es por hoy, el material de construcción más utilizado en el mundo después del agua, gracias a las buenas prestaciones físico-mecánicas y bajos costos económicos. Sin embargo, su producción requiere de procesos energéticos elevados y los daños ambientales son muy altos debido a la gran cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera, especialmente, en la descarbonatación de la caliza, material fundamental en su elaboración.

A partir de las políticas medio ambientales, tomadas en cuenta en los últimos años, se ha generado la necesidad de un nuevo material constructivo capaz de garantizar y mejorar las necesidades que satisface hoy en día el cemento Portland que requieran menor costo de fabricación y afecten en menor medida al medio ambiente.

Dentro de estos materiales se encuentra la escoria granulada de alto horno denominadas (EGAH), un producto de residuo industrial, que resulta de la fundición del mineral de hierro, la caliza y el coque para la obtención del hierro. Este material se caracteriza por presentar mayores ventajas frente al cemento Portland cuando es activado alcalinamente, tales como: mayores resistencias mecánicas, menor costo económico y ambiental en su producción, mejor respuesta frente al ataque químico, excelente comportamiento como agente inmovilizador de residuos tóxicos y peligrosos, entre otras. Lo que significa que el uso del cemento de escoria activado alcalinamente presenta grandes beneficios y, en Colombia no se han utilizado en obras de infraestructura que pongan a prueba sus propiedades como material cementante.

La comunidad científica adelanta investigaciones con el fin de dar respuestas a los fundamentos que rige la activación alcalina, entrando en la química compleja de multifases amorfas, que permitan controlar y modificar la nanoestructura del material. El presente estudio es un intento más en el conocimiento a escala macro-estructural de la escoria activada alcalinamente,

en aspectos relacionados con el comportamiento de la resistencia y durabilidad del material; con lo que se busca justificar y materializar la idea de la activación alcalina de la escoria como uso alternativo del cemento Portland.

### **1.1. Planteamiento del problema**

El crecimiento de la población a nivel mundial, exige de más energía y recursos del medio para que se mantenga. En esta misma lógica se encuentra el sector de la construcción, que, sumado a la idea de ganancia económica, hace uso indiscriminado y poco consciente de los recursos. El cemento Portland, principal conglomerante utilizado en el desarrollo de obras de infraestructuras, tiene una producción que requiere de aproximadamente 3.600 millones de toneladas a nivel mundial y 11,5 millones a nivel nacional. Es decir, significa un valor importante cuando se tiene en cuenta que su elaboración es un proceso energéticamente costoso y contaminante (Londoño & Pinto, 2015).

La fabricación de cemento Portland consume aproximadamente del 2 al 3% de energía primaria a nivel mundial. En su elaboración se producen aproximadamente 0.87 toneladas de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento producido, que representa alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> antropogénico global. Sumado a ello el consumo de recursos no renovables, los cuales se requieren para su producción (Neville, 1995; Caijun Shi & Krivenko, 2006; Scrivener & Kirkpatrick, 2008).

A esta seria dificultad ambiental se suman las debilidades que presenta el material en aspectos de durabilidad. Su baja resistencia a la corrosión química frente a algunos agentes medio ambientales, su relativa debilidad a las altas temperaturas, el fenómeno álcali agregado que puede presentar, la retracción que experimenta, entre otras. Hace entendible porque el 20% del cemento Portland que se fabrica anualmente a nivel mundial se utiliza para reparar estructuras en servicio.

En la bibliografía se pueden encontrar casos donde estructuras a base de cemento Portland con menos de 20 años de vida presentan serios problemas de durabilidad.

Un agregado a esta problemática es la visión desde el desarrollo sustentable, que los países más industrializados no quieren asumir, la poca promoción y desarrollo de investigaciones que ofrezcan aportes importantes en el desarrollo de nuevos materiales amigables con el medio ambiente y, sin duda, el imaginario colectivo en lo arquitectónico, de bienestar y de mercado.

## **1.2. Justificación**

Los residuos industriales son un problema ambiental que requiere una pronta solución. Pero al hacer una mirada más detallada, muchos de estos materiales aún tienen propiedades físicas y químicas que se pueden aprovechar en el campo de la construcción, constituyéndose en una solución económica y que va en pro de la conservación del medio ambiente.

La escoria granulada de alto horno (EGAH), es un subproducto de la producción de arrabio, una etapa preliminar del proceso en la fabricación de acero, que puede ser usado tanto para reemplazar parcialmente el cemento Portland ordinario (CPO), o bien, como un material cementante cuando se activa alcalinamente y, así, acelerar la disolución de la red vítrea de la escoria y dar inicio a un proceso de geopolimerización

En la última década se han desarrollado diversas investigaciones encaminadas al aprovechamiento de este material, mezclándolo en ciertas proporciones con el cemento Portland, esto favorece no solo la disminución del consumo que, de acuerdo con la norma UNE-EN 197-1, contempla proporciones de adiciones que van de 6% AL 95%, sino en las mejoras del material en aspectos de resistencia y durabilidad. Algunas características de estos cementos es que no libera portlandita, no se forma aluminato tricálcico y los álcalis que actúan como catalizadores en la

hidratación de la escoria quedan atrapados en la red cristalina y no en estado libre. Lo que significa mejoras sustanciales en su comportamiento.

Más recientemente, los estudios apuntan a utilizar la escoria activándolas directamente con soluciones alcalinas. Aquí el material que contiene alúmina y sílice reacciona en condiciones altamente alcalinas para formar una red tridimensional de enlaces Si-O-Al-O. Los resultados han sido prometedores. La producción de hormigones con base en escorias activadas alcalinamente es mucho más económica que la elaboración de hormigones de altas resistencias con cemento Portland, el ahorro se debe a la disminución en el consumo de un 70% en combustibles y alrededor de un 60-70% en energía eléctrica. Además, el beneficio está en tres sentidos. Por un lado, se da salida a un subproducto industrial, cuyo almacenamiento crea serios problemas, por otro lado, se evita la destrucción de canteras naturales para obtener materias primas y, finalmente, se obtienen materiales con alta resistencia mecánica y buen comportamiento en durabilidad.

Si bien es cierto que la durabilidad de materiales activados alcalinamente, denominados (MAA), están siendo estudiados mediante métodos acelerados y presentan muy buen comportamiento frente a soluciones agresivas, como pueden ser: los sulfatos de magnesio o de sodio, ácido acético, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico (Bakharev, 2005; Bakharev,2005b; Fernández, García, & Palomo, 2007; Palomo, et al., 1999; Song, 2007); algunos investigadores consideran que esto no garantiza su durabilidad real en el tiempo. Sin embargo, una ventaja adicional de la escoria activada alcalinamente, es que cuenta con buenos resultados de inspección en campo de diferentes tipos estructuras construidas hace más de 40 años en países como la antigua Unión Soviética, China y algunos otros países.

Con el acuerdo del Protocolo de Kyoto firmado en 1997 con validez hasta el 2012 y el protocolo de Copenhague con validez hasta el 2020, se crearon políticas medioambientales que

comprometen a los países industrializados a estabilizar o restringir las emisiones de gases efecto invernadero. Teniendo en cuenta estos aspectos, y bajo el compromiso de las leyes medio ambientales, así como el evidente deterioro ambiental presente en el mundo hoy, se hace necesaria la implementación y desarrollo de nuevos materiales que cumplan con los requerimientos constructivos. Además que brinden la seguridad necesaria tanto para los individuos, como para el medio ambiente.

### **1.3. Objetivos**

#### **General**

Evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad de morteros geopoliméricos, sintetizados a partir de una escoria granulada de fabricación nacional y un activante industrial.

#### **Específicos**

Caracterizar la escoria granulada de alto horno y los activantes industriales mediante técnicas experimentales.

Obtener la dosificación óptima de escoria y activante, que puede ser utilizada en la elaboración de concretos geopoliméricos en la industria de la construcción.

Evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad en medios sulfáticos y agua de mar en los morteros elaborados.

Identificar la morfología de las fases resultantes de la activación alcalina de la escoria.

## 2. Generalidades

Los materiales cementantes que permiten unir rocas, bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, presentes en la naturaleza, son tan antiguos como el hombre primitivo que requería construir viviendas y estructuras para protegerse del clima y los depredadores. Podría decirse que su invención ha sido un acontecimiento clave en la evolución. Hoy, el desarrollo y la tecnología han permitido mantener en el mercado un producto denominado cemento Portland. La simplicidad, al ser el agua el que lo activa, el bajo costo, sus prestaciones mecánicas y, su capacidad infinita para ser moldeado, al punto de que algunos lo llaman la piedra líquida, lo han convertido en el segundo material más utilizado después del agua (Aïtcin, 2000).

Su evolución ha permitido a los ingenieros y arquitectos la creación de estructuras y espacios que desafían la creatividad. Sin embargo, su producción genera un elevado consumo de materias primas no renovables y un aporte importante de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, en especial el proceso de descarbonatación de la caliza para obtener el clínker. En respuesta a esta dificultad, la industria cementera se ve obligada, mediante la eficiencia energética y de los recursos, captura del carbono, eficiencia del material y el desarrollo de productos para reutilizar y reciclar, establecer una ruta en la economía baja en carbono para el 2050.

Se suman a esto, los grupos de investigación a nivel mundial, conscientes de la conservación y protección del medio ambiente, tienen el propósito de establecer líneas de trabajo que permitan sustituir o disminuir el clínker por materiales con capacidad puzolánica que mejoren aspectos importantes como la durabilidad del material; incluso, generar nuevos materiales con bajo consumo energético en su producción, que no representen elevadas emisiones de gases contaminantes y muestren excelentes prestaciones mecánicas y de durabilidad.

## 2.1. Aspectos históricos de la activación alcalina

La presencia de valores importantes de álcalis en un cemento Portland es inaceptable, a tal punto que se convirtió en un postulado básico dentro de la comunidad científica y técnica (Palomo, et al., 2014). Es común relacionar, en el control de calidad del cemento Portland, con el contenido de álcalis, que se representa como el equivalente de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) presentes y que se sintetiza en la siguiente fórmula:

$$\%(\text{Na}_2\text{O}) \text{ eq} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \% \text{K}_2\text{O}$$

(%Equivalente de óxido de sodio) = (%cont. en óxido de sodio) + 0,658 \*(% cont. en óxido de potasio).

El límite máximo en porcentaje es del 0.6%, incluso este porcentaje puede ser un riesgo para concretos con altos contenidos de cemento. Contrario a ello, para concretos con adiciones como ceniza y escoria, este valor puede ser incrementado a más del 1%. Lo que indica que el uso de adiciones puzolánicas permite un mejor control de la propiedad o característica deseada para el concreto.

Hoy no es extraño hablar de cementos activados alcalinamente, los álcalis juegan un papel importante en la activación y desarrollo de sus propiedades en estos materiales. El uso de álcalis como componente de un material cementante se registra en 1930 con H. Kühl, cuando investigó el comportamiento del fraguado de una mezcla de escoria en polvo y una solución de potasa cáustica (Kühl, 1930). En 1937, Chassevent midió la reactividad de la escoria utilizando potasa cáustica y solución de sosa (Chassevent, 1937). Posteriormente, Feret (1939) define la necesidad de estudiar la escoria como un componente del cemento.

En 1940, Purdon publicó los resultados del primer estudio de laboratorio a gran escala sobre los cementos a base de escoria y cal viva en ausencia de clínker (Purdon, 1940). A finales de 1957, Víctor Glukhovsky fue el primero en establecer una base teórica de los cementos alcalinos, en la experimentación, trabajó materiales de cemento bajos en calcio que llamo “cementos de suelo” y para el caso de concretos “suelos de silicato”, usó arcillas y soluciones de metales alcalinos (Glukhovsky, 1957). Dependiendo de los componentes del material de partida, Glukhovsky clasificó las mezclas en dos sistemas. Los sistemas activados alcalinamente del tipo **Me<sub>2</sub>O-Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O**, y los sistemas activados alcalinamente en presencia de cationes alcalino térreos **Me<sub>2</sub>O-MeO-Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O** (Caijun Shi, 2006).

En 1981, Joseph Davidovits publicó en Francia los resultados obtenidos con mezclas de metacaolín, piedra caliza y dolomita que denominó geopolímeros por su estructura polimérica y está relacionado con el sistema **Me<sub>2</sub>O-Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O**, definido por Glukhovsky (US Patente nº 4, 472, 1981). Para 1986, Pavel Krivenko investigó y publicó los resultados sobre los principios que rigen las propiedades físicas y mecánicas de los concretos de escoria activados alcalinamente (Krivenko, 1986). Este mismo año, junto con D. Roy y C Shi, publicaron el primer libro de activación alcalina en el 2006. En los últimos años, A. Palomo publicó en 1999 el primer artículo que señala la posibilidad de producir cementos con ceniza volante, que sean tecnológicamente competitivos (Palomo, Grutzeck & Blanco, 1999).

Lo más reciente es el informe presentado por el Comité Técnico de la RILEM sobre materiales activados alcalinamente (TC 224-AAM), representado por John L. Provis y Jannie S.J. van Deventer. En este se analiza el estado de arte en la tecnología de la activación alcalina, se adelantan recomendaciones de normalización de acuerdo con el conocimiento actual y se priorizan las aplicaciones relacionadas con la construcción (Provis & Van Deventer, 2014). Todos estos

aportes son solo un breve recorrido en torno a las investigaciones llevadas a cabo con los cementos activados alcalinamente. En la **tabla 1** se presenta una línea de tiempo los aportes e investigaciones más destacadas.

**Tabla 1** Acontecimientos históricos sobre los cementos activados con álcalis

Fuente: (Chao Li, 2010).

Purdon	1940	Alkali-slag combinations.
Glukhovskiy	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements.
Glukhovskiy	1965	First called "alkaline cements".
Davidovits	1979	"Geopolymer" term.
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized.
Forss	1983	F-cement (slag-alkali-superplasticizer).
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized.
Davidovits and Sawyer	1985	Patent of "Pyrament" cement.
Krivenko	1986	DSc thesis, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$ .
Malolepsy and Petri	1986	Activation of synthetic melilite slags.
Malek et al.	1986	Slag cement-low level radioactive wastes forms.
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared.
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown.
Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear wastes forms from alkaline mixtures.
Roy and Langton	1989	Ancient concretes analogs.
Majundar et al.	1989	$C_{12}A_7$ -slag activation.
Talling and Brandstetr	1989	Alkali-activated slag.
Wu et al.	1990	Activation of slag cement.
Roy et al.	1991	Rapid setting alkali-activated cements.
Roy and Silsbee	1992	Alkali-activated cements: an overview.
Palomo and Glasser	1992	CBC with metakaolin.
Roy and Malek	1993	Slag cement.
Glukhovskiy	1994	Ancient, modern and future concretes.
Krivenko	1994	Alkaline cements.
Wang and Scivener	1995	Slag and alkali-activated microstructure.
Shi	1996	Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag.
Fernández-Jiménez and Puertas	1997	Kinetic studies of alkali-activated slag cements.
Katz	1998	Microstructure of alkali-activated fly ash.
Davidovits	1999	Chemistry of geopolymeric systems, technology.
Roy	1999	Opportunities and challenges of alkali-activated cements.
Palomo	1999	Alkali-activated fly ash – a cement for the future.
Gong and Yang	2000	Alkali-activated red mud-slag cement.
Puertas	2000	Alkali-activated fly ash/slag cement.
Bakharev	2001–2002	Alkali-activated slag concrete.
Palomo and Palacios	2003	Immobilization of hazardous wastes.
Grutzeck	2004	Zeolite formation.
Sun	2006	Sialite technology.
Duxson	2007	Geopolymer technology: the current state of the art.
Hajimohammadi, Provis and Deventer	2008	One-part geopolymer.
Provis and Deventer	2009	Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.

## 2.2. Terminología de la activación alcalina

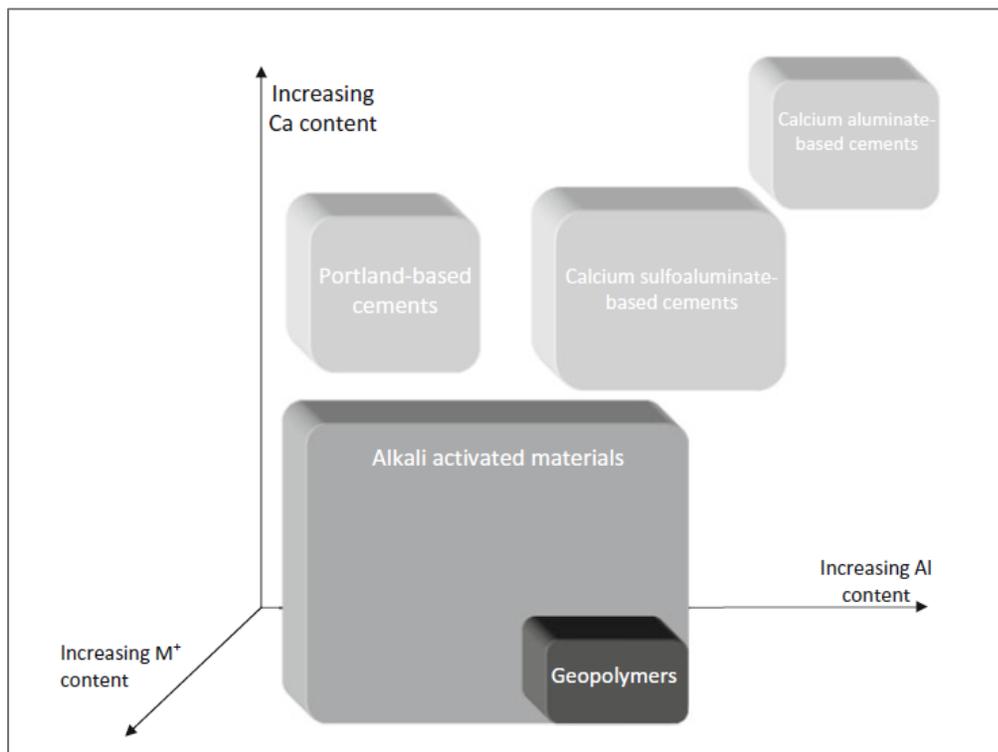
Es frecuente encontrar en la construcción del estado de arte diferentes nombres que se aplican a la descripción de la activación alcalina en general. Es así como Víctor Glukhovsky los llamó “cementos de suelo” (Glukhovsky, 1957), Van Wazer “polímero inorgánico” (JR, 1970), Rahier H “vidrio de aluminosilicatos de baja temperatura” (Rahier, Van Mele, & Wastiels, 1996), Krivenko “geocemento” (Krivenko, 1994; Mallicoat, 2005), Van Deventer “hormigón con polímero inorgánico” (Sofi, Van Deventer, & Mendis, 2007) Bao y “hydroceramicos” (Bao, Grutzeck, & Jantzen, 2005) y Davidovits “geopolímeros” (Davidovits, 1991). Esta variedad de nombres generan alguna confusión, pero en su generalidad describen esencialmente el mismo material. Si miramos con más detalle podemos tener mayor claridad.

Los materiales activados alcalinamente denominados (AAM), son la clasificación más amplia que abarca cualquier sistema aglutinante y se obtiene de la reacción de una fuente alcalina. Son compuestos químicos que tienen un carácter básico con potencial de hidrógeno superior a 7 y un precursor rico en aluminosilicatos de origen natural o artificial. La fuente alcalina es una sustancia soluble que suministra cationes de metales alcalinos que elevan el pH de la mezcla de reacción y acelera la disolución del precursor que, finalmente, lo transforma en un material con propiedades ligantes, compacto y de prestaciones mecánicas interesantes para la construcción.

Si se considera la naturaleza del material precursor basado en un sistema ternario CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, los cementos activados alcalinamente se pueden agrupar en dos categorías que difieren en los procesos de activación. Un primer grupo de materiales con un moderado contenido de calcio (CaO + SiO<sub>2</sub> > 70%), que requieren condiciones alcalinas relativamente moderadas, donde su principal producto de reacción es un gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) similar al obtenido en la hidratación del cemento Portland con un pequeño porcentaje de Al en su estructura

denominada (C-A-S-H) (Puertas, y otros, 2014). Un segundo grupo son los materiales con bajos contenidos de calcio que requieren unas condiciones de activación más agresiva con soluciones altamente alcalinas y temperatura entre los 60 a 200 °C, cuyo principal producto de reacción es un polímero alcalino inorgánico tridimensional (geopolímero) denominado gel N-A-S-H (Palomo, y otros, 2014).

Una forma altamente simplificada, en donde se consideran los componentes más críticos de los sistemas químicos, que conforman un hormigo se encuentra en la **figura 1**.



**Figura 1** Clasificación de AAMs.  
Fuente: (Provis & Van Deventer, 2014).

Aquí, los geopolímeros se muestran en la figura como un subconjunto de los AAM, con altas concentraciones de aluminio Al y bajos contenidos de calcio Ca. El sombreado más oscuro indica que requiere de mayores concentraciones de solución alcalina (sodio /potasio). Para propósitos prácticos, entenderemos la palabra geopolímero como polímeros y, por tanto, por analogía con los

polímeros orgánicos derivados del petróleo, se transforman, se someten a policondensación y se fijan rápidamente a baja temperatura, en pocos minutos. Pero son, además, polímeros GEO, es decir inorgánicos, duros, estables a temperatura de hasta 1250 ° C y no inflamables (Davidovits, 2005).

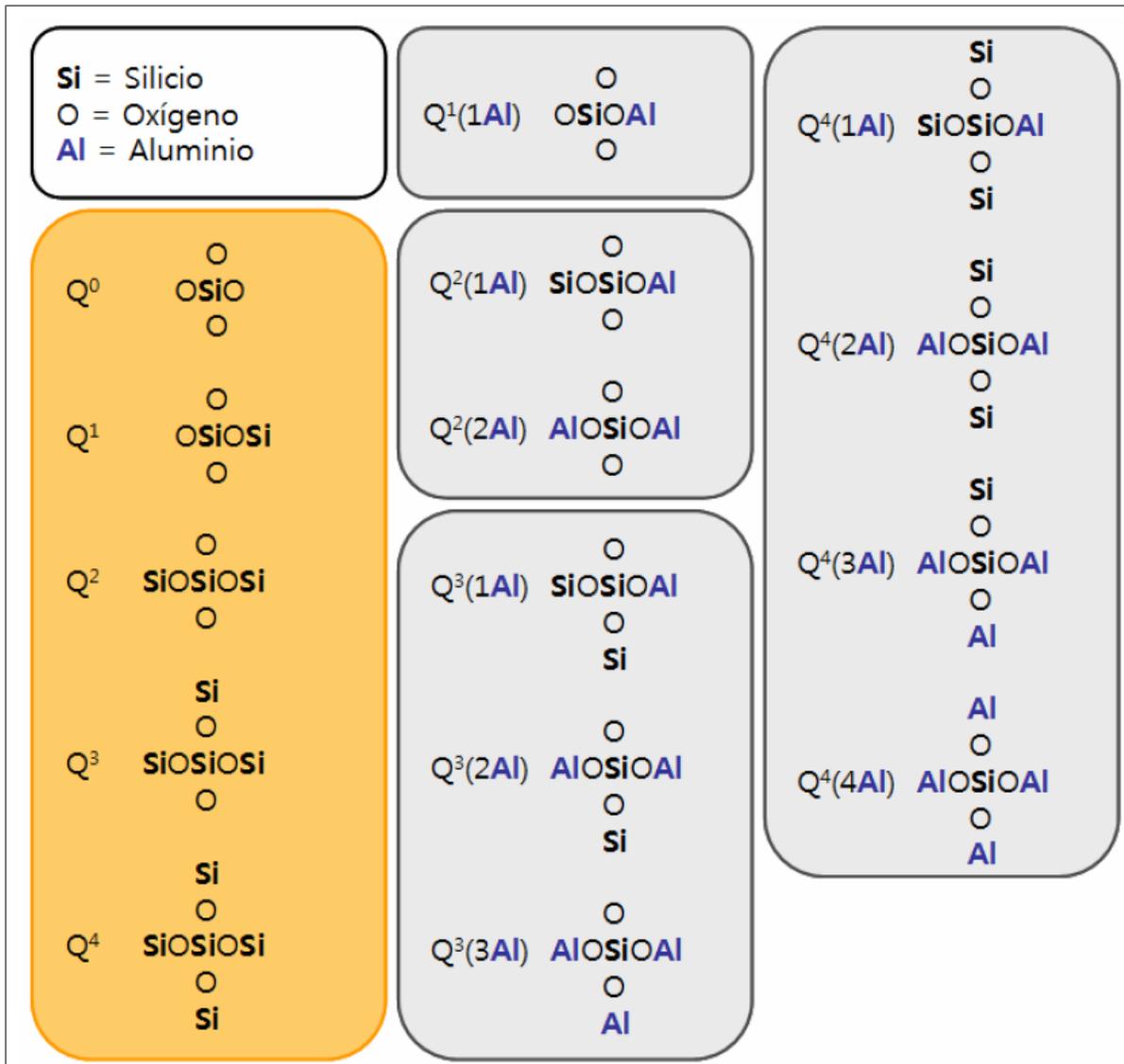
### **2.2.1. Activación alcalina en sistemas con moderado contenido de calcio.**

La activación de materiales con importantes contenidos de calcio y moderado contenido de silicio ( $\text{SiO}_2 + \text{CaO} > 70\%$ ), denominados sistemas  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ , requieren de condiciones alcalinas moderadas. Este sistema se representa fundamentalmente por la activación de la escoria granulada de alto horno. Los productos de reacción son similares a los que precipitan en la hidratación del cemento Portland, pero con una menor relación Ca/Si, hacen que su principal producto sea un gel C-A-S-H, con productos secundarios que incluyen hidrotalcita, calcita y fases de aluminato cálcico hidratado (AFm).

La microestructura de los geles formados durante la activación, que se detallará más adelante, ha sido estudiada por varios autores (Cong & Kirkpatrick, 1996; Fernández-Jiménez, Puertas, Sobrados, & Sanz, 2013; Haha, Le Saout, Winnefeld, & Lothenbach, 2011; Haha, Lothenbach, Le Saout, & Winnefeld, 2011; Mozgawa & Deja, 2009; Schilling, Roy, Eaton, Malone, & Brabston, 1994; J.A.C.S, 1992; Wang & Scrivener, 1995; Wang, 1995).

La nanoestructura del gel del cemento activado con escoria no es fácil de caracterizar debido a su naturaleza amorfa. Actualmente, la resonancia magnética nuclear es una técnica experimental interesante y útil para desarrollar modelos que permitan determinar la estructura de los distintos geles formados. Estudios de resonancia magnética nuclear mediante núcleos de silicio 29 y aluminio 27, han podido identificar los diferentes enlaces que forman los aluminosilicatos y se les

ha asignado nombre para su identificación. Esta nomenclatura se muestra en la *figura 2* (Lippmaa, Mägi, Samoson, Engelhardt, & Grimmer, 1980)



*Figura 2* Nomenclatura aluminosilicatos en RM.

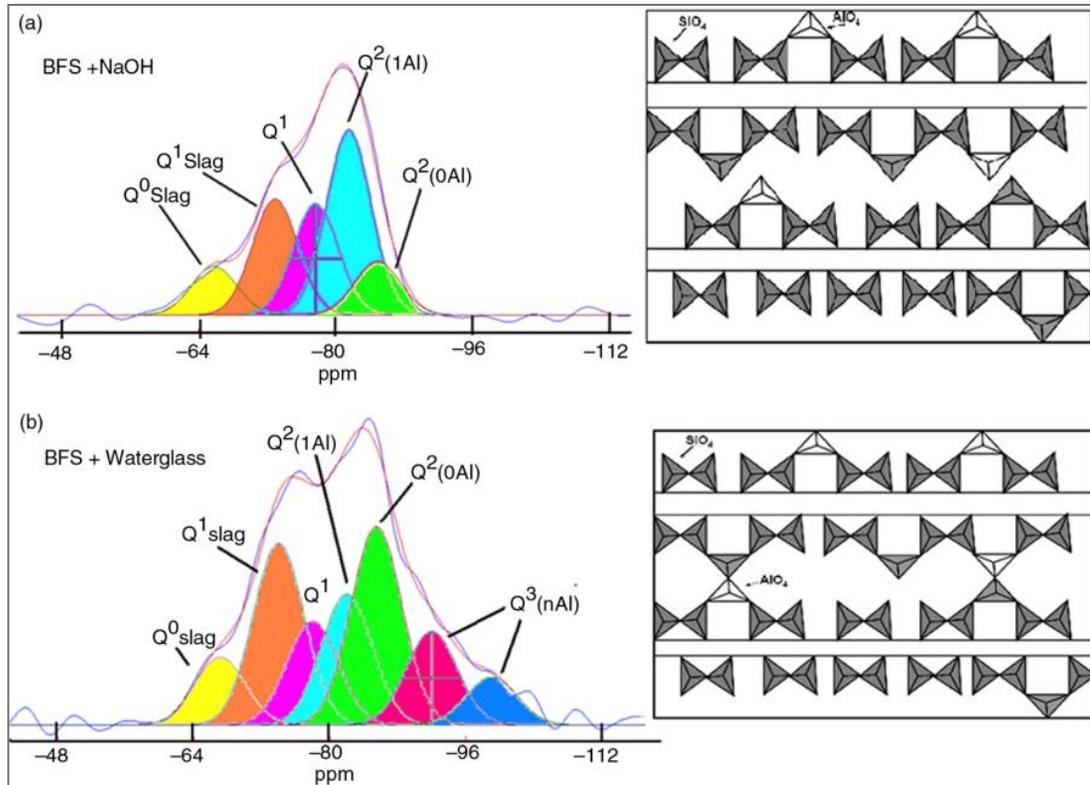
Los tetraedros de SiO<sub>4</sub> se representan con Q<sub>n</sub>, donde n indica el número de enlaces con otros tetraedros SiO<sub>4</sub>, tal y como se observa en el recuadro naranja. Así, Q<sub>0</sub> es un monosilicato lo cual significa que tiene un SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>. A los disilicatos Q<sub>1</sub> que corresponden a finales de cadena, a los grupos del medio Q<sub>2</sub>, a las ramificaciones con Q<sub>3</sub> y a las redes interconectadas con Q<sub>4</sub> (Thomas

& Klinowski, 1995). Los recuadros grises se interpretan de la misma forma, aunque la regla de Lowenstein (1954) establece que cuando los tetraedros están unidos por un oxígeno, solo uno de ellos puede ser ocupado por el aluminio (no hay enlaces Al-O-Al). Luego, el paréntesis indica el número de tetraedros de silicio que fueron reemplazados por aluminio.

Las señales que se obtienen en la resonancia nos permiten relacionarla con los diferentes enlaces que forman los aluminosilicatos.  $Q^0$  corresponde a la escoria o cemento anhídrido y, gracias a esto, podemos determinar el grado de reacción en el tiempo, las unidades  $Q^1$ ,  $Q^2$ , Y  $Q^3$ , no siempre son de silicio (pueden ser de aluminio que se encuentran como un tetraedro invertido en la cadena del silicato). Schilling (Schilling, Butler, Roy, & Eaton, 1994) a partir de estudios, propuso que el Al se recoge en el C-S-H del gel de la escoria activada. Demostró, además, que la absorción del aluminio depende de la concentración de álcalis, la temperatura y la humedad.

Richardson (Richardson & Groves, 1997) también estudió la absorción del Al en el gel C-S-H en las posiciones de puentes tetraédricos y propuso ecuaciones para calcular la longitud promedio de las cadenas de silicato, para el cemento Portland están de 3 a 5 eslabones, para la escoria activada con NaOH de 7 a 9 eslabones, y para la escoria activada con silicato de sodio de 6 a 11 eslabones. El contenido de Al es mayor en los cementos activados que en el cemento Portland.

Este modelo fue confirmado por Fernández-Jiménez (Fernández-Jiménez, 2000; Fernández-Jiménez et al., 2003) quien demostró la presencia de Al da geles con cadenas lineales más largas, con estas condiciones los geles C-S-H se convierten en C-A-S-H (ver *figura 3*).



**Figura 3** Modelo estructural para el contenido de Al del gel C-S-H.  
Fuente: (Fernández-Jiménez, 2000).

### 2.2.2. Activación alcalina en sistemas con bajo calcio.

Entre los materiales con bajo calcio más utilizados para elaborar cementos activados, encontramos la Ceniza Volante (CV) y el metacaolín (Mk). La activación de estos sistemas es mucho más reciente que la activación en la escoria, luego el conocimiento acumulado es algo menos desarrollado. Los materiales comúnmente utilizados como precursores para sintetizar geopolímeros son: arcillas calcinadas y cenizas volantes, las cuales han sido ampliamente estudiadas, de forma individual, como reemplazo parcial del cemento Portland ordinario. Las arcillas naturales calcinadas (como el caolín), son materiales que han sido analizados como precursores primarios de los geopolímeros.

La calcinación del caolín para transformarlo al estado metaestable se lleva a cabo alrededor de los 600-900°C, dependiendo de las impurezas presentes. Esta calcinación ocasiona la pérdida de los grupos -OH en la estructura (deshidroxilación), lo que origina la pérdida del orden de largo alcance; por lo que el compuesto se vuelve amorfo (Shvarzman, Kovler, Grader, & Shter, 2003), y se genera un estado de alta energía interna pues el aluminio sufre un cambio de coordinación octaédrica a tetraédrica.

Otro material recientemente utilizado es la ceniza volante (CV). Este es un residuo silico-aluminoso derivado de la combustión de carbón en plantas de generación de energía eléctrica y se recolecta mediante precipitadores electrostáticos. Existen dos tipos de cenizas volantes: clase F, que tiene un bajo contenido de calcio (< 5% peso de CaO) y clase C con alto contenido de calcio (>15% peso de CaO), según la norma ASTM C618. Las características de la CV dependen del tipo de carbón utilizado en la combustión y de la temperatura utilizada en el proceso, que es de aproximadamente 1600°C.

Para la activación de los aluminosilicatos es necesaria la utilización de soluciones muy concentradas, temperaturas relativamente bajas, desde temperatura ambiente hasta aproximadamente 90°C, las materias primas deben poseer un alto contenido de silicio y aluminio y al mismo tiempo, que presenten alta inestabilidad termodinámica (estructura amorfa). Para su activación se han empleado combinaciones de MOH con silicato de sodio o potasio y también por separado. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que los mejores resultados se obtienen usando una mezcla de activadores (Swanepoel & Strydom, 2002; Barbosa, MacKenzie & Thaumaturgo, 2000).

Un primer modelo que describe el proceso de activación alcalina propuesto por Glukhovsky en la década de 1950 (Purdon, 1940), se adapta a los sistemas tanto de bajo como de alto calcio. Este puede ser dividido en tres etapas:

**Destrucción/coagulación:** primera etapa del proceso de activación alcalina que se caracteriza por la disolución y/o ruptura de los enlaces Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si de la materia prima de origen silicoaluminoso, provocado por el incremento del pH en el medio acuoso. Xu & Van Deventer (2000; 2002) sugieren que se trata de una reacción química de hidratación, donde los iones hidroxilo hidrolizan la superficie de la fuente de silicoaluminato (Al-Si) y se disuelve una pequeña parte de Al y Si para formar sus respectivos monómeros.

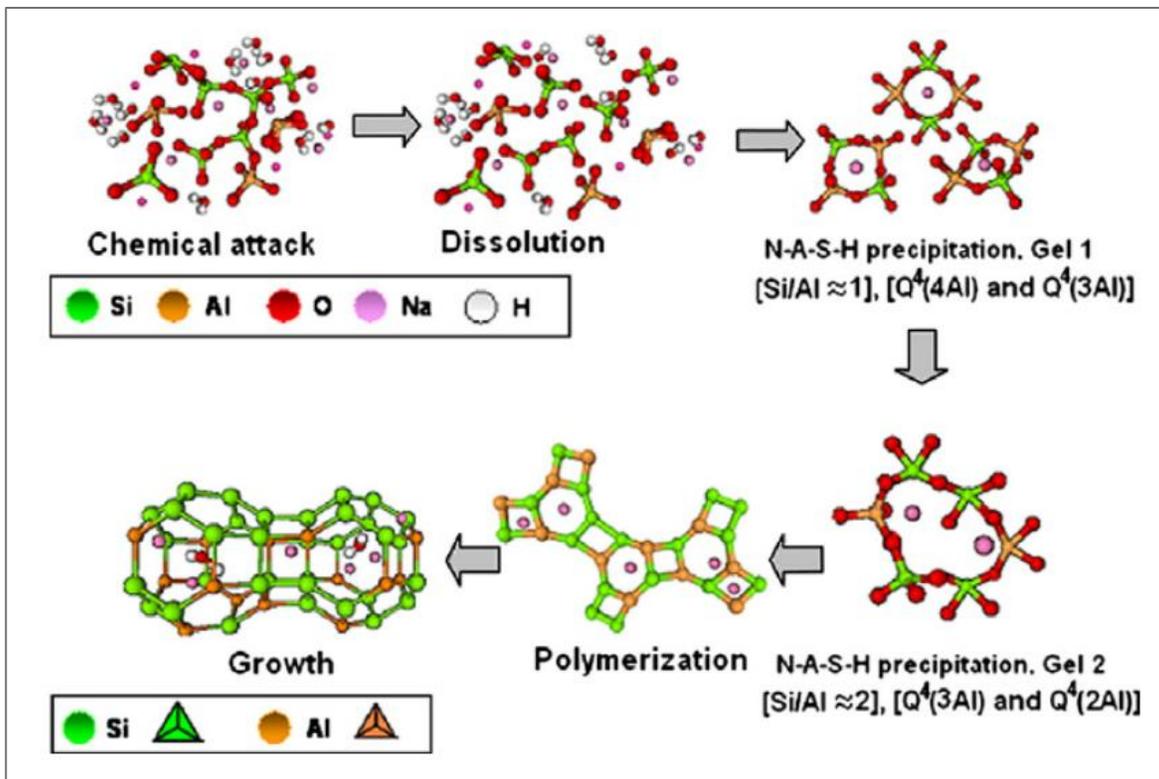
**Coagulación/condensación:** en esta segunda etapa, los productos disgregados se acumulan formando una estructura de coagulación, en la que se producen los procesos de policondensación, que es una polimerización que sigue un mecanismo de adición (enlace entre monómeros) – eliminación (moléculas de bajo peso en estado gaseoso que se separa del polímero en formación).

**Condensación/cristalización:** en esta etapa se genera el producto final de reacción. De esta manera, las partículas condensadas, así como el material silicoaluminoso sin reaccionar, se precipitan para formar el conglomerante activado alcalinamente.

A partir del modelo propuesto por Glukhovsky, Davidovits en 1994, propuso un modelo para los conglomerantes formados a partir de MK, basándose en los resultados que obtuvo por DRX de la materia prima y en los espectros de resonancia magnética nuclear (RMN de  $^{29}\text{Si}$  y  $^{27}\text{Al}$ ) de los compuestos formados. El investigador concluyó que la estructura geopolimérica está formada por una alternancia de átomos de Si y Al en los sitios tetraédricos pertenecientes a la estructura, y que el espacio formado entre estas estructuras es lo suficientemente grande para que los iones alcalinos ( $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ ) puedan alojarse, logrando así el equilibrio de las cargas (Davidovits, 1994).

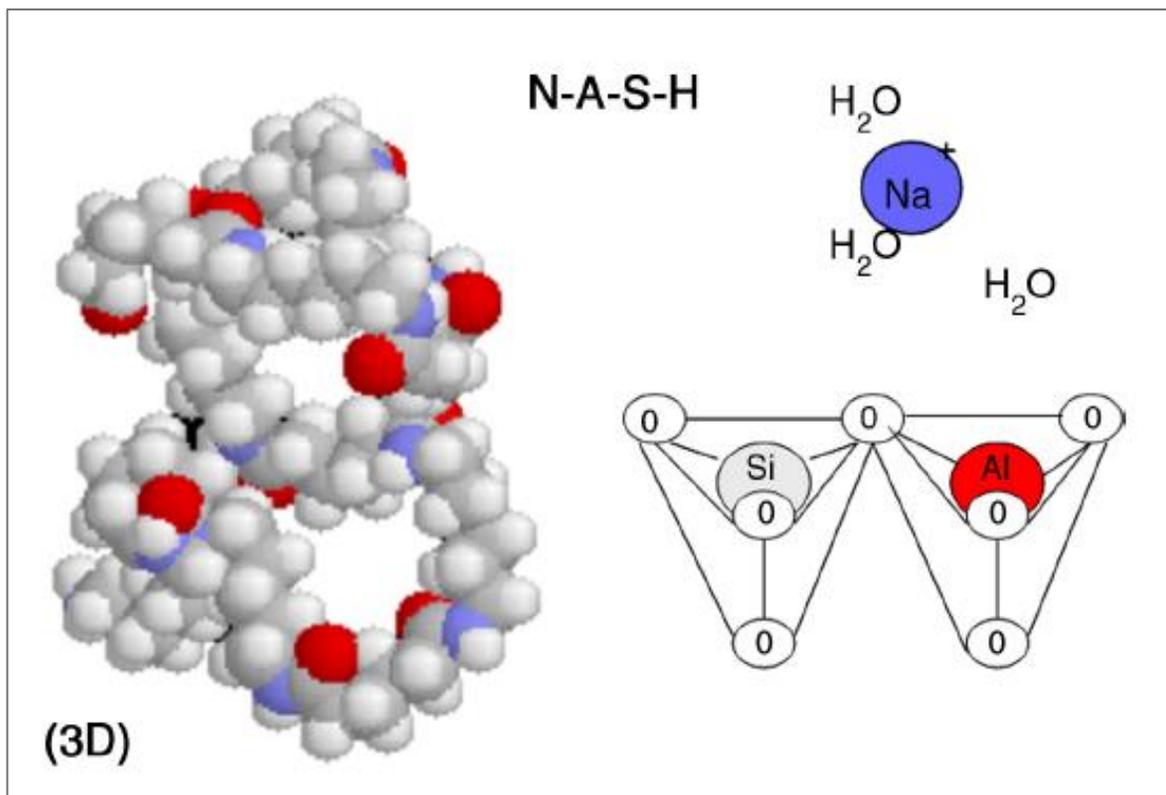
Por su parte, Duxson presenta un modelo (*figura 4*) donde se observan cada una de las etapas del proceso de geopolimerización, destacando el proceso de destrucción del material silicoaluminoso para formar productos del tipo Si-O-Al, que se acumulan y polimerizan para constituir los conglomerantes activados alcalinamente (Duxson et al., 2007).

Fernández-Jiménez (Fernández-Jiménez A. , Palomo, Sobrados, & Sanz, 2006) están de acuerdo con la formación de dos tipos de geles durante el proceso de activación alcalina, pero afirman que estas etapas de formación del gel están acopladas y ocurren simultáneamente. El gel 1 es un gel formado a tiempos muy cortos de reacción, donde su estructura está constituida por fases ricas en Al. En este gel, el Si tetraédrico está rodeado por cuatro aluminios tetraédricos (Q<sup>4</sup>(4Al)). Esto se debe a que los enlaces Al-O son más débiles que los Si-O, y, por lo tanto, se disuelven más rápidamente que el silicio.



*Figura 4* Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín  
Fuente: (Shi, Jiménez, & Palomo, 2011).

La estructura de los geles N-A-S-H (Aluminosilicato de sodio hidratado) y K-A-S-H (Aluminosilicato de potasio hidratado) generados en la activación del metacaolín, se caracterizan por una estructura tridimensional en el que el Si se encuentra en una variedad de entornos, con un predominio de (Q4) y (nAL) (n= 0, 1, 2, 3 o 4), los cationes  $\text{Si}^{4+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  se encuentran tetraédricamente coordinados y unidos por enlaces de oxígeno. La carga negativa en grupo  $\text{AlO}_4^-$  se neutraliza por la presencia de cationes alcalinos ( $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ ), un ejemplo del gel N-A-S-H se muestra en la **figura 5**. La estructura del gel puede variar significativamente dependiendo del grado de reacción, la temperatura y en particular de la presencia de sílice soluble en el activador (Palomo et al., 2014).



**Figura 5** Estructura tridimensional de un gel N-A-S-H  
Fuente: (Palomo et al., 2014).

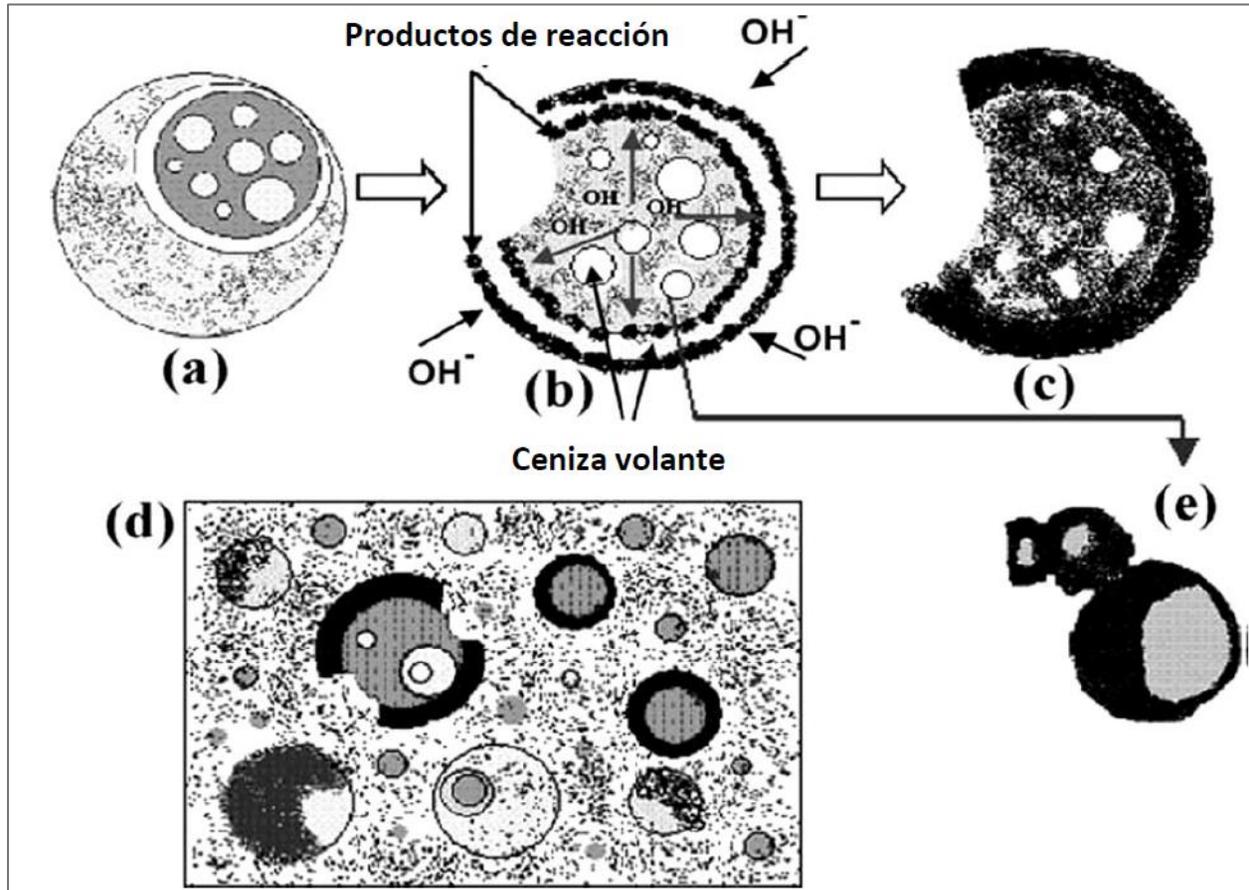
El estudio de sistemas geopoliméricos basados en CV se inicia con Wastiels (Wastiels, Wu, & Patfoort, 1993), a través de la incorporación de soluciones activantes, constituidas con diferentes proporciones de sílice y sodio. Esto permitió obtener materiales con un excelente desempeño mecánico y una elevada resistencia frente al ataque por ácidos. Más tarde, Van Jaarsveld (Van Jaarsveld, Van Deventer, & Schwartzman, 1999) estudió las características químicas de sistemas geopoliméricos de CV a través de microscopía electrónica de transmisión (MET), y resonancia magnética nuclear (RMN); esto, con el propósito de emplear este material para la inmovilización de metales pesados. Posteriormente, Lee W.K. (Lee & Van Deventer, 2003) reportó que la concentración de sílice soluble presente en la solución activante juega un rol importante en la naturaleza del gel formado y, por tanto, en el desempeño mecánico.

Las cenizas volantes suelen clasificarse como cenizas volátiles de bajo contenido de Ca o cenizas volantes de clase F y altas cenizas volantes Ca o cenizas volantes Clase C. La ceniza volante de clase F, se prefiere generalmente para la síntesis de hormigones geopolímeros, debido a la alta disponibilidad de sílice reactiva y alúmina. La activación alcalina de las cenizas volantes tiene lugar a través de una reacción exotérmica con disolución, durante la cual los enlaces covalentes (Si-O-Si y Al-O-Al) en la fase vítrea pasan a través de la solución.

Los mecanismos de activación de la CV como del Mk no se encuentran totalmente comprendidos. Fernández-Jiménez propuso un modelo de activación para la CV como el que se muestra en la **figura 6** (Fernández-Jiménez, Palomo, & Criado, 2004). En la **figura 6a**, se muestra el ataque químico inicial en un punto de la superficie de la partícula de CV, lo que posteriormente se expande y puede observarse en la **figura 6b**, exponiendo otras partículas de CV más pequeñas en el interior de la partícula grande, presentado en la **figura 6e**; por lo que la reacción emigra desde

el interior al exterior y del exterior al interior, hasta que la partícula de CV reacciona casi por completo (*figura 6c*).

El proceso descrito no se lleva a cabo de manera uniforme en la formación del gel geopolimérico, variando de un punto a otro en la matriz dependiendo de la distribución del tamaño de partícula y la composición local e inicial de la CV, así como del tipo y concentración del activador. De esta manera, diversas morfologías pueden existir en la pasta geopolimérica como partículas sin reaccionar, partículas semi-reaccionadas atacadas por la solución alcalina y los productos de reacción, como se muestra en la *figura 6d*.



*Figura 6* Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín  
Fuente: (Shi, Jiménez, & Palomo, 2011)

### 2.2.3. Geopolímeros

El término Geopolímero ha sido aplicado desde los años setenta a una clase de materiales sintetizados a través de la activación alcalina o silico-alcalina a temperaturas inferiores a los 200°C de materiales precursores, que están compuestos fundamentalmente por sílice y alúmina. Estos materiales fueron originalmente nombrados como “polisialatos”; 9 años después Davidovits los nombró “Geopolímeros”, término que hoy en día es ampliamente aceptado.

El elemento básico de un geopolímero es una cadena tetraédrica de silicio y aluminio unidos alternadamente, compartiendo átomos de oxígeno que forman la red sialato, la cual presenta una estructura con carga balanceada por medio de la presencia de iones positivos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) para compensar la carga del  $\text{Al}^{+3}$ . La unidad básica monomérica es un sialato, que se representa con  $\text{M}_n \text{-(SiO}_2\text{)}_z \text{-AlO}_2 \text{)}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ . Esta es la fórmula empírica para polisialatos, M es el catión como el  $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$ , n es el grado de policondensación donde, z es 1, 2,3 y w es la cantidad de agua enlazada (Davidovits,1991). La estructura sialato lleva una carga negativa debido a la sustitución de  $\text{Si}^{4+}$  con  $\text{Al}^{3+}$ . El exceso de carga se ve compensado por un catión de metales alcalinos ( $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$ ).

Basándose en el número de átomos de silicio sustituidos por el aluminio, se cree que hay tres diferentes tipos de estructuras monoméricas -Si-O-Al- que define los geopolímeros. Davidovits, en 1999, clasificó los tipos de polímeros -Si-O-Al- en Polisialato (-Si-O-Al-O-), Polisialato-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-), Polisialato-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), para dar paso a la producción de geopolímeros. Estos diferentes tipos de geopolímeros se presentan en la **Tabla 2**, donde la relación Si: Al afecta directamente en las propiedades del material.

**Tabla 2** *Clasificación y uso de Geopolímeros*  
Fuente: (Davidovits, 2002).

Clasificación	Estructura	Aplicación
	<b>monomérica</b>	
Polisialato ( <b>PS</b> ) Si:Al= 1:1	Mn-(Si-O-Al-O)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento térmico.</li> <li>• Resistencia al fuego.</li> </ul>
Polisialatosiloxo ( <b>PSS</b> ) Si:Al= 2:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Refractarios para fundición.</li> <li>• Cementos de alto rendimiento.</li> <li>• Residuos tóxicos.</li> <li>• Compuestos resistentes al fuego.</li> </ul>
Polisialatodisiloxo ( <b>PSDS</b> ) Si:Al= 3:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos resistentes al fuego.</li> <li>• Material de herramientas para su uso en el rango de temperatura de 600-1000 °C</li> </ul>

Los cationes como el Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> ocupan huecos en el arreglo polimérico, balanceando la carga negativa de la estructura provocada por el Al<sup>3+</sup> en coordinación tetraédrica. Las unidades tetraédricas formadas se distribuyen al azar en la estructura, generando desorden a largo alcance, el cual confiere a estos materiales sus propiedades de estabilidad térmica, química y mecánica. La presencia de cationes alcalinotérreos, particularmente Ca<sup>2+</sup>, puede contribuir significativamente con el incremento en las propiedades mecánicas, debido a la formación de productos más estables y resistentes. Entre los factores que afectan las propiedades finales de los geopolímeros, se destacan la naturaleza de la fuente de aluminosilicato, el tipo y concentración del ión alcalino empleado, la relación Si/Al del sistema, el contenido de agua, las condiciones de curado, entre otras.

La nueva terminología fue la clave para el desarrollo exitoso de nuevos materiales. Para el usuario, los geopolímeros son polímeros, Así, y por analogía con los polímeros orgánicos

derivados del petróleo, ellos se transforman por policondensación y conjuntamente se estabilizan rápidamente en pocos minutos a baja temperatura. Pero ellos son, además, geo-polímeros, es decir, inorgánicos, sólidos y estable a temperatura de hasta 1250 ° C y no inflamable (Davidovits, 2002). Veamos en el siguiente cuadro (tabla 3) algunas aplicaciones que ha tenido los geopolimeros en los últimos años.

**Tabla 3** Clasificación y uso de Geopolímeros  
Fuente: (Davidovits, 2002).

<p>Paneles de madera resistentes al fuego</p>	
<p>Fusibles eléctricos fabricados con PS-Na</p>	
<p>Ladrillos, precursor oligosialato de Na</p>	
<p>Artículos decorativos de PSS-K</p>	
<p>Compósito de geopolímero (C/SiC/GP) para aplicaciones en ingeniería aeroespacial</p>	
<p>Material de reparación en el pavimento de PSS-K-Ca</p>	
<p>Carrocería de carros Fórmula uno (compósito)</p>	

### 2.3. Precursores para cementos activados alcalinamente

La expresión material aglutinante designa sustancias que endurecen independientemente y enlazan otros materiales sólidos, confiriendo cohesión y resistencia al sistema (Coutinho, 1988). Los aglutinantes pueden aglomerar sólidos o unirlos a lo largo de sus superficies de contacto. Esta expresión comprende materiales de construcción de naturaleza y propiedades distintas, con diferentes aplicaciones.

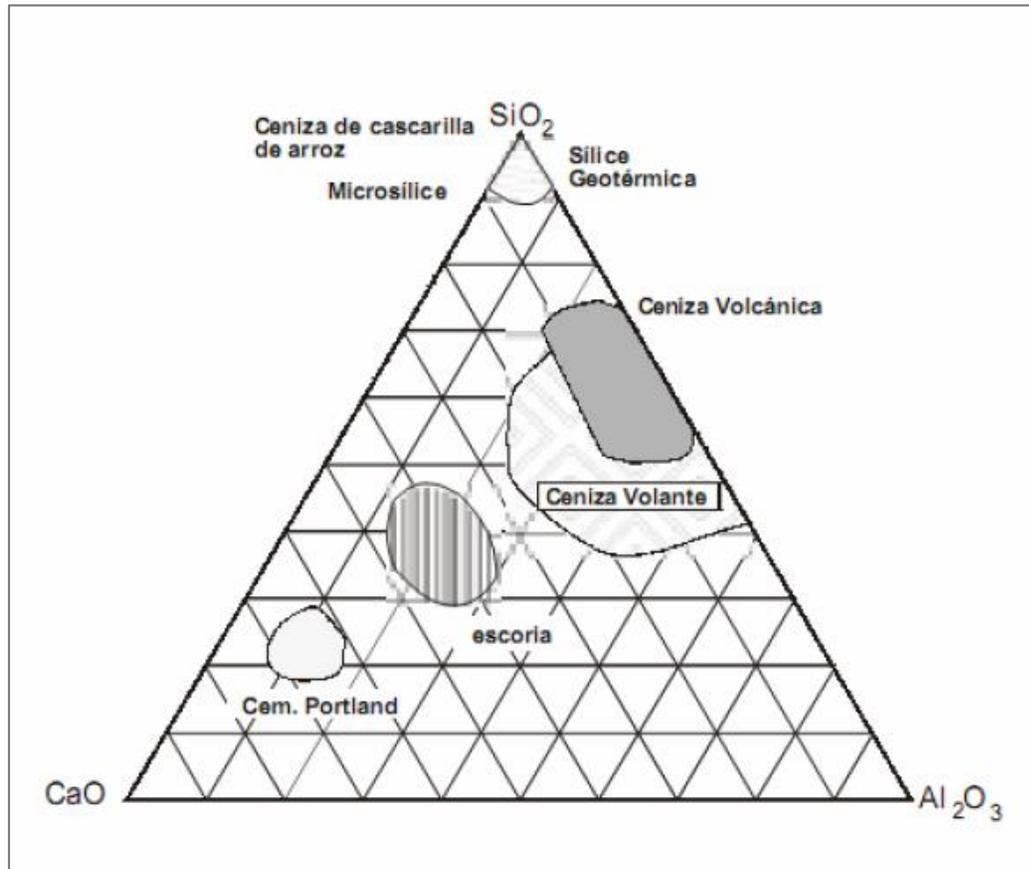
Los aglutinantes hidráulicos son sustancias que reaccionan químicamente con el agua, mediante la conversión del sistema aglutinante de agua con consistencia plástica en una matriz sólida, tienen la capacidad de aglomerar otros materiales sólidos. Estos cementos hidráulicos se componen principalmente de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y cal ( $\text{CaO}$ ). La composición química-mineralógica específica de cada aglutinante, determina su reactividad con el agua y, por lo tanto, sus propiedades de unión.

Los aglutinantes hidráulicos se clasifican, según su reactividad, en:

- **Activos:** si tienen la capacidad de reaccionar espontáneamente con agua como la Cal hidráulica, y el cemento Portland.
- **Latente:** si requieren la presencia de un activador alcalino adecuado para presentar una extensión de hidratación significativa, como la escoria de alto horno.

La *figura 7* representa esquemáticamente la composición de los aglutinantes hidráulicos y otros materiales que, a menudo, están asociados con ellos en el diagrama de fases de  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Desde esta, es de afirmar que la producción del clínker Portland demanda un elevado consumo de materias primas no renovables y requiere un importante consumo de energía (874Kcal/kg de clínker de cemento Portland), además de generar elevadas emisiones de  $\text{CO}_2$

(alrededor de 1 tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínker producido) debido al proceso de descarbonatación de la caliza y al consumo de combustibles fósiles para la generación de energía.



**Figura 7** Diagrama de fase CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: sistema hidráulico Ligantes  
Fuente: (Escalante, 2002).

Si se piensa en reducir los impactos ambientales causados por la producción del clínker, el uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar un poco la situación. Por otro lado, se sabe del problema de durabilidad detectada para hormigones y morteros a base de cemento Portland (Metha, 2007). Luego, la utilización de adiciones minerales, que no es nueva en conglomerantes a base de cemento Portland, pueden ser fuente de CaO y contribuir a la reducción de la porosidad, lo que aumentaría la vida útil de las estructuras, puesto que la gran parte de los problemas de ataques físicos y químicos en los hormigones se derivan de aspectos relacionados con la porosidad del mismo. Otra de las alternativas estudiadas en la actualidad para reducir los problemas

medioambientales y aumentar la durabilidad de las estructuras, es el uso de conglomerantes cementantes alternativos con bajas emisiones de CO<sub>2</sub>, tales como cementos sulfatados, cementos belíticos y cementos activados alcalinamente.

En los últimos años, la comunidad científica ha puesto un gran interés por los cementos activados alcalinamente, las investigaciones han demostrado que se pueden obtener propiedades mecánicas y de durabilidad similares e incluso superiores al cemento Portland (Palomo et al., 2014; Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011; Shi, Jiménez, & Palomo, 2011). Además, la materia prima en la producción de los cementos activados alcalinamente son los materiales a base de SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que pueden ser encontrados fácilmente en la superficie terrestre tanto en forma de materiales naturales como en forma de residuos agrícolas y/o industriales.

Si pensamos inicialmente en las adiciones minerales que se pueden utilizar en la preparación de morteros y hormigones con cemento Portland, encontramos las escorias de diversos procesos metalúrgicos, la ceniza volante, las arcillas calcinadas, la ceniza de cáscara de arroz, el bagazo de caña de azúcar, entre otros. Un aspecto importante en su uso, es entender un poco las propiedades al ser adicionadas, es por esto que debemos comprender que las adiciones se pueden clasificar en tres grupos:

**Adiciones minerales puzolánicas:** son aquellos materiales que, si bien no presentan actividad cementicia por sí solos, al ser finamente molidos y mezclados con el agua, reaccionan con el hidróxido de calcio presente en la pasta del cemento Portland a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Estos materiales se componen, en su mayoría, de sílice (SiO<sub>2</sub>) y/o alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), pueden ser residuos agrícolas, industriales o bien tratarse de productos sintetizados, como es el caso del metacaolín, la ceniza volante de tipo F (clasificación según la norma ASTM C618), el humo de sílice, la Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA) o el residuo

de catalizador de craqueo catalítico del petróleo (FCC). La actividad puzolánica depende de: naturaleza de las fases vítreas; finura y superficie específica de la puzolana; contenido en puzolana; temperatura y tiempo de curado; relación cal/puzolana (o cemento/puzolana) de la mezcla; relación agua/conglomerante.

**Adiciones minerales hidráulicas:** son aquellos materiales que poseen comportamiento autocementante, el cual se ve potencializado en presencia de la cal (o de cualquier ambiente fuertemente alcalino). Dentro de esta clasificación se pueden encontrar materiales como las escorias de alto horno y también algunas cenizas volantes con elevado contenido en calcio.

**Adiciones minerales inertes:** son las que no presentan ningún tipo de reacción con el cemento Portland, siendo utilizadas únicamente como carga mineral.

Las mejoras en las propiedades de los conglomerantes a base de cemento Portland, por las adiciones minerales, se relaciona con reacciones físicas y químicas. La reacción física se refiere al aumento en la compacidad de las mezclas, como consecuencia de la inclusión de partículas finas provenientes de la adición mineral. Sumado a esto, la presencia de partículas finas contribuye al aumento de la velocidad de hidratación del cemento Portland, puesto que estas partículas actúan como puntos de nucleación, permitiendo que las partículas de cemento continúen su proceso de hidratación (Martínez, 2008).

La reacción química, también conocida como reacción puzolánica, es una reacción entre las fases amorfas de la adición mineral y el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland. Esta reacción forma productos hidratados con características similares a los generados por la hidratación del cemento Portland, con una ligera reducción en la relación Ca/Si (Duchesne & Be, 1995).

### 2.3.1. Escoria granulada de alto horno.

Antiguamente, se sabía que haciendo una gran hoguera sobre tierras ricas en minerales de hierro se podía extraer este metal. También, se tenía conocimiento de que avivando dicha hoguera mediante una fuerte corriente de aire, el rendimiento y la velocidad del proceso mejoraban notablemente. En la actualidad, se ha determinado con exactitud el mecanismo químico de este proceso: el carbón empleado directamente como combustible u obtenido durante la combustión, se mezcla con el oxígeno de los óxidos de hierro, para dejar, como residuo, una masa esponjosa de este metal.

El hierro, en presencia del oxígeno y de la humedad del aire, se oxida, formándose sobre su superficie una capa rojiza, conocida con el nombre de óxido. Este proceso es, en realidad, el inverso del de su obtención, donde ocurren las reacciones que transforman el óxido de hierro presente en el mineral en hierro metálico. La reducción del óxido de hierro con monóxido de carbono para obtener hierro metálico, es una reacción redox o de óxido-reducción que se caracteriza por el movimiento de electrones desde una sustancia que cede electrones (reductor) a una sustancia que capta electrones (oxidante). De acuerdo con la ecuación 1:



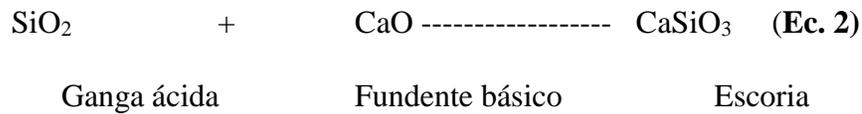
El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pierde oxígeno y se reduce y el CO es el agente reductor gana oxígeno y se oxida. En esta reacción el monóxido de carbono es el agente que lleva a cabo la reducción del mineral de hierro para obtener el hierro metálico, de modo que, al monóxido de carbono se le denomina el agente reductor. Cuando  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se reduce con monóxido de carbono, se retira oxígeno del mineral hierro y se agrega al monóxido de carbono, el cual se oxida por la adición del oxígeno para dar dióxido de carbono.

En la producción de hierro se requieren fundamentalmente tres materiales: el mineral de hierro presente en las arcillas y rocas que contienen anfíboles, piroxeno y micas. Los minerales de hierro más corrientes son la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Estos minerales se encuentran en la naturaleza acompañados de otros materiales que contienen en lo fundamental sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ); en minería se conoce como ganga y es el material que se desecha al extraer el mineral.

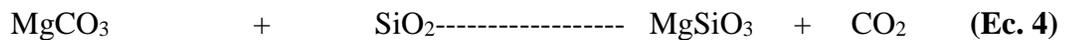
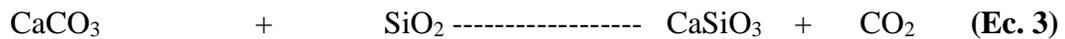
Un segundo elemento que actúa como combustible y agente reductor de los óxidos de hierro, es, principalmente, el coque y con menos frecuencia el carbón mineral. El coque, es una forma de carbón que se obtiene como residuo en la destilación de la hulla (carbón mineral), presenta muchas ventajas, bajo contenido de cenizas, alto poder calorífico, porosidad, resistencia considerable al aplastamiento, desgaste y bajo costo. El carbón vegetal se obtiene por medio de la destilación seca de la madera en hornos especiales, la ausencia de azufre y el bajo porcentaje de ceniza son sus ventajas, su desventaja es la baja resistencia y el alto costo. El carbón vegetal se utiliza solamente para obtener hierro fundido de alta calidad.

Finalmente, se requiere de un material fundente, que son sustancias que se introducen en el alto horno, donde, al fundirse con las gangas de los minerales y con la ceniza del combustible, producen escorias. Cuando los minerales contienen impurezas de arena y arcilla, se utiliza como fundente la caliza; cuando la composición de la ganga es calcárea, se pueden emplear como fundentes sustancias que contengan sílice, cuarzo, arenisca y cuarcitas. Su misión es la de combinarse con la ganga (ácida o básica) que acompaña al mineral para formar la escoria, sustancia vítrea que a alta temperatura es un líquido insoluble en el metal fundido por lo que se puede separar fácilmente (De la Llata, 2001).

Si la ganga es un óxido ácido, como la sílice SiO<sub>2</sub>, el fundente usado es un óxido básico como la cal (CaO) (ecuación 2):



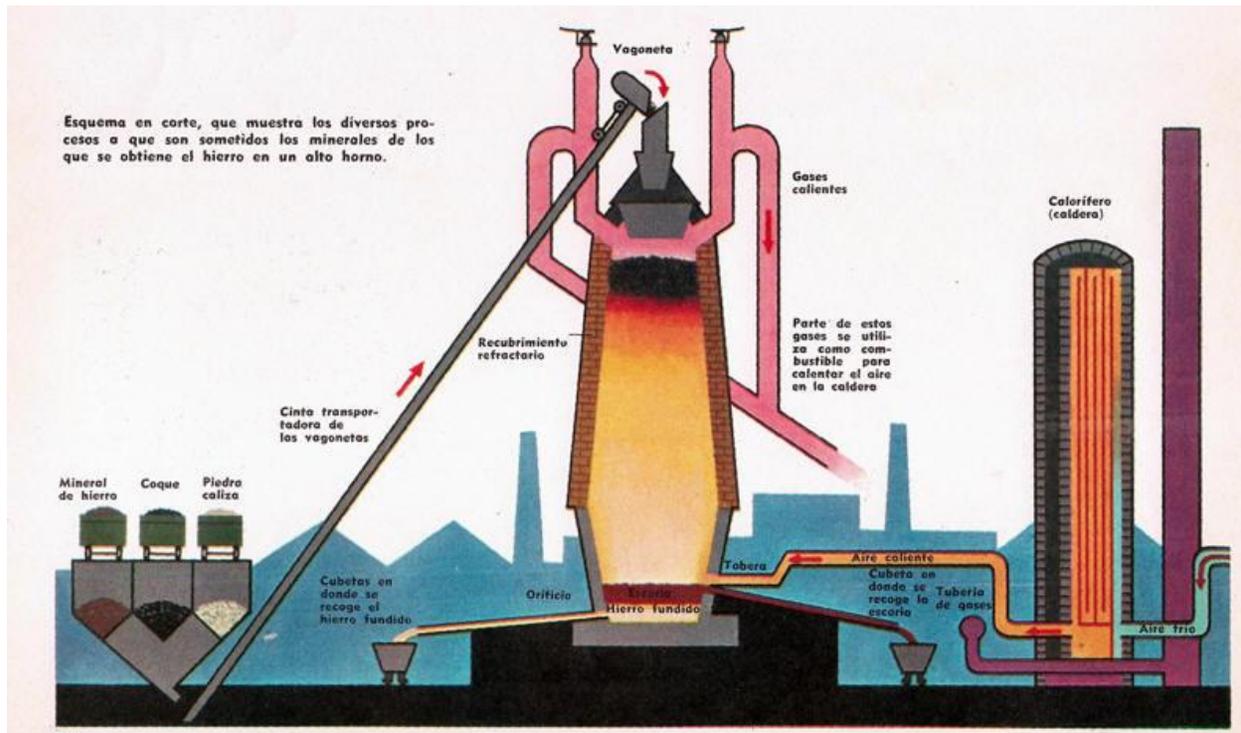
Si la ganga es un óxido básico, como CaCO<sub>3</sub> o MgCO<sub>3</sub>, el fundente usado será un óxido ácido como la sílice (SiO<sub>2</sub>) (ecuación 3 y 4):



La producción de escoria de alto horno resulta, como su denominación lo establece, de un alto horno, que permite un flujo y volumen importante de aire caliente que incrementa el rendimiento y la velocidad del proceso de fundición. Si se utiliza coque como combustible, su altura puede ser hasta de 35 metros y, para cuando emplea carbón vegetal, puede ser hasta de 20 metros. El proceso se inicia cuando la carga de mineral, coque y piedra caliza se vierte mecánicamente en una tolva especial situada en el extremo superior del horno, que termina en una campana cónica a una temperatura de 200°C, como se muestra en la **figura 8**. De abajo hacia arriba se mueven los productos de combustión del coque y el aire caliente (500 a 1000 °C).

Al descender, el coque se calienta por los gases calientes que ascienden hasta una temperatura de 1600°C a 1750°C. Este incremento en la temperatura se presenta cuando la mezcla gaseosa caliente, compuesta del monóxido de carbono, bióxido de carbono y el nitrógeno del aire que sube, entra en contacto con los materiales de carga que descenden y se combina; formando

anhídrido carbónico. Esta reacción es exotérmica, lleva consigo la producción de calor y como resultado tiene lugar una elevación de la temperatura. Esto crea diferentes temperaturas en el horno a medida que se van dando las reacciones.



*Figura 8* Esquema del proceso de fundición en un alto horno  
 Recuperado de: <http://historiaybiografias.com/altohorno>.

El anhídrido carbónico que se forma asciende, encontrando a su paso nuevas remesas de coque, mediante el cual, en estas condiciones de temperatura, se reduce a monóxido de carbono. Las moléculas de monóxido de carbono pueden, a su vez, combinarse con otros átomos de oxígeno, procedentes del óxido de hierro, para formar, nuevamente, anhídrido carbónico, con transformación simultánea de hierro metálico. Según se va deslizado hacia abajo, el mineral pierde gradualmente una parte de su oxígeno, cediéndolo a los gases que ascienden. El contacto entre el coque y el óxido ferroso, en esta zona, da como resultado la formación neta de hierro metálico. Cuando se alcanza la temperatura de 800° C (hacia la mitad del alto horno y a unos 10

metros por encima de las toberas), el hierro toma una forma esponjosa. A esta temperatura la caliza comienza a perder anhídrido carbónico, según:



Carbonato cálcico ----- óxido cálcico + Anhídrido carbónico

Al mezclarse el hierro con el carbón disminuye su punto de fusión, por lo que, en la mitad inferior del horno, el hierro y la escoria comienzan a fundirse y a deslizarse hacia su base. La proporción en la reducción que sufren las impurezas en esta etapa es determinante en las características del hierro que se quiere obtener. En esta zona, los elementos reducidos se disuelven en el hierro, mientras que los que permanecen en el estado de óxidos pasan a formar parte de la escoria como es el caso del azufre, presente como sulfuros fundidos y que son absorbidos por la escoria. El hierro formado contiene del 3 al 4,5 % de carbono y va depositándose en el fondo del alto horno. La mayoría de las impurezas del mineral han sido separadas mediante la piedra caliza.

En efecto, al fundirse ésta, se combina con las impurezas para formar la escoria, sustancia vítrea que también se desliza hacia el fondo del horno. La escoria no es tan densa como el hierro fundido y flota sobre su superficie, donde se recoge a través de un orificio situado por encima del depósito de hierro. Los gases que se desprenden del alto horno salen por la parte superior, a través de tuberías especiales. Se filtran para extraer de ellos el polvo que contengan y se utilizan, generalmente, para calentar calderas y otros hornos (Malishev, Nikolaiev, & Shuvalov, 1979). Los altos hornos producen hierro fundido y no acero. Éste tiene un menor contenido en carbono que la fundición obtenida, y en su fabricación se le añaden, además, otros minerales que le comunican sus propiedades especiales.

La composición y características de la escoria obtenida en este proceso, dependerán de las materias primas utilizadas en el horno, como el mineral de hierro, el material calizo o dolomítico

utilizado y las cenizas del combustible utilizado (esto se mencionará más adelante). Un aspecto que es determinante en su uso es la historia térmica de la escoria. En particular, cuando se utilizan técnicas de enfriamiento en el momento que salen a una temperatura aproximada de a 1500°C, nos permiten obtener materiales con distintas características de utilización claramente diferenciadas (Ruíz & Vaquero, 1989).

**Escoria cristalizada:** es la que se obtiene por el enfriamiento lento en un recipiente al aire libre, el material se cristaliza formando distintos componentes, quedando un pequeño porcentaje en estado vítreo (amorfo). Este material tiene poca o ninguna propiedad cementante, pero tiene propiedades mecánicas similares a las de basalto y pueden ser utilizados como agregados. Los poros internos que posee les confiere una gran permeabilidad, lo que lo hace un material muy apropiado para la construcción de capas granulares de subbase o drenantes.

**Escoria granulada:** es la que se enfría rápidamente dejándola caer sobre un potente chorro de agua fría, descomponiendo la escoria en pequeñas partículas alveolares con aristas cortantes de aspecto similar a la arena, por esta razón se llama granulada. Al llegar a su estado sólido, sus átomos no han tenido tiempo de orientarse a su forma cristalina por la rapidez del enfriamiento. Una escoria granulada, normalmente, tiene un 85 a 95% en peso de fase vítrea y son éstas las que tienen propiedades cementantes.

**Escoria peletizada:** se obtiene mediante la combinación de dos procesos, la dispersión mecánica mediante un tambor giratorio y simultáneamente la granulación directamente con agua a alta presión (alrededor de 0,6 MPa), provocando así expansión y enfriamiento. Al evitar la contaminación de la atmósfera por ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el agua se pulveriza desde las boquillas; y, si el sistema está totalmente cerrado con un sistema de ventilación

el cual me permite controlar el tamaño de las partículas y su grado de vitrificación, el consumo de agua es menor y su bajo contenido de humedad resulta en menos energía para el secado.

**La escoria expandida:** se obtiene añadiendo a la escoria fundida una pequeña cantidad de agua. El vapor producido por el contacto del agua con la escoria, produce una espuma plástica que, una vez enfriada y mediante un proceso de machaqueo, proporciona un árido ligero.

### **2.3.2. Escoria granulada de fósforo.**

El fósforo elemental se produce mediante la fundición de una mezcla de roca de fosfato, sílice y el coque en un horno eléctrico. El fosfato se puede reducir para formar fósforo elemental sin la adición de cualquier roca de sílice. Sin embargo, la adición de roca de sílice hace que la masa fundida en el fluido del horno y el fosfato se pueda reducir más fácilmente (Barber, 1975). Los minerales de fosfato siempre contienen algunas impurezas tales como fluorapatita, piedra caliza fosfatada, arena y arcilla. Aquellos compuestos no reducidos estarán presentes en la escoria. La producción de una tonelada de fósforo elemental genera, aproximadamente, diez toneladas de escoria, lo que hace de este material una fuente para ser utilizada.

La escoria de fósforo está formada principalmente de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$  y sus componentes menores dependerán de la naturaleza de los minerales de fosfato utilizado, estos pueden ser 2,5-5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,2-2,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0,5-3% de  $\text{MgO}$ , 1-5% y 0-2,5% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (óxido de fósforo). La escoria puede enfriarse ya sea con el aire del ambiente o a través de presión de agua. En el primer caso, sus componentes serán principalmente cristalinos y no presentará ninguna propiedad cementicia, solo se puede triturar para usar como agregado.

Para el segundo caso, sus componentes serán en un 98% amorfo y, debido a la alta viscosidad, tendrán propiedades cementicias latentes, pero menos reactivas que la escoria granulada de alto horno, a edades tempranas, debido a su menor contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y la presencia

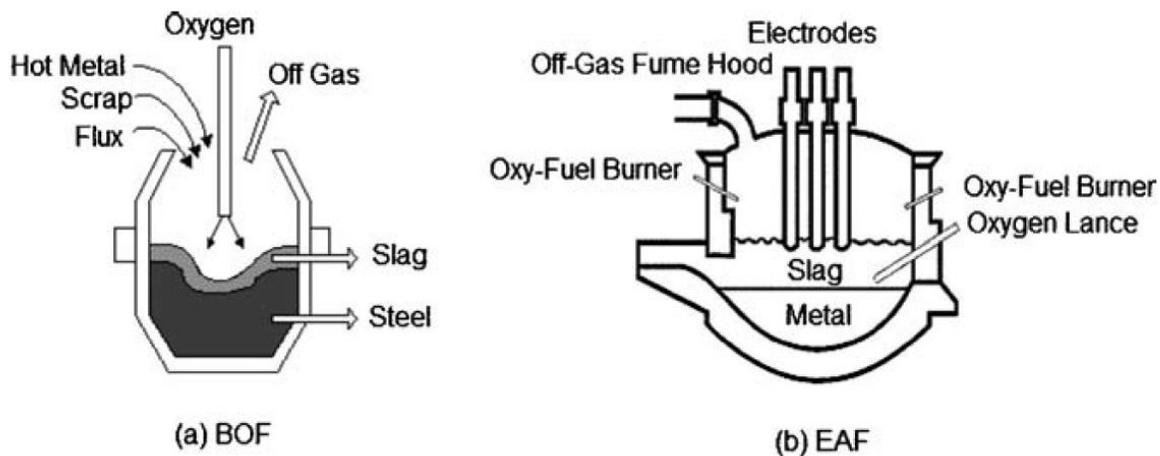
de óxido de fósforo (Caijun & Yinyu, 1989). Si una parte de los materiales silíceos utilizados como fundente se sustituye con la bauxita el contenido de  $Al_2O_3$  será similar a la escoria de alto horno y la reactividad hidráulica de la escoria de fósforo granulado será comparable con la de escoria granulada de alto horno (Sun, Lui, & Wei, 1984).

Las propiedades cementantes latentes de escoria granulada de fósforo pueden ser activadas de manera muy eficaz con el uso de álcalis. Los morteros de escoria de fósforo, activados con silicato de sodio ( $Na_2SiO_3$ ), exhiben una resistencia a la compresión de 80 MPa a los 28 días y lo más interesante es que la presencia de fosfatos solubles no afecta el desarrollo fraguado ni la resistencia.

### **2.3.3. Escoria de acero**

La escoria de acero es un subproducto de la conversión de hierro en acero en un horno que puede ser de oxígeno básico (BOF), o la fusión de la chatarra para producir acero en un horno de arco eléctrico (EAF). En el primer proceso se carga al horno con el metal caliente y con el fundente, que constan de cal ( $CaO$ ) y cal dolomítica, se inyecta el oxígeno a alta presión, éste se combina y elimina las impurezas en la carga. Las impurezas se componen de carbono como el monóxido de carbono gaseoso, silicio, manganeso, fósforo y algo de hierro en forma de óxidos, que se mezclan con la cal y la cal dolomítica para formar escoria de acero.

En el segundo proceso, en vez de utilizar el metal caliente, se utiliza chatarra de acero "en frío", el horno de arco eléctrico que es una estructura en forma de caldera, con una tapa desmontable, con tres electrodos de grafito que calientan el horno, pasan a través de la tapa. Una corriente eléctrica que atraviesa los electrodos, genera calor, logrando fundir el desecho. Durante el proceso de fusión, se añaden otros metales (ferroaleaciones) al acero para darle la composición química requerida. En la *figura 9* se ilustran los hornos BOF Y EAR (Shi, 2004).



**Figura 9** Esquema a) Horno oxígeno básico (BOF) b) horno arco eléctrico (EAF)  
Fuente: (Shi, C, 2004 (84))

La escoria de acero debe ser enfriada para que tenga propiedades aglutinantes. Su composición química es muy variable de lote a lote, el tipo de materias primas, la fundición realizada, las condiciones del horno etc. En la **tabla 4** se muestra la composición química para diferentes tipos de escoria de acero (Shi, 2004).

**Tabla 4** Composición química de las escorias de acero  
Fuente: (Shi, 2004).

<i>Components</i>	<i>BOF</i>	<i>EAF (carbon steel)</i>	<i>EAF (alloy/stainless)</i>	<i>Ladle</i>
SiO <sub>2</sub>	8–20	9–20	24–32	2–35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–6	2–9	3.0–7.5	5–35
FeO	10–35	15–30	1–6	0.1–15
CaO	30–55	35–60	39–45	30–60
MgO	5–15	5–15	8–15	1–10
MnO	2–8	3–8	0.4–2	0–5
TiO <sub>2</sub>	0.4–2	N/A	N/A	N/A
S	0.05–0.15	0.08–0.2	0.1–0.3	0.1–1
P	0.2–2	0.01–0.25	0.01–0.07	0.1–0.4
Cr	0.1–0.5	0.1–1	0.1–20	0–0.5

La presencia de C3S, C2S, C4AF y C2F, contribuye a la propiedad cementante de la escoria de acero. El contenido de C3S en la escoria de acero es mucho más baja que en el cemento Portland. Por lo tanto, la escoria de acero puede ser considerada como un cemento débil de Portland. Varios estudios (Li & Wu, 1992; Petropavlovsky, 1987; Shi, Wu, & Tang, 1993) han confirmado que el uso de activador alcalino puede aumentar la resistencia, sobre todo las resistencias iniciales, y otras propiedades del cemento de escoria de acero. Además, no solo puede mostrar muy alta resistencia, sino resistencia a la corrosión (Bin, Wu, & Tang, 1989; Petropavlovsky, 1987).

#### 2.3.4. Puzolanas

De acuerdo con la norma ASTM 618 (2003) una puzolana se define como un "material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso, sino que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxidos de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementosas"

Estos materiales, compuestos mayoritariamente de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y/o alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), se pueden clasificar en dos grandes grupos: las puzolanas naturales y artificiales. Las primeras se refieren a materiales que muestran reactividad puzolánica sin ningún procesamiento; se clasifican bajo las siguientes categorías:

- **Vidrios volcánicos:** derivado de rocas volcánicas en el que el vidrio amorfo se produce a partir de la fusión. Cenizas volcánicas, piedra pómez y pumicite son algunos ejemplos.
- **Tobas volcánicas (zeolitas):** es un vidrio volcánico formado por la acción de las aguas subterráneas bajo alta temperatura. Muchos factores, tales como las características del vidrio volcánico, las propiedades de las aguas subterráneas, la temperatura y la presión, afectan el proceso de zeolitización.

- **Silíceas:** por lo general, se forman a partir de la precipitación de sílice en solución o de los restos de organismos. Los materiales comunes son tierra de diatomeas, piedra de diatomeas, ópalo y calcedonia.

Las puzolanas artificiales se dividen en dos categorías en función de su origen - "subproductos industriales" y "materiales quemados". Escoria de alto horno, cenizas volantes, humo de sílice, escoria de cobre y escoria de níquel son típicos subproductos de la industria del hierro. Los "materiales quemados", hace referencia a aquellos que tienen reactividad puzolánica sólo después de la calcinación, por ejemplo: arcilla quemada, quema de esquisto, cascarilla de arroz quemada y bauxita quemada.

La reactividad de las adiciones minerales puzolánicas debe ser evaluada con base a dos parámetros principales: la cantidad de hidróxido de calcio combinado con la puzolana y la velocidad a la que se consume dicha cal. Estos parámetros están directamente relacionados con la naturaleza y calidad de la puzolana. La actividad puzolánica depende de:

- Naturaleza de las fases vítreas.
- Finura y superficie específica de la puzolana.
- Contenido en puzolana; temperatura y tiempo de curado.
- Relación cal/puzolana (o cemento/puzolana) de la mezcla.
- Relación agua/conglomerante.

A continuación, se realiza una breve descripción de los minerales puzolánicos utilizados en la elaboración de morteros y concretos.

- **La ceniza volcánica:** hace referencia a partículas de roca y minerales con tamaños inferiores a 2mm (diferente al material piroplástico), que se forman durante las erupciones volcánicas de forma violenta; al liberarse los gases, por descompresión el magma se

aproxima a la superficie terrestre y produce la fragmentación del material en pequeñas partículas. También, ocurre cuando las erupciones explosivas entran en contacto con aguas subterráneas y abruptamente las convierte en un material puzolánico, o cuando el magma llega a la superficie de manera que los gases volcánicos disueltos en la roca fundida se expanden (explotan) en el aire extremadamente rápido.

- **La piedra pómez:** se origina durante una erupción explosiva de gases volcánicos disueltos en la porción líquida de magma que se expanden rápidamente para crear una espuma; la parte líquida de la espuma se solidifica rápidamente manteniendo su estado amorfo por encima del suelo. La piedra pómez se compone, principalmente, de fase vítrea y no es una mezcla de minerales. El uso principal es como agregado grueso de características livianas y puede ser un buen material puzolánico, destinado a mejorar las condiciones térmicas y acústicas de los morteros y hormigones.
- **Las zeolitas:** son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos, preferentemente de sodio y calcio (Clarke, 1980), cuyas características son el poseer una estructura micro porosa que le confiere propiedades adsorbentes, así como una gran capacidad de intercambio catiónico debido a un desequilibrio de cargas que es función de la relación Si y Al. Las zeolitas naturales se forman a lo largo de millones de años por la alteración de cenizas volcánicas en aguas alcalinas que a alta presión se cristalizan, tal como en las fuentes hidro-termales o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas. La mayoría de las fuentes de zeolitas pueden ser encontradas en uno de los seis ambientes

geológicos: salino o lagos alcalinos, suelos alcalinos, diagenético, sistema abierto, hidrotermal y sedimentos marinos (Clifont, 1987).

Se ha examinado su reactividad puzolánica y frente a diferentes tipos de zeolitas presenta altas resistencias, con excelentes resultados en la durabilidad, relacionado con la obtención de una matriz cementicia muy densa (Feng, 1993; Guo & Liang, 1980; Neville, 1996). Se considera que los geopolímeros son una fase amorfa metaestable de precursores zeolíticos que se pueden convertir más bien en una fase cristalina definida (zeolitas), siempre que las condiciones y las concentraciones de reactivos sean adecuadas.

- **La Ceniza volante (CV):** es un residuo que se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por flujos gaseosos de hornos alimentados por carbón pulverizado, como ocurre en las termoeléctricas. Son conocidas como una puzolana artificial que molidas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. En la ASTM C618 (2003) se describen algunas especificaciones físicas y químicas para la utilización de la ceniza volante como adición mineral en hormigones. En esta norma se hace una diferenciación entre dos tipos de cenizas volantes: Clase F, correspondiente a las cenizas con bajos contenidos en calcio y obtenidas por la combustión de carbón antracítico o bituminoso; Clase C, las cuales presentan carácter hidráulico con alto contenido en calcio, y se generan por la quema de carbón subbituminoso o lignito.

El grado de reactividad y composición de la ceniza volante depende fundamentalmente del tipo de carbón empleado, del proceso de transformación durante su combustión, tipo de horno o caldera, velocidad de enfriamiento y sistema de captación. La activación alcalina de cenizas volantes es un proceso químico por el que el componente

vítreo de este subproducto industrial es transformado en un material cementoso compacto conocido como geopolímero. Actualmente, existen un gran número de investigaciones sobre el grado de reacción, la composición química, la microestructura y prestaciones mecánicas de este material (Criado, Fernández-Jiménez, De La Torre, Aranda, & Palomo, 2007; Fernández-Jiménez et al., 2006; Palomo, Alonso, Fernández-Jiménez, Sobrados, & Sanz, 2004; Provis & Van Deventer, 2009).

- **El humo de sílice:** es un subproducto del proceso de obtención del silicio metálico y del ferrosilicio. En el proceso de fabricación del silicio metálico, que tiene lugar a temperaturas superiores a los 2000°C, se genera un humo que contiene micropartículas esféricas de dióxido de silicio en estado amorfo. Estas pequeñas partículas de SiO<sub>2</sub>, quedan atrapadas en los filtros que sirven para controlar la contaminación del aire, son denominadas humo de sílice o microsíllice. Este residuo presenta un elevado contenido en sílice (superior al 85%), alta superficie específica y estructura amorfa. Se trata de una puzolana muy reactiva debido a su riqueza en sílice amorfa y a su finura; de modo que, su efecto puzolánico en el hormigón se puede observar a los pocos días de curado (Velandia, Bernabeu, & Balbuena, 2006). Es utilizado en proporciones de entre 5 y 12 % del peso del material cementante empleado para estructuras de concreto que requieren elevadas resistencias y/o permeabilidad, pero pueden ocasionar poca manejabilidad.
- **El metacaolín (Mk):** es un material cementante suplementario, con una forma muy irregular, de elevada finura, compuesto de aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas que varían entre 700-850°C; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina a amorfa. Fundamentalmente, su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y

reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. El uso del metacaolín como sustitución parcial del cemento en morteros y hormigones ha sido muy investigado en los últimos años.

Las investigaciones muestran que el metacaolín mejora las propiedades mecánicas, reduce la permeabilidad dificultando el transporte de agua y la difusión de iones, que pueden llevar al deterioro del hormigón (Alonso & Palomo, 2001; Li, Sun, & Li, 2010; Siddique & Klaus, 2009).

- **Las escorias no ferrosas:** se refieren a las que resultan de la producción de plomo, zinc, níquel y cobre. La mitad del total de la escoria no ferrosa se obtiene de la producción de níquel, un tercio de la producción de cobre y el resto de la producción de zinc. Se trata principalmente de óxidos de sílice, hierro y magnesio (90-95%), la presencia de CaO y MgO en general es bajo. Estos materiales con esta composición presentan propiedades puzolánicas (Roper, Kam, & Auld, 1983; Douglas & Mainwaring, 1985). Cuando el contenido de CaO se incrementa, puede presentar propiedades cementantes (Krivenko, Skurchinskaya, & Sultanov, 1984; Deja & Malolepszy, 1994); y, cuando son activados alcalinamente, pueden bajo condiciones normales presentar resistencia a la compresión de 40 a 80 MPa (Roper, Kam, & Auld, 1983).

Es importante señalar que la escoria granulada de alto horno, escoria granulada de fósforo y escoria de acero tienen la propiedad cementante, los demás materiales son puzolánicas. Es así

como, se centra la atención en las escorias granuladas de alto horno que no se mencionaron en este apartado, pero que hacen parte fundamental del trabajo desarrollado.

## **2.4. Composición y activación de la escoria granulada de alto horno**

La escoria de alto horno es un producto vítreo formado como resultado de la combinación de óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), presente en el mineral de hierro y cenizas de azufre en el coque con óxidos básicos ( $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ ), en la piedra caliza o dolomita utilizado como fundentes, a altas temperaturas ( $1600^\circ\text{C}$ ); después se baja rápidamente la temperatura. Aquí se detallan sus características, activación y productos de reacción.

### **2.4.1. Propiedades físicas**

La escoria granulada de alto horno sin procesar tiene el tamaño de la arena 0.6mm, el porcentaje de finos se encuentra entre el 5 y 10%. La fracción mayor a 5mm se caracteriza por la presencia de elementos inertes de color oscuro y gran dureza que no están vitrificados sino cristalizados. La densidad aparente varía entre 0.5 y 1.5  $\text{Kg/m}^3$ , y el peso específico es aproximadamente de 2.86  $\text{g/cm}^3$ . Su contenido de agua varía entre un 10 a 25%. Cuando están finamente molidas presentan una finura Blaine de 4000 a 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Diversos estudios han mostrado que la finura es un factor clave en la reacción de la escoria, tanto para el desarrollo de la fuerza como para su microestructura. Wang (Wang, Scrivener, & Pratt, 1994) y Puertas (Puertas, 1995) han demostrado que la finura óptima para la producción de materiales activados alcalinamente AAM se encuentra entre 4000 y 5500  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Por su parte, Brough & Atkinson (2002), identificaron que el uso de escoria granulada de alto horno con una mayor finura promueve el desarrollo de resistencias a la compresión más altas, lo que es consistente con el aumento de la reactividad del material en partículas de menor tamaño. Sin embargo, el tiempo de fraguado puede ser fuertemente afectado por la finura.

### 2.4.2. Composición química

La escoria granulada de alto horno (BFS), está compuesta fundamentalmente de SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO, la cantidad en que se presenta depende fundamentalmente de la composición química de mineral de hierro, de la caliza y el coque utilizado en el proceso y las condiciones de operación del horno. La BFS tiende a fraguar y reaccionar con el agua, entre los factores que pueden modificar esto se incluyen la composición química, el contenido de vidrio y la finura. Si se considera la composición química, existen parámetros tales como el coeficiente de basicidad  $(CaO + MgO / SiO_2 + Al_2O_3)$  y el coeficiente de calidad  $(CaO + MgO + Al_2O_3) / (SiO_2 + TiO_2)$  (Wang et al., 1994; Talling & Brandstetr, 1989).

Sin embargo, no siempre hay una buena correlación entre la fuerza mecánica de AAM y estos parámetros. En general, BFS amorfo con relaciones CaO / SiO<sub>2</sub> entre 0,5 y 2; proporciones Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiO<sub>2</sub> entre 0,1 y 0,6 serán considerado adecuado para la activación alcalina (Talling & Brandstetr, 1989). En la **tabla 5** podemos observar la composición típica de una escoria granulada de alto horno.

**Tabla 5** Composición típica de las EGAH  
Fuente: (Wang, Scrivener, & Pratt, 1994).

COMPUESTO	MEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.25	0.50
MgO	5.99	3.63	8.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.29	10.26	16.01
SiO <sub>2</sub>	33.48	31.96	37.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.00	0.34
SO <sub>3</sub>	0.04	0.0	0.19
K <sub>2</sub> O	0.70	0.44	0.98
CaO	42.24	37.92	44.38
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.49	0.65
MnO	0.64	0.34	1.31
FeO	1.24	0.29	9.32
S <sup>2-</sup>	0.94	0.68	1.25
F <sup>-</sup>	0.16	0.06	0.31
Cl <sup>-</sup>	0.019	0.003	0.050
P x C	0.42	0.0	1.04

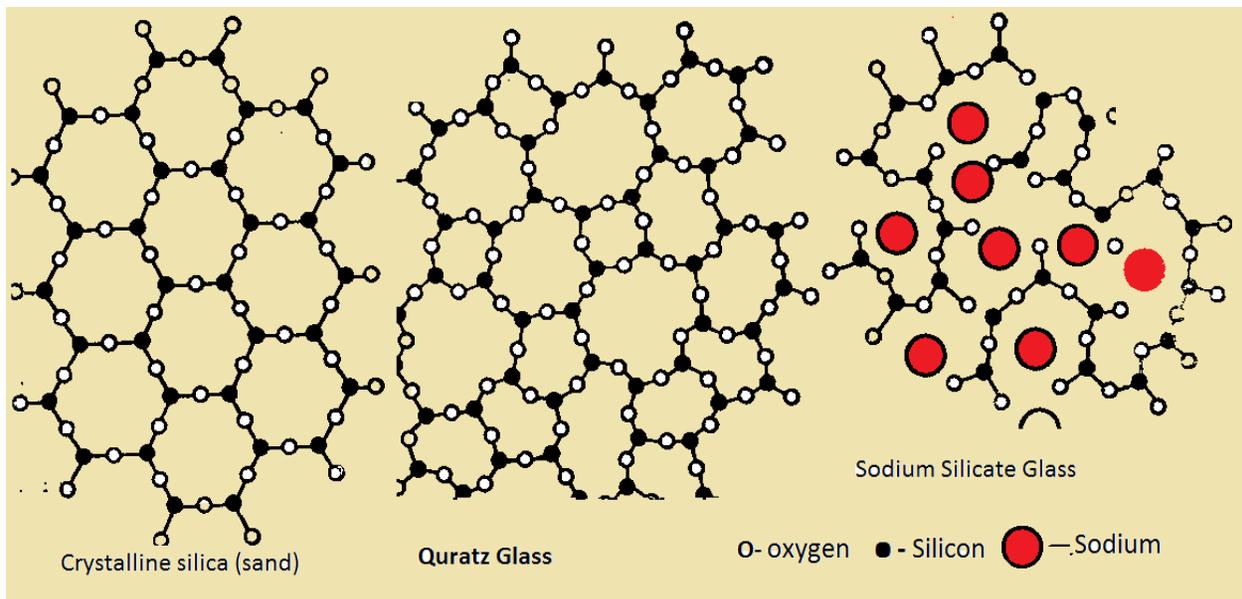
Douglas (1990) en un estudio realizado, encontró que las resistencias a la compresión a 28 días de BFS activadas con silicato con diferentes contenidos de MgO (9, 12 y 18 % en peso de escoria), son tres veces más altas con el 18% que con 9% en peso de MgO. Al igual que, otro estudio más reciente realizado por Ben Haha (Haha, Lothenbach, Le Saout, & Winnefeld, 2011), en los que era identificable que un aumento del contenido de MgO condujo a una reacción más rápida y resistencias a la compresión como consecuencia de la formación de mayores cantidades de productos de tipo de hidrotalcita. Pero cuando se activó con NaOH, solo se observaron ligeras variaciones en la fuerza como una función del contenido de MgO.

En BFS con diferentes contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (entre 7 y 17 % en peso de la escoria), se observó que el aumento del contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la BFS reduce la reacción en los primeros tiempos de curado, y, en consecuencia, disminuye la resistencia a la compresión de los ligantes activados (Haha, Lothenbach, Le Saout, & Winnefeld, 2012). Esto se asoció con una reducción en la relación de Mg/Al en la hidrotalcita formada en el aglutinante. Mientras que cuando la BFS es activada con mayor contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ocurre un aumento de la incorporación de Al en el producto tipo C-(A) –S-H. Sin embargo, después de 28 días de curado no había diferencias significativas tanto estructurales como mecánicas entre aglutinantes con diferente contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### **2.4.3. Composición mineralógica**

El primer parámetro estructural para caracterizar la reactividad de la escoria es la relación que hay entre la fase vítrea y cristalina. La estructura de una escoria vítrea puede ser descrita usando un marco tetraédrico bidimensional de SiO<sub>4</sub>, representada esquemáticamente en la **figura 12**. Teniendo presente la teoría de redes propuesta por Zachariasen (1932) los componentes de un vidrio se pueden clasificar en tres grupos: (1) formadores de red, (2) modificadores de red y (3)

los compuestos intermedios. Los formadores de red se caracterizan por pequeños radios iónicos, están rodeados por cuatro átomos de oxígeno, constituyendo una red tridimensional más o menos desordenada a través de tetraedros. Las energías de enlace entre estos formadores de red y átomos de oxígeno son normalmente superiores a 335 KJ / mol; el Si es un ejemplo típico de formadores de red en la BFS. Cuanto mayor sea el contenido de los formadores de red, mayor es el grado de condensación del cristal.



**Figura 10** Representación bidimensional de la estructura cristalina y vítrea

Fuente: <http://asdn.net/asdn/chemistry/images/struct.png>. Mayo/ 17

Los modificadores de red tienen número de coordinación de 6 u 8 y tienen grandes radios iónicos. Las energías de enlace entre los modificadores de red y átomos de oxígeno son por lo general menos de 210 KJ / mol. El Na, K y Ca son modificadores comunes de la red BFS. Los compuestos intermedios pueden actuar como ambos los formadores y modificadores de la red. Los metales anfóteros como el Al y Mg son típicos en BFS; su número de coordinación es 4 cuando actúan como formadores de red y 6 como modificadores de la red. Sus energías de enlace con átomos de oxígeno varían desde 210 a la 335 KJ / mol. Teniendo en cuenta las energías de enlace

de formadores y modificadores de red, se puede entender que cuantos más formadores de red hay, menos reactivo es el vidrio.

El Si es el típico formador de red de los vidrios. En las escorias se puede presentar como tetraedros  $\text{SiO}_4^{4-}$ , grupos  $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$  o cadenas de otros polímeros, tales como  $\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$ ,  $\alpha$ -wollastonita o  $\beta$ -wollastonita  $(\text{SiO}_3)_n$  (Teoreanu, 1991). Las valencias negativas de estos grupos aniónicos están neutralizadas por las valencias positivas de los cationes, llamados modificadores de red. En la **figura 12**, el sodio (en rojo) también puede ser un ion  $\text{Ca}^{2+}$  que es un típico modificador de red en coordinación octaédrica.

El grado de polimerización de los tetraedros  $\text{SiO}_4^{4-}$  disminuye al aumentar la proporción de modificadores de red, lo cual quiere decir que, a mayor cantidad de estos, mayor desorden estructural y, por tanto, mayor reactividad. El  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  son óxidos anfóteros, es decir, se pueden encontrar como  $\text{AlO}_4^{5-}$  y  $\text{MgO}_4^{6-}$ , actuar como formadores de red o como  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y actuar como modificadores de red. Si actúan como modificadores el Mg y el Al, la cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  es elevada, impidiendo la polimerización de los tetraedros  $\text{SiO}_4^{4-}$ , lo que hace que el sistema sea menos estable y aumente notablemente su reactividad hidráulica. Otros autores (Pork, 1971) consideran que cuando el Al actúa como formador de red (coordinación 4) es altamente eficaz, desde el punto de vista hidráulico, ya que los tetraedros  $\text{AlO}_4^{5+}$  tienen uniones más débiles que los tetraedros  $\text{SiO}_4^{4-}$  y, por esto, son más fáciles de disolver.

En términos generales, se piensa que cuanto más desordenada sea la estructura de la escoria, mayor será su hidraulicidad, pero algunos investigadores consideran que una pequeña porción de fase cristalina incrementa la reactividad puesto que al iniciar una cristalización esto genera más desorden. Las mayores resistencias se alcanzan cuando los constituyentes cristalinos están distribuidos homogéneamente en la fase vítrea y actúan como centros de nucleación en el proceso

de hidratación. Sersale (1992) piensa que una cantidad moderada de fracción cristalina en la escoria, puede ser considerada como micropartícula de escoria no reactiva que actúa como barrera para impedir la propagación de las microfisuras, lo que puede mejorar la resistencia.

Otro aspecto que se puede considerar, es el grado de condensación de los formadores de red, que se determina con el número de átomos de oxígeno no puente y las unidades estructurales dentro de la estructura vítrea. El grado de condensación de los tetraedros SiO<sub>4</sub> en un material vítreo se puede calcular con la **ecuación 6**.

$$f_{si} = \frac{SiO_2}{Me_2O + MeO + 3Me_2O_3 + 2MeO_2 + 5Me_2O_5} \quad (\text{Ec.6})$$

De acuerdo con la ecuación, el grado de condensación de la escoria se puede clasificar en:

- Escoria tipo ortosilicato con un grado de condensación de 0.25-0.286; consiste en tetraedros de SiO<sub>4</sub> aislados por cationes Ca<sup>2+</sup>.
- Escoria de tipo melilita con un grado de condensación 0,286-0,333; consiste en tetraedros SiO<sub>4</sub> parcialmente conectados entre sí para formar diorthogroups (Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sup>6-</sup> o enlaces con AlO<sub>4</sub> tetraedros.
- Escoria tipo wollastonita con un grado de condensación 0,286 a 0,333 y que consiste en pequeñas cadenas circulares de tetraedros de SiO<sub>4</sub>; cuando (SiO<sub>2</sub> + 2 / 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) <50% en mol, la formación separada de tetraedros y diorthogroups; cuando (SiO<sub>2</sub> + 2 / 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) > 50% moles, en agrupaciones de espacio restringido.
- Escoria del tipo Anortita con un grado de condensación 0,286 a 0,333; consiste en una estructura de tres dimensiones conformada por tetraedros SiO<sub>4</sub> y Al-O con cationes Ca<sup>2+</sup> en las cavidades.

Desde el punto de vista mineralógico, las escorias son amorfas y pueden presentar pequeñas cantidades de fase cristalina identificadas por difracción de rayos x (DRX), que corresponden, fundamentalmente, a un grupo de minerales de la clase melilita, a Gelenita (C<sub>2</sub>AS) o Akermanita (C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>).

#### **2.4.4. Agentes activantes**

El proceso de hidratación de la escoria es totalmente distinto del proceso de hidratación del cemento Portland. La hidratación del cemento Portland está relacionado con la química del calcio, mientras que los conglomerantes activados alcalinamente se derivan de un proceso de polimerización entre un material de origen silicoaluminoso y una solución alcalina, y no dependiendo necesariamente del calcio para su formación. La escoria se activa en presencia del agua, pero el tiempo de reacción y endurecimiento es demasiado largo, puede tardar muchos meses.

Mehta (Mehta & Monteiro, 2008) señala que la activación de la escoria después de estar por algunos minutos en contacto con el agua, forma una capa impenetrable de aluminosilicato sobre la superficie de los granos de escoria, lo cual inhibe la reacción de hidratación. Esto sucede, a menos que uno de los activadores químicos tales como el cemento Portland, el yeso, el silicato de sodio o los álcalis se encuentren presentes para deshacer esta capa y continuar la reacción de hidratación.

La activación alcalina es un proceso químico en el que un material rico en aluminio y sílice, natural o artificial, es mezclado con un activador alcalino, disolución altamente alcalina (pH>7), para producir una pasta que se puede endurecer en un tiempo muy corto. Los activadores tienen la función de acelerar la solubilización de la fuente de aluminosilicato, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos

hidratos. Glukhovsky clasifica los activadores alcalinos en seis grupos de acuerdo con su composición química (Shi, Krivenko, & Roy, 2006):

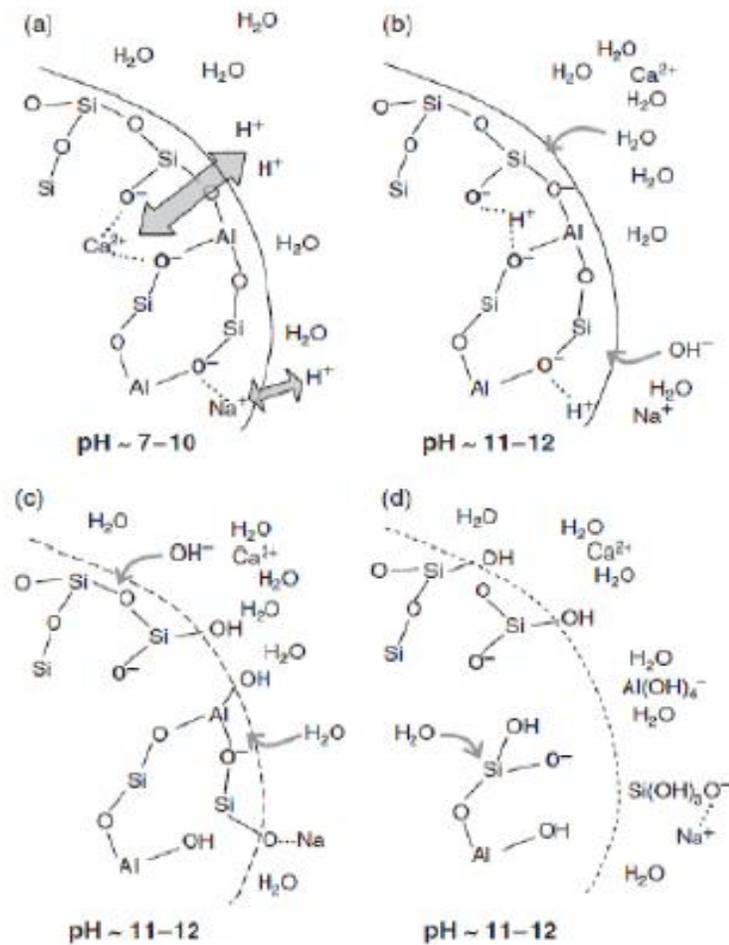
- Disoluciones cáusticas: MOH;
- Sales de ácidos débiles:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF;
- Silicatos:  $M_2O.nSiO_2$ ;
- Aluminatos:  $M_2O.nAl_2O_3$ ;
- Aluminosilicatos:  $M_2O.Al_2O_3.SiO_2$ ;
- Sales de ácidos fuertes:  $M_2SO_4$ .

Para comprender mejor la función de los activantes, observemos la explicación que dan algunos investigadores al proceso de activación de la escoria. Si bien los modelos mencionados al inicio del capítulo no son aplicables a materiales con moderado contenido de calcio, se ha publicado alguna información que puede dar idea de lo que ocurre en la reacción.

La **figura 13** muestra los pasos de la disolución de un material con alto contenido en metales alcalinos y alcalinotérreos, el proceso muestra el rompimiento de enlaces entre estos metales y el oxígeno, provocando un desbalance de cargas que, poco a poco, destruirá la estructura liberando al Al y Si. La escoria entra en contacto con los activadores alcalinos liberando primero el calcio, el cual tenderá a formar enlaces con el Si presente en el silicato de sodio y el agua, formando C-S-H. Posteriormente, el Al liberado se mezclará con el C-S-H previo, formando silicoaluminato cálcico hidratado (C-A-S-H). Finalmente, el silicio presente en la escoria se libera y se incorpora a las estructuras ya presentes.

La elección del activador para la activación alcalina es una indicación de la compatibilidad entre la composición química de la escoria y el activador. La elección del tipo de catión alcalino ( $M^+$ ), es un factor fundamental que afecta a todas las etapas del proceso de geopolimerización.

Durante la etapa de síntesis, el catión tiene un papel muy importante, ordenando las moléculas de agua y los silicatos solubles en el proceso de nucleación y formación de la estructura geopolimérica. En la etapa de policondensación, el catión es el responsable de la capacidad de policondensación y crecimiento de los precursores zeolíticos, que van a formar la estructura del conglomerante activado alcalinamente.



**Figura 11** Disolución de materiales con alto contenido de calcio  
Fuente: (Duxson & Provis, 2008).

Si se tiene en cuenta que el tamaño de los iones  $\text{K}^+$  ( $1,33\text{\AA}$ ) y  $\text{Na}^+$  ( $0,97\text{\AA}$ ) son sustancialmente diferentes, obteniéndose una menor densidad de carga superficial para el caso del ion  $\text{K}^+$ . La diferencia de tamaño entre  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  no solamente afecta la formación de la estructura

desde el punto de vista físico, sino también desde el punto de vista químico y de hidratación ya que el ion  $K^+$  se asocia con más moléculas de agua cuando es comparado con el ion  $Na^+$ . Este efecto coincide con las conclusiones obtenidas por (McCormick & Bell, 1989) quienes afirman que el grado de condensación, es decir, la formación del gel, está directamente relacionada con el tamaño del catión. Por lo tanto, se puede decir que los iones  $Na^+$  contribuyen con la disolución de la fuente de aluminosilicato y que los iones  $K^+$  están asociados a una mayor formación del gel.

Factores como la composición vítrea, la finura del material y la composición química son importantes y determinantes para la reactividad de los materiales silicoaluminosos como las escorias. La reactividad del material depende del contenido de la fase vítrea del material silicoaluminoso. Generalmente, se requiere que el material se encuentre en un estado predominantemente amorfo. Una escoria, por ejemplo, enfriada lentamente, tiende a cristalizarse y formar compuestos estables y durables, causando que se vuelva poco reactiva y carezca de propiedades cementosas.

La finura es determinante en la reactividad, debido a que al incrementar ésta se aumenta el área de exposición al medio de reacción y en consecuencia la reactividad es mayor. Sin embargo, cuando el área superficial es muy elevada, se incrementa la demanda de agua resultando en un decremento de las propiedades mecánicas. La composición química también gobierna en parte de la reactividad, generalmente ésta aumenta con el incremento de basicidad de la escoria y particularmente con un incremento del contenido de  $CaO$ .

Otro factor importante es la concentración del activador. Cuanto mayor es su concentración, mayor es la solubilidad de la materia prima y, en consecuencia, mayores son las resistencias mecánicas alcanzadas por el conglomerante formado. Palomo (1999) reporta la existencia de una concentración óptima de activador. Utilizando esta misma idea (Barbosa,1999) afirma que las

propiedades óptimas del geopolímero son alcanzadas cuando la concentración de sodio es suficiente para promover el balance de cargas por la sustitución del tetraedro de Si por Al, pero no debe existir exceso para que no se produzca carbonato de sodio por medio de la carbonatación atmosférica.

Si tenemos en cuenta las fuentes primarias y el activador, podemos hacer una simplificación de la activación mediante la **tabla 6**, donde se identifican los parámetros que intervienen en el proceso de reactivación y las propiedades del producto final.

**Tabla 6** Factores que determinan la geopolimerización  
Fuente: elaboración propia.

<b>Fuente Primaria</b>	1. Composición Química
	2. Mineralogía
	3. Microestructura
	4. Distribución de tamaño de Partícula
<b>Activador Alcalino</b>	1. Alcalinidad.
	2. Tipo y Naturaleza
	3. Relación Si/Catión
	4. Relación Especies iónicas/Catión

Los agentes activantes más utilizados en los cementos activados alcalinamente (CAA) son el sulfato, el cemento Portland, el silicato de sodio y el hidróxido de sodio. La dosificación de los álcalis se puede realizar de varias maneras, pero es común para el caso de soluciones representarla en el número de moles disueltos por litro de disolución (molaridad). Por el contrario, algunos autores (Tashima, 2012) consideran usar como tipo de concentración la molalidad, porque en este caso la masa del disolvente (agua) se mantiene fija, variando únicamente el número de moles del soluto; mientras que, en el caso de la concentración molar, comúnmente utilizada en la preparación de las soluciones alcalinas, además de variar los moles del soluto, se produce una modificación en el volumen del disolvente (agua). Eso implica la presencia de dos variables, puesto que el agua

también juega un importante papel en lo que se refiere a las propiedades mecánicas y microestructurales de los conglomerantes activados alcalinamente (Barbosa, MacKenzie, & Thaumaturgo, 2000).

Otro método de concentración se da por el contenido de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) con respecto a la masa de la escoria, teniendo presente que es la forma en que se presentan los contenidos de álcalis en el cemento Portland y la más utilizada en la literatura de la activación. Se ha intentado en las investigaciones hacer recomendaciones sobre las concentraciones óptimas, pero los parámetros relacionados con el precursor hacen que estos valores puedan cambiar. Lo que sí muestran las investigaciones es que la naturaleza del activador y la concentración del activante influyen en la resistencia mecánica del material.

Palomo (Palomo, Grutzeck, & Blanco, 1999) considera que el activador alcalino juega un papel importante en la reacción de polimerización, comportándose con mayor rapidez cuando la sílice soluble está presente. De igual forma, Fernández y otros autores (Fernandez-Jimenez & Palomo, 2005), reportan un incremento de la resistencia a la compresión en morteros activados con NaOH y silicato de sodio tan solo utilizando NaOH.

#### **2.4.5. Productos de reacción**

Se llegó a la conclusión de que los resultados encontrados en los productos finales de activación son diferentes, pues dependen tanto del precursor como del tipo de activante. Para el caso de la escoria, Shi (Shi, Wu, & Tang, 1991) estudió la activación alcalina de una escoria de alto horno, obteniendo la formación de C-S-H y Xonotlita. Por su parte, Wang & Scrivener (1995) confirmaron que el gel de C-S-H es el principal producto de reacción de la activación alcalina de la escoria de alto horno. Esto es probablemente debido a que las soluciones tienen pH alto, lo que favorece a bajas concentraciones de Ca y altas concentraciones de Si. Estos autores reportaron la

formación de hidrotalcita cuando se utiliza una solución alcalina a base de hidróxido de sodio o mezclado con vidrio soluble; no se encontró ningún tipo de fases zeolíticas.

Algunos investigadores (Vanderley, 1995) mencionan no tener productos de hidratación del tipo zeolítico al utilizar sodio como activante, pero afirmaron que el sodio estaba dentro del gel de C-S-H que se puede confirmar con la baja relación solución/sólidos (s/s), lo que explica la sustitución del ion de  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^+$ . Puertas (1995) estudió mezclas de cenizas volantes y escoria de alto horno, obteniendo como productos de reacción principalmente un gel de C-S-H; también detectó la formación de hidrotalcita ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), así como calcita. Sin embargo, no encontró ninguna fase de aluminosilicatos alcalinos.

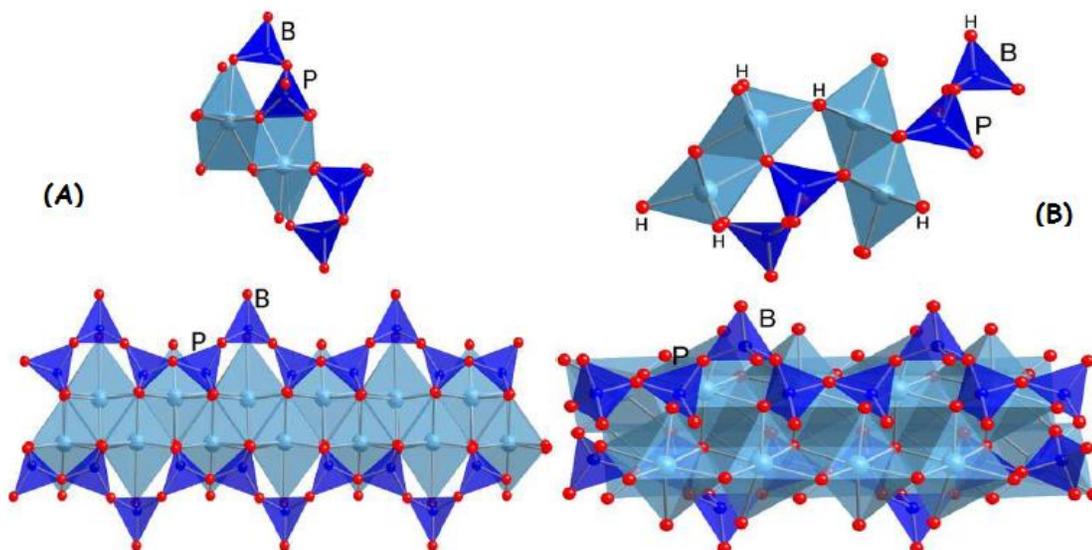
La reacción de hidratación de la escoria activada con álcalis es comparable con una reacción clásica de polimerización. Los principales productos de hidratación comprenden el gel CSH, hidrotalcita, hidrogranates, fases monosulfoaluminato "AFm" y la fase trisulfoaluminato "AFt" (ettringita). De acuerdo con esto, se describen cada uno de los productos referenciados:

El gel CSH es el principal producto de hidratación de la escoria activada alcalinamente, se denomina silicato cálcico hidratado CSH, el cual es altamente amorfo y se encuentra íntimamente mezclado con otras fases. Se caracteriza por su alto contenido de aluminio, la relación A/S, puede llegar a ser superior a 0.1, indicando un alto grado de sustitución de aluminio por silicio. La fórmula CSH no tiene una estequiometría definida; se denota como  $\text{CaSbH}_x$ , en la cual, a, b y x son respectivamente las relaciones C/S, A/S y H/S en el CSH (Chen & Brouwers, 2007).

El CSH presenta una estructura compleja; se conocen cerca de 30 fases cristalinas. A temperaturas cercanas a la del ambiente, muestran estructuras con diferente grado de cristalinidad hasta llegar a estructuras amorfas, todas son descritas en términos genéricos como gel "CSH" (Chen, Thomas, Taylor, & Jennings, 2004).

El CSH, es un gel coloidal amorfo o semicristalino, que contiene poros nanométricos, llamados poros del gel, tiene una porosidad de aproximadamente 28%. Los estudios de Diamond en 1976, Jenning y colaboradores (Richardson, 2004) indicaron que el gel CSH existe en una variedad de formas: partículas fibrosas, panal de abeja, partículas planas y granos irregulares. El conocimiento que se tiene hasta hoy acerca de la estructura del gel CSH, fue gracias al estudio de comparaciones estructurales con cristales de silicato cálcico hidratados de tobermorita 14-nm y jennita; siendo éstos los modelos más apropiados y revisados recientemente por Richardson (2004).

La tobermorita presenta una estructura tipo "dreierkette", en la cual el mismo patrón del silicio tetraédrico se repite cada tres unidades en ambos sitios de la parte central del enlace Ca-O, como lo muestra la Figura 2.12. La principal diferencia entre esas dos estructuras es que, en la jennita, algunos silicios tetraédricos en la cadena simple "dreierkette" son reemplazados por grupos OH<sup>-</sup>, causando una ondulación sustancial en la capa CaO. El CSH constituye aproximadamente tres cuartas partes del volumen de la pasta hidratada y en consecuencia es el responsable de la estabilidad volumétrica y de su comportamiento mecánico y de durabilidad.



**Figura 12** Estructura "dreierkette" cadenas infinitas (A) 14Å tobermorita y (B) jennita.

La hidrotalcita depende de la naturaleza del mineral  $M_6ACH_{12}$ . La relación M/A en los productos de hidratación de la EGAH no es fija en 6 y varía en un amplio rango. La fase pura de hidrotalcita es difícil de distinguir en la pasta de escoria endurecida porque está íntimamente mezclada con el gel C-S-H. Taylor (1997) propone un estimado aproximado y asume que toda la cantidad de MgO presente en la escoria reacciona para formar hidrotalcita.

El hidrogranate tiene fases estructuradas relacionadas con el granate llamado glossularita ( $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ ) y la katoita ( $Ca_3Al_2(OH)_{12}$ ). La capa es una estructura cúbica, en donde el silicio, aluminio y calcio tienen coordinaciones tetraédricas, octaédricas y una estructura cúbica distorsionada, respectivamente; cada oxígeno es enlazado a un silicio, un aluminio y dos átomos de calcio. En los hidrogranates el  $Al^{3+}$  puede estar parcial o totalmente reemplazado por  $Fe^{3+}$ .

Las fases AFm son una abreviatura para la familia de las fases aluminato cálcico hidratado, estructuralmente relacionadas con hidroaluminato. La fase AFm se forma cuando los iones que contiene, se unen en concentraciones apropiadas en sistemas acuosos a temperatura ambiente; algunos pueden formarse hidrotérmicamente, en presencia de agua bajo presión arriba de  $100^{\circ}C$ . Algunas de las fases AFm formadas en pastas de cemento Portland, son pobremente cristalinas y están mezcladas íntimamente con C-S-H. Las fases AFm incluyen los hidratos aluminato tetracálcico ( $C_4AH_{13}$ ) y la strátingita ( $C_2AS \cdot HS_{12}$ ) que se encuentran dentro de los productos de hidratación de la EGAH pura. Su formación depende de la composición de los óxidos de la escoria si el contenido de aluminio en ésta es relativamente bajo, o el contenido de magnesio es alto, las fases AFm no se forman.

La fase AFt letrinita es un sulfoaluminato cálcico hidratado ( $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$ ). Es un mineral que ocurre poco en la naturaleza, pero es un importante producto de hidratación del cemento. La estructura cristalina de la etringita está compuesta por

columnas de  $\text{Ca}_6[\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}]^{6+}$  paralelas al eje c con moléculas de sulfato y agua junto con una red de enlaces de oxígeno. Se encuentra abierta a una larga proporción de espacios vacíos interconectados, permitiendo la movilidad de agua y de iones hidratados. La estructura de la etringita es bastante flexible permitiendo el intercambio de especies atómicas.

El óxido de calcio reacciona con el agua formando hidróxido de calcio. La reactividad de la cal libre depende de la temperatura a la que es preparada. El volumen ocupado por el hidróxido de calcio es menor que el ocupado por el CaO, pero las partículas hidratadas crecen en una orientación generando presión a su alrededor. La solubilidad del hidróxido de calcio depende de la concentración de iones  $\text{OH}^-$ , en la zona intersticial la solubilidad disminuye con el progreso de la reacción hasta que los cristales de hidróxido de calcio se solubilizan y pasan a la solución siendo entonces carbonatados. La carbonatación es directamente proporcional a la temperatura y a la concentración de  $\text{CO}_2$ .

## **2.5. Cementos de escoria activada alcalinamente**

De acuerdo con los estudios adelantados en diferentes investigaciones, los cementos y concretos de escorias activadas alcalinamente presentan las siguientes ventajas:

- ✓ Mayores resistencias mecánicas.
- ✓ Menor calor de hidratación.
- ✓ Mejor impermeabilidad.
- ✓ Mejor comportamiento frente a la carbonatación.
- ✓ Mayor resistencia al hielo-deshielo.
- ✓ Mayor resistencia a altas temperaturas.
- ✓ Mayor resistencia al ataque químico.
- ✓ Mayor protección de las armaduras metálicas.

- ✓ Resistencia bacteriológica y biocida.
- ✓ Menor costo y mayor ahorro de energía.

Dentro de las desventajas se encuentran:

- ✓ Fraguado más rápido.
- ✓ Mayor retracción y formación de microfisuras.
- ✓ Posibilidad de que se produzca mayor RAA.
- ✓ Mayor formación de eflorescencias.

A continuación, se destacan algunas características importantes en el momento de elaborar una mezcla con estas particularidades.

### **2.5.1. Propiedades mecánicas.**

Los morteros de escorias activadas alcalinamente pueden alcanzar resistencias de 40-120 MPa y en concretos estos valores pueden llegar a ser de 60-150 MPa, con la ventaja que estas resistencias se pueden lograr a edades tempranas (de 3 a 7 días) y pueden continuar aumentando. Sin embargo, Las resistencias mecánicas de los morteros y concretos de escorias activadas tienen una desviación mayor que las resistencias de los concretos de CPO. Esto se debe a que el desarrollo de resistencias de esos concretos es fuertemente dependiente de la naturaleza de la escoria como del agente activante.

Wang (Wang, Scrivener, & Pratt, 1994) identifica los factores que afectan a las resistencias mecánicas de las escorias activadas alcalinamente, como siguen: el tipo de activador, el método de adición del activador, la dosificación del activador, la naturaleza y finura de la escoria, la temperatura de curado, las relaciones a/c y los aditivos. De los resultados obtenidos en sus trabajos, se indica que el silicato sódico es el mejor activador en todos los casos. Frente a las escorias activadas con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  que desarrollan mayores resistencias mecánicas a las activadas con  $\text{NaOH}$ ,

es explicada por algunos autores (Wang, 1991), considerando que, aunque la reactividad de la escoria es la misma, el grado de polimerización de los aniones del silicato es muy superior en las pastas de escorias activadas con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

La mejor forma de adicionar el activante es en solución. La proporción óptima de  $\text{Na}_2\text{O}$  debe de encontrarse entre 3.0-5.5% en peso de la escoria. El rango de superficie específica, óptimo de la escoria, debe oscilar entre 4.000-5.500  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La relación más idónea de disolución (volumen)/escoria (peso) debe de encontrarse entre 0.38-0.45. Al aumentar la temperatura de curado se incrementan las resistencias mecánicas de los cementos de escorias activadas (Wang, Scrivener, & Pratt, 1994). Como consecuencia, se forman en la activación alcalina de escorias productos de hidratación cristalinos, mientras que a temperatura ambiente esos productos son mayoritariamente de naturaleza amorfa.

Dependiendo de la naturaleza del activador, las pastas de escoria activada alcalinamente y morteros pueden presentar una estructura más o menos porosa que las pastas y morteros de cemento Portland. La relación entre la porosidad y la fuerza para el cemento de escoria-álcali activado es diferente de la de cemento Portland.

### **2.5.2. Calor de hidratación.**

Los cementos de escorias activadas alcalinamente se caracterizan por bajos calores de hidratación. Esto se explica por la menor energía de hidratación de los metales alcalinos [ $\text{K} - 3.43 \times 10^8$ ,  $\text{Na} - 4.14 \times 10^8 \text{ J/ (Kg-ion)}$ ], frente a la de los metales alcalinotérreos [ $\text{Ca} - 15, 11 \times 10^8 \text{ J/(Kg-ión)}$ ] (Glukhovsky, Rostovskaja, & Rumyna, 1980). El calor de hidratación de los cementos de escorias activadas alcalinamente es 1/3-1/2 menor que el desarrollado por los CPO. Esos bajos calores de hidratación permiten el empleo de esos cementos de escorias activadas para la fabricación de grandes obras en masa.

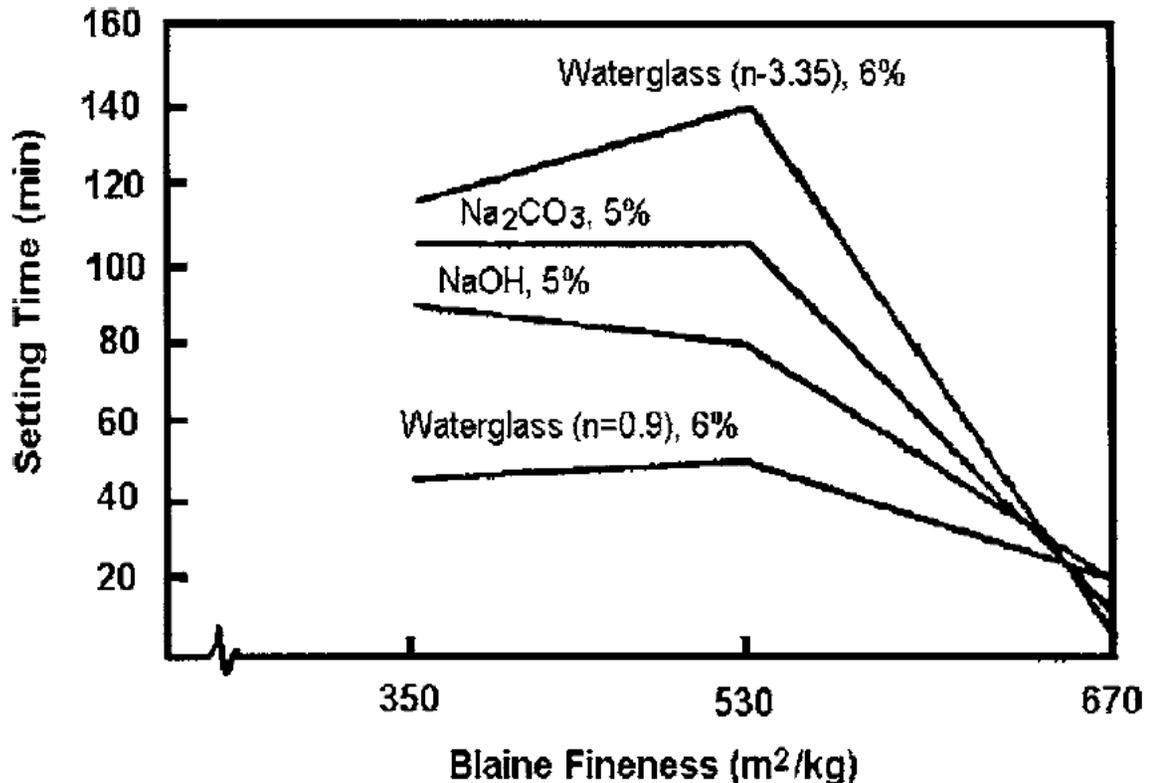
La influencia de dos tipos de soluciones activantes y su concentración, está fuertemente influenciada en la cinética de reacción de la pasta de escoria, datos calorimétricos de conducción isotérmica in situ lo demuestran. La activación de la escoria con NaOH inicia el proceso de reacción espontánea con un período de inducción muy pequeño a temperatura ambiente, mientras que la activación de la escoria con solución de silicato sódico da como resultado un período de inducción muy largo. La concentración de la solución también tiene un efecto muy significativo, con una dosificación más alta del hidróxido sódico o silicato de sodio, dando como resultado una mayor evolución del calor y etapas de reacción más cortas. Un aumento de la temperatura de hidratación puede tener un efecto significativo en la evolución de calor de los cementos de escoria activada alcalinamente.

Fernández-Jiménez y Puertas (Fernández-Jiménez & Puertas, 1997) realizaron un estudio detallado sobre el efecto de las temperaturas de hidratación y la dosificación del activador sobre las tasas de evolución de calor y cinética de hidratación.

### **2.5.3. Fraguado rápido.**

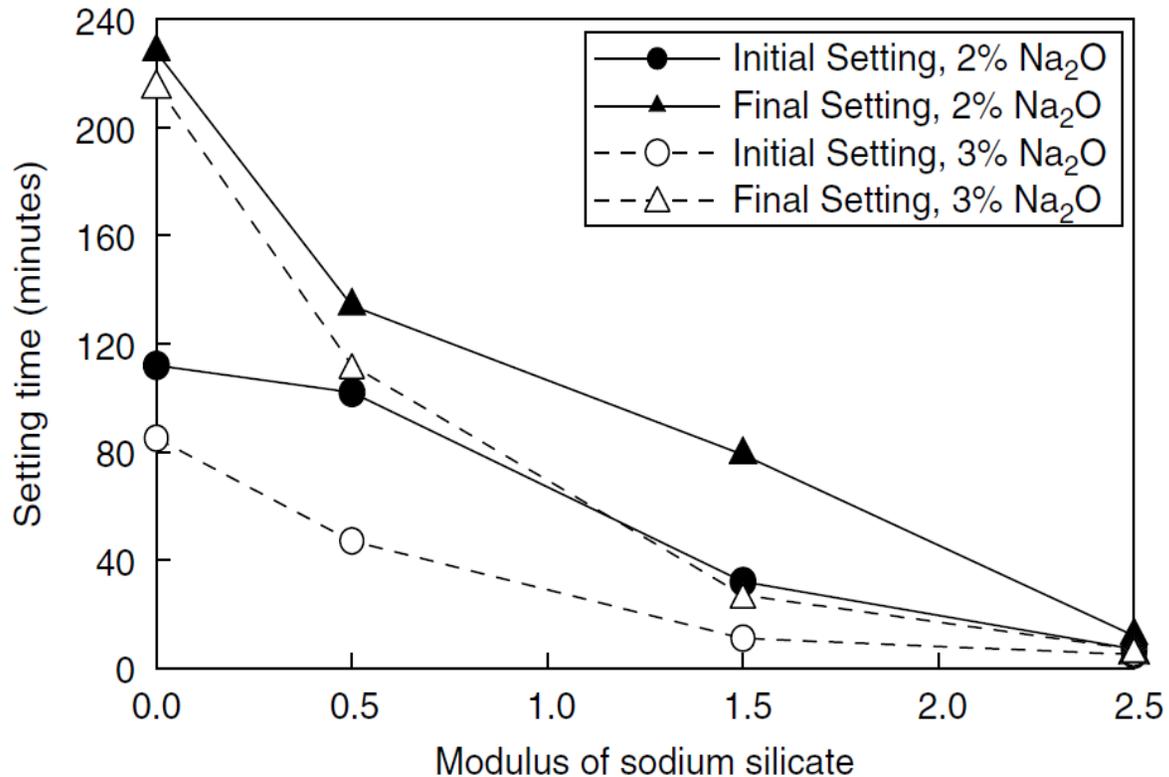
Purdon (1940) investigó el efecto de diferentes parámetros sobre los tiempos de fraguado en cementos de escoria activados alcalinamente; encontrando que, para una solución de activador dado, el tiempo de fraguado variaba con diferentes fuentes de escoria a pesar de tener una composición química muy similar. También, observó que la resistencia inicial varió inversamente con el tiempo de fraguado, pero que a los 28 días es más o menos independiente de la misma. Por su parte, Andersson & Gram (1987) midieron el tiempo de fraguado de los morteros de escoria activados alcalinamente con diferentes finuras Blaine y activadores. El tiempo de fraguado de las pastas de cemento de escoria activada alcalinamente no mostró un cambio obvio cuando la finura

de la escoria se aumentó de 350 a 530m<sup>2</sup> / kg, pero disminuyó notablemente cuando se aumentó de 530 a 670m<sup>2</sup> / kg como se muestra en la *gráfica 1*.



*Gráfica 1* Efecto de la finura Blaine de la escoria del alto horno en el tiempo de fraguado de las pastas de cemento activado alcalinamente  
Fuente: (Andersson & Gram, 1987).

De igual forma, el tiempo de fraguado de las pastas aumenta con la disminución de la basicidad de la escoria, independientemente de la naturaleza de los activadores utilizados. El módulo de silicato de sodio tiene un efecto muy significativo en los tiempos de fraguado de los cementos de escoria activados alcalinamente (Shi & Li, 1989). En la *gráfica 2* se muestra el efecto de módulo de silicato de sodio líquido en los tiempos de fraguado para una escoria de fósforo que tiene concentraciones de 2% y 3% (en masa de Na<sub>2</sub>O).



*Gráfica 2* Efecto del módulo de solución de silicato de sodio en los tiempos de fraguado de las pastas de cemento de escoria de fósforo activadas con álcali  
Fuente: (Shi & Li, 1989).

#### 2.5.4. Formación de eflorescencias.

La eflorescencia es una sal formada por la carbonatación de los álcalis presentes con el  $\text{CO}_2$  presente en el medio ambiente. En los morteros y concretos de escorias activadas alcalinamente se forman una mayor cantidad de eflorescencias. Éstas pueden ser de diferente naturaleza y solubilidad, principalmente carbonatos y sulfatos alcalinos y alcalinotérreos. El problema que entraña la formación de eflorescencias, aparte del meramente estético, es la posible reducción en la impermeabilidad y durabilidad de los concretos. La formación de las eflorescencias depende, fundamentalmente, del activador y de las condiciones de curado. Curados acelerados a humedades relativas superiores al 95%, parecen reducir la formación de eflorescencias.

### 2.5.5. Durabilidad

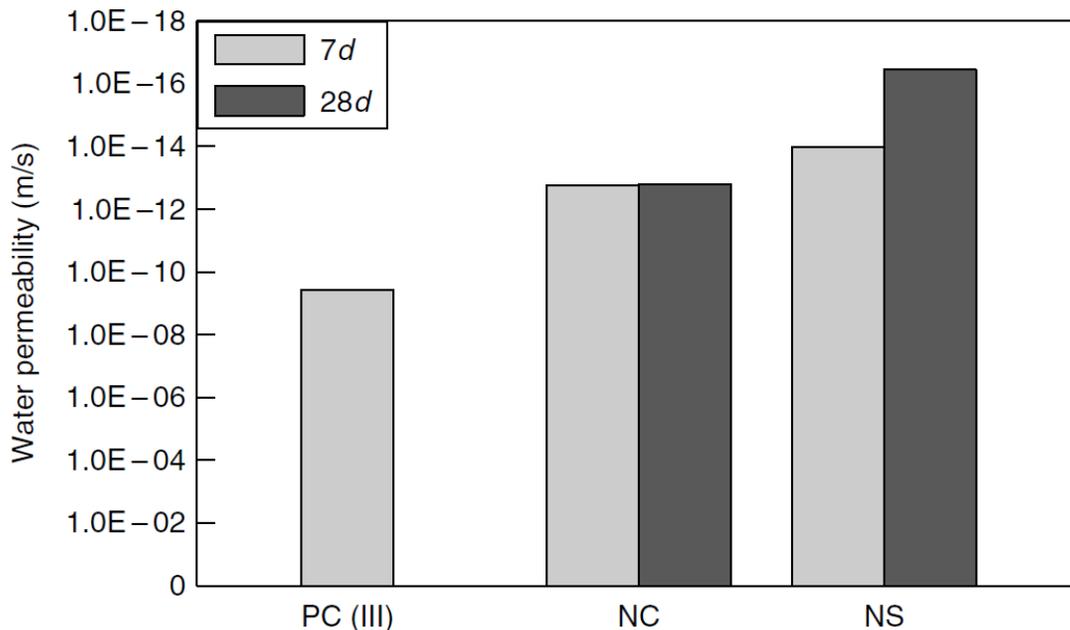
La durabilidad es una de las propiedades más deseadas e importantes del hormigón. El concreto es un material inherentemente resistente. Sin embargo, es susceptible al ataque en una variedad de diferentes exposiciones a menos que se tomen ciertas precauciones. En general, se acepta que el cemento activado alcalinamente presenta una mejor resistencia a la corrosión, pero tiene una contracción mayor que la del cemento Portland.

Uno de los conceptos asociados a la durabilidad es la permeabilidad del hormigón, que cumple un papel importante en la durabilidad, ya que controla la velocidad de entrada de la humedad que pueda contener productos químicos agresivos y el movimiento del agua durante el calentamiento o la congelación. Es importante tener en cuenta que la microestructura y las propiedades de los cementos activados alcalinamente dependen de forma importante de las características del activador alcalino y de la composición química y estructural de los precursores que se utiliza. Luego, no sorprende que la permeabilidad de cemento y concreto endurecido varíen de una investigación a otra.

Shi (1996) midió la permeabilidad al agua de tres morteros de cemento activado alcalinamente NaOH (NH), Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (NC) y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (NS) como activadores, y un OPC como referencia. Los resultados de la prueba de permeabilidad al agua se representan en la **gráfica 3**. En esta, se puede identificar que los iones cloruro tienen una habilidad especial para destruir la película de óxido pasivo en el acero incluso en condiciones altas de alcalinidad. La penetración de cloruros en cantidades suficientes hará que la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado, experimente daños considerables.

La corrosión inducida por cloruros es una causa muy común de deterioro del hormigón a lo largo de las costas del mar y en las zonas frías donde se utilizan sales de deshielo. Si se considera

que la reparación de estructuras de hormigón afectada por la corrosión inducida de cloruro es muy costosa, la elección de un material de hormigón de calidad con baja permeabilidad a cloruro cobra importancia.



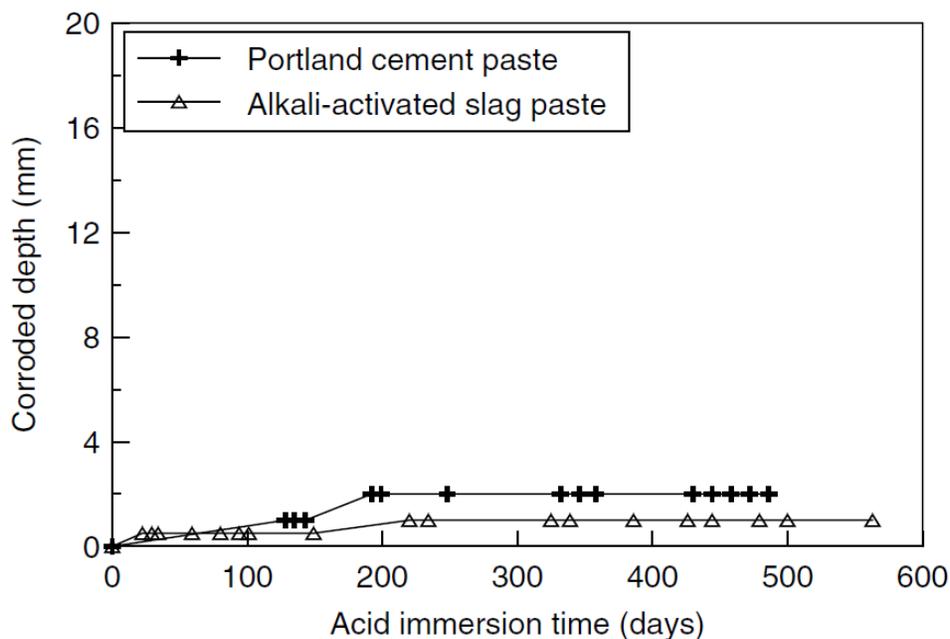
**Gráfica 3** Permeabilidad al agua de morteros de escorias y cemento Portland  
Fuente: (Shi, 1996).

El método de celda de prueba desarrollado por Page (Page, Short, & El Tarras, 1981) se utilizó en un estudio para determinar la difusión de cloruros y se encontró que las pastas activadas alcalinamente, presentaron una reducción de 30 a 40 veces más lenta que a través de las pastas de cemento Portland, como se muestra en la **tabla 7**. De igual manera, se sabe que la sustitución del cemento Portland por escoria de alto horno disminuye la difusión de cloruros en pastas, morteros y hormigones (Roy, 1989). En esta línea, un estudio más reciente realizado por Roy (Roy, Jiang, & Silsbee, 2000) indica que la adición de álcalis para mezclar cemento Portland escoria no solo aumenta la resistencia, sino que también disminuye la difusión de cloruros de manera significativa.

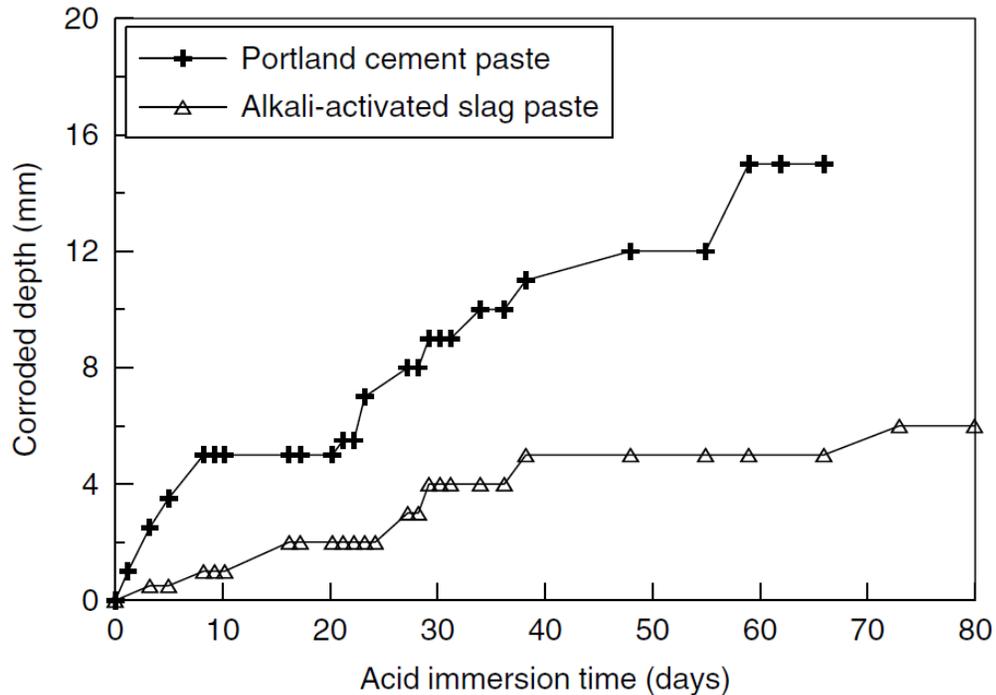
**Tabla 7** Difusión de cloruro en cemento Portland y pastas de cemento de escoria  
Fuente: (Hakkinen, 1987).

No.	Paste	Water-to-cement (slag) ratio	Diffusion coefficient (cm <sup>2</sup> /s)
1	Portland cement	0.23	$321 \times 10^{-12}$
2	Alkali-activated slag	0.23	$75 \times 10^{-12}$
3	Portland cement	0.35	$6390 \times 10^{-12}$
4	Alkali-activated slag	0.35	$240 \times 10^{-12}$

La corrosión por ácidos en materiales cementantes cada vez cobra más importancia en elementos de transporte de aguas residuales, estructuras de hormigón en plantas de tratamiento de aguas y todos aquellos elementos que pueden ser afectados por la corrosión ácida. Las *gráficas 4 y 5* muestran la profundidad de la corrosión en pastas de cemento expuestas a soluciones con ácido nítrico y ácido acético con pH3 (Shi, 2003). Después de 580 días de inmersión en solución de ácido nítrico, las pastas de cemento Portland se corroe en 2.5mm, mientras las pastas de escoria activadas alcalinamente solo son de 1.3mm. Se sabe además que cementos con alto contenido de aluminio presentan buena resistencia a la corrosión ácida (Davidovits, 1994).



**Gráfica 4** Corrosión de pastas de cemento en solución de ácido nítrico a pH 3  
Fuente: (Shi, 2003 (152)).



*Gráfica 5* Corrosión de pastas de cemento en solución de ácido acético a pH 3  
Fuente: (Shi, 2003).

El ataque del sulfato se refiere al deterioro del hormigón el cual es resultante de las reacciones químicas que se producen cuando el hormigón se expone a una solución que contiene una concentración suficientemente alta de los sulfatos disueltos. El deterioro del hormigón debido al ataque del sulfato se atribuye generalmente a reacciones de productos de hidratación de cemento Portland con sulfatos para formar productos de reacción expansivas después del endurecimiento, lo que produce la tensión interna o se forman productos que tienen poco valor de cementación, deteriorando el hormigón. Krivenko (1986) investigó la resistencia a la corrosión de los hormigones elaborados con cemento de escoria activados alcalinamente, hecho con diferentes tipos de escoria y activador, en diferentes soluciones de sulfato, midiendo la resistencia a la flexión de las probetas.

De los resultados señala que, independientemente de su composición, el hormigón de cemento de escoria activado alcalinamente es superior al hormigón de cemento Portland ordinario

en todas estas soluciones de sulfato. La naturaleza del activador también tiene un gran efecto en la resistencia a la corrosión. Para una densidad dada, la resistencia a la corrosión del cemento aumentó con el activador en el siguiente orden:  $\text{NaOH} < \text{Na}_2\text{CO}_3 \approx \text{Na}_2\text{SiO}_3 < \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  y la reducción del contenido de álcalis parece aumentar la resistencia a la corrosión.

La carbonatación se refiere a la reacción del cemento hidratado con dióxido de carbono en el medio ambiente. Todos los productos de hidratación de cemento pueden reaccionar con dióxido de carbono para formar carbonato de calcio y otros productos. La humedad es un factor importante en la carbonatación. La carbonatación no sucede en la pasta de cemento seco o pasta de cemento a 100% de humedad relativa. La condición óptima para la carbonatación parece ser alrededor del 50% de humedad relativa (Neville, 1996). La carbonatación en el hormigón reduce el pH del material original del 13 al 8, destruyendo la pasivación e induciendo la corrosión en el acero de refuerzo del hormigón.

Además, suele ir acompañada de una contracción, lo cual puede producir agrietamiento o cuarteamiento superficial del material. Estudios realizados en este tema han generado controversia en los resultados, sin embargo, todo parece apuntar a que, en condiciones de humedad controlada, los cementos activados alcalinamente pueden ser carbonatados más rápido que el cemento convencional (Bakharev, Sanjayan, & Cheng, 2001; Malolepszy & Deja, 1999).

#### **2.5.6. Aplicaciones y especificaciones**

Desde el descubrimiento de cementos y hormigones activados por álcalis en 1958, se han producido comercialmente y se han utilizado en una variedad de proyectos de construcción en la antigua Unión Soviética, China y otros países. Se ha adquirido mucha experiencia en el diseño, la producción y las aplicaciones durante los últimos 40 años, lo cual es valioso para el desarrollo y las aplicaciones de cementos y hormigones activados con álcali. La inspección realizada en estos

países de algunas estructuras después de muchos años de servicio, muestra que estos cementos pueden usarse como cementos Portland convencionales.

Durante los años 1999 y 2000, un grupo de científicos en Ucrania inspeccionó varias estructuras de hormigón construidas con cemento de escoria activado por álcali, entre las que se destacan: colectores de drenaje, tuberías construidas en 1966 en Odessa, Ucrania; zanjas de riego en hormigón; Terraplenes; viviendas de uno y dos pisos en hormigón fundido en 1982; edificio de 15 pisos construido en 1960; los pavimentos especiales de hormigón para camiones pesados de 60 toneladas construido en 1984; edificio residencial de 24 pisos construido en 1994; bloques de mampostería, ciudad de Mariupol, Ucrania; traviesas de hormigón armado pretensado, estación de ferrocarril de Tchudovo, Rusia; construido en 1988.

En todos estos casos, el concreto de cemento de escoria activado por álcali sigue funcionando bien y supera el desempeño del cemento Portland usado en la misma zona. Las pruebas de rendimiento y el examen microestructural de las muestras de estas estructuras indican que las propiedades del hormigón dependen de las materias primas utilizadas, las condiciones de servicio y la edad (Shi, Krivenko, & Roy, 2006). Lo que, sin duda, nos permite tener un nivel de confianza en la utilización de los cementos de escoria activado alcalinamente. Del mismo modo, están los cementos para pozos petrolíferos, recubrimiento de túneles para metro y líneas ferroviarias, obras portuarias y para inmovilizar residuos industriales. Ésta última ha cobrado mucho interés por su componente medio ambiental.

Existe una tecnología denominada Estabilización / Solidificación de desechos peligrosos, que básicamente es un proceso que implica la mezcla de un residuo con un aglutinante para reducir la capacidad de lixiviación del contaminante por medios físicos y químicos, para así convertir los desechos peligrosos en una forma de desecho ambientalmente aceptable para la disposición o

construcción de muros de tierra. El S / S de contaminantes por cementos incluye los siguientes tres aspectos: (a) fijación química de contaminantes mediante las interacciones químicas entre los productos de hidratación del cemento y los contaminantes, (b) adsorción física de los contaminantes en la superficie de productos de hidratación de los cementos, y (c) la encapsulación física de los materiales contaminados, residuos o suelo (baja permeabilidad de las pastas endurecidas) (Shi, Day, Wu, & Tang, 1991).

Los dos primeros aspectos dependen de la naturaleza de los productos de hidratación y de los contaminantes. El tercer aspecto se refiere tanto a la naturaleza de los productos de hidratación como a la densidad y estructura física de la pasta. El S / S ha sido ampliamente utilizado para eliminar residuos radioactivos, peligrosos y mixtos de bajo nivel, así como para rehabilitar sitios contaminados. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés), el S / S es la mejor tecnología disponible (BDAT) para 57 desechos peligrosos (USEPA 1993) (Shi, Krivenko, & Roy, 2006).

### **3. Desarrollo experimental**

En este capítulo se describe la metodología experimental llevada en la que se sustenta esta investigación. De igual forma, la caracterización física, química y mineralógica de los materiales de partida mediante técnicas instrumentales como la Fluorescencia de Rayos X (FRX) y la Difracción de Rayos X (DRX), complementada con los productos de reacción con Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia de Impedancias Electroquímicas (EIS) y Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Cada una de estas técnicas es necesaria para entender el material antes de activarse y después de reaccionar con sus componentes. Los ensayos realizados a las mezclas, tanto en estado fresco como en endurecido, cumplen en lo posible con la normativa vigente para cementos convencionales; aunque, por tratarse de un material en estudio, no existen especificaciones técnicas estandarizadas. El documento de consulta que complementa estos ensayos es el informe RILEM sobre materiales alcalinos activados (TC 224-AAM).

#### **3.1. Técnicas de caracterización**

Debido a que la activación alcalina se controla, en gran medida, por procesos a escala molecular, es importante contar con técnicas experimentales cada vez más sofisticadas que brinden mejor información de los procesos y fenómenos que se dan al interior de una reacción. A continuación, se procede a especificar cada una de estas técnicas, en la búsqueda de una comprensión más profunda del tema a tratar desde este capítulo.

##### **3.1.1. Fluorescencia de Rayos X (FRX).**

En la actualidad, se utilizan técnicas confiables para determinar la composición química de materiales inorgánicos utilizados habitualmente en la construcción. La Fluorescencia de Rayos X (FRX) es una técnica en la que un haz de rayos X incide sobre una muestra provocando la expulsión de un electrón de una capa interna de un átomo. La vacante creada es ocupada por un electrón de

una capa más externa, emitiendo de la diferencia de energías entre dos niveles atómicos en forma de un nuevo fotón de rayos X, cuya energía es diferente a la incidente y es característica del material en estudio. Además, la intensidad de la radiación X de la energía emitida por la muestra se relaciona con la concentración del elemento, de esta manera es posible determinar los elementos que la componen y su cantidad.

El equipo utilizado en este estudio es un MagixPro PW-2440 Philips (WDXRF), compuesto por un tubo de rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Tiene una sensibilidad de 100ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos. El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ5, con el propósito de determinar la composición química de la escoria.

### **3.1.2. Difracción de Rayos X (DRX).**

Se basa en el hecho de que los rayos X tienen una longitud de onda del mismo orden de magnitud que las distancias interatómicas en materiales cristalinos, lo que implica que, al incidir la radiación sobre el material, se produzca el fenómeno de difracción, descrito de manera intuitiva como una reflexión de los rayos X en los planos cristalinos del material. Se obtendrá un rayo difractado por una familia de planos cristalinos cuando se verifique la llamada condición de Bragg:  $n\lambda = 2d \sin\theta$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X empleados,  $n$  es el número entero mayor que cero y es denominado orden de la difracción,  $d$  es la distancia interplanar de la familia considerada, y  $\theta$  el ángulo de incidencia de rayos X sobre dichos planos.

En el campo de la construcción se utiliza la difracción en polvo, sobre la que se hace incidir luz monocromática sobre la muestra y se realiza un barrido en el ángulo  $2\theta$  para detectar los haces difractados en las distintas familias de planos presentes en ella. Las posiciones angulares de los picos de intensidad permiten identificar las fases cristalinas presentes en el material, para lo que

se copará el patrón de difracción de la muestra con los diagramas de sustancias conocidas. La principal desventaja que presenta la técnica es que no permite analizar fases amorfas.

La técnica se utilizó para identificar la composición mineralógica de la escoria y evaluar la evolución de la hidratación, mediante la identificación de las fases mineralógicas presentes en cada edad de curado. Los patrones obtenidos proporcionaron información para estimar los efectos de las condiciones, los agentes químicos, la velocidad de hidratación de los componentes cementantes y la interacción entre ellos. Asimismo, se estimó el grado de avance de la hidratación de la escoria.

### **3.1.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).**

Esta técnica permite la observación y caracterización de materiales y superficies a escala nanométrica. De igual forma, se pueden obtener imágenes de alta resolución utilizando la interacción electrón-masa, ya que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz como los microscopios convencionales. La muestra a analizar es irradiada con un haz de electrones focalizados que hacen un barrido sobre la superficie. De los distintos tipos de señales producidas cuando el haz de electrones choca contra la superficie de la muestra, se analizan las de electrones secundarios y de electrones retrodispersados. Ambas varían siguiendo las diferencias en la topografía de la superficie. Luego, diferentes sensores hacen posible la reconstrucción de una imagen tridimensional. La técnica se utilizó para el estudio de microestructuras de los sistemas de reacción de la escoria activante. Se observó el avance de las reacciones, distribución de porosidad, patrones de fracturas y morfología de fases.

### **3.1.4. Espectroscopia de Impedancias Electroquímicas (EIS).**

Es una técnica relativamente moderna, que se debe a la aparición de circuitos electrónicos suficientemente rápidos y sensibles para generar y analizar una señal de frecuencia y fase variable. Se trata de una técnica no destructiva, particularmente sensible a pequeños cambios en el sistema;

permite la caracterización de las propiedades de materiales y sistemas electroquímicos incluso en medios poco conductores. Esta consiste en la aplicación de una perturbación senoidal de potencial eléctrico de frecuencia variable al material estudiado y el registro de la respuesta en corriente dentro de una celda electroquímica. La impedancia se define como el cociente entre el potencial aplicado y la intensidad medida a la salida (Macdonald & Barsoukov, 2005).

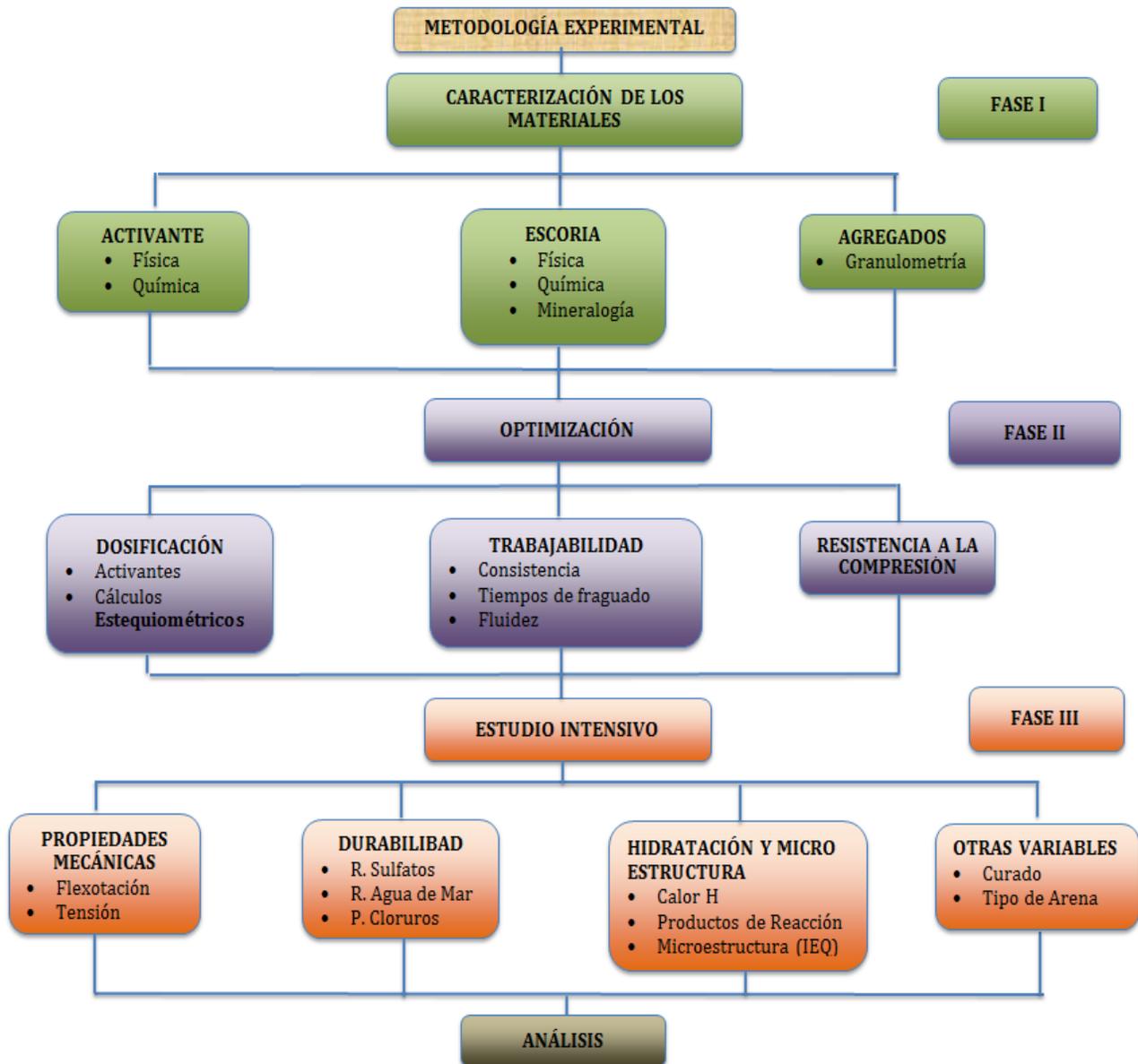
En muchos materiales y sistemas electroquímicos, la impedancia varía con la frecuencia del potencial aplicado en una forma que está relacionada con las propiedades de dichos materiales. Esto se debe a la estructura física del material, a los procesos electroquímicos que tengan lugar, o a una combinación de ambos. Por consiguiente, si se hace una medida de impedancias en un rango de frecuencias adecuado y los resultados se representan en unos ejes acordes a los datos obtenidos, es posible relacionar los resultados con las propiedades físicas y químicas de los materiales y sistemas electroquímicos.

### **3.1.5. Microscopía de fuerza atómica**

El principio está basado en la interacción local entre la punta y la superficie de una muestra, proporcionando imágenes tridimensionales de superficies con alta resolución espacial en tiempo real. La fuerza interatómica entre la punta y la superficie está dominada por una gama de interacciones de Van der Waals. El microscopio consta de una pequeña punta aguda en el extremo libre de un cantiléver que explora sistemáticamente la superficie de interés para generar una imagen topográfica. El cantiléver es de 100-200 mm de largo, con una punta que es solo unos pocos micrómetros de largo y aproximadamente 10 nm de diámetro en su ápice. La deflexión se mide con un dispositivo, tal como una palanca óptica y se usa para generar un mapa de la superficie topográfica. La palanca óptica consiste en un haz de láser enchapado en oro en la parte posterior de reflexión del cantiléver y un fotodetector (PSPD) que registra la posición del haz reflejado.

Se utilizó para entender la nano y la microestructura del cemento de escoria activado alcalinamente. En este sentido, identificar la rugosidad en la superficie de una pasta, nos permite también establecer una coherente explicación de la porosidad del material. En algunas investigaciones se utiliza para calcular la rugosidad de la zona de transición interfacial entre el agregado y la pasta de cemento.

### 3.2. Metodología experimental



*Figura 13* Representación esquemática del desarrollo experimental  
Fuente: elaboración propia.

La metodología experimental consistió, fundamentalmente, en las 3 fases presentadas en la *figura 13*. Inicialmente, se llevó a cabo la caracterización de la materia prima; también se desarrolló un estudio preliminar para determinar las condiciones y formulaciones adecuadas de la síntesis de los cementos de escoria activados alcalinamente. El estudio de los sistemas se basó la variación de sus componentes activos (tipo y concentración de los activadores alcalinos), así como de las condiciones de producción (contenido de activante, fraguado y trabajabilidad). Los morteros producidos se evaluaron por su resistencia a la compresión y se seleccionaron los que mostraron mejores resultados.

### 3.3. Caracterización de los materiales de partida

#### 3.3.1. Escoria granulada de alto horno.

Se utilizó como precursor una escoria granulada de alto horno proporcionada por la empresa Argos, quienes indicaron que el proveedor de este material fue la empresa Colombiana Acerías Paz del Río. La escoria se recibe en forma granular con un tamaño promedio de 2mm y húmeda. Se inicia el proceso de adecuación del material, sometiéndolo a secado en un horno en lotes de 25 Kg a una temperatura de 100 °C durante 24 horas o hasta alcanzar el secado óptimo (*figura 14*).



*Figura 14* Escoria granulada de alto horno y secado  
Fuente: elaboración propia.

Una vez secado el material, se continúa el acondicionamiento mediante el proceso de molienda. Este se realiza en un molino de montaje giratorio, revestimiento interior refractario, con capacidad de 80 Kg y funciona por el principio de impacto y atrición mediante bolas de cerámica que golpean el material continuamente sin contaminarlo. El tiempo aproximado en el proceso fue de 3 horas para alcanzar una finura aceptable (*figura 15*).



**Figura 15** Equipo de molienda y producto  
Fuente: elaboración propia.

Del material molido se tomaron muestras para determinar la densidad y finura de acuerdo con la norma NTC221 y NTC 33 respectivamente. En la **tabla 8** se resumen los resultados, que son el promedio de tres ensayos realizados para cada propiedad física.

**Tabla 8** Propiedades físicas de la escoria  
Fuente: elaboración propia.

Propiedad	Resultado
Densidad	2.36 g/cm <sup>3</sup>
Finura	3729 cm <sup>2</sup> /g

El área superficial de la escoria, a partir de la prueba de permeabilidad al aire Blaine, debe presentar una pequeña variación en los resultados, pues la calibración del aparato es tomada con

respecto al cemento Portland. Su resultado no es el esperado, ya que los valores óptimos que se reportan en la literatura se encuentran entre los 4500 cm<sup>2</sup>/g a 5500 cm<sup>2</sup>/g. Sin embargo, están por encima del valor mínimo, permitido para el cemento Portland de 2800 cm<sup>2</sup>/g. El análisis químico y microestructural se realiza mediante técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX). A continuación, se indican los resultados (ver tabla 9):

**Tabla 9** Composición química de la escoria  
Fuente: elaboración propia.

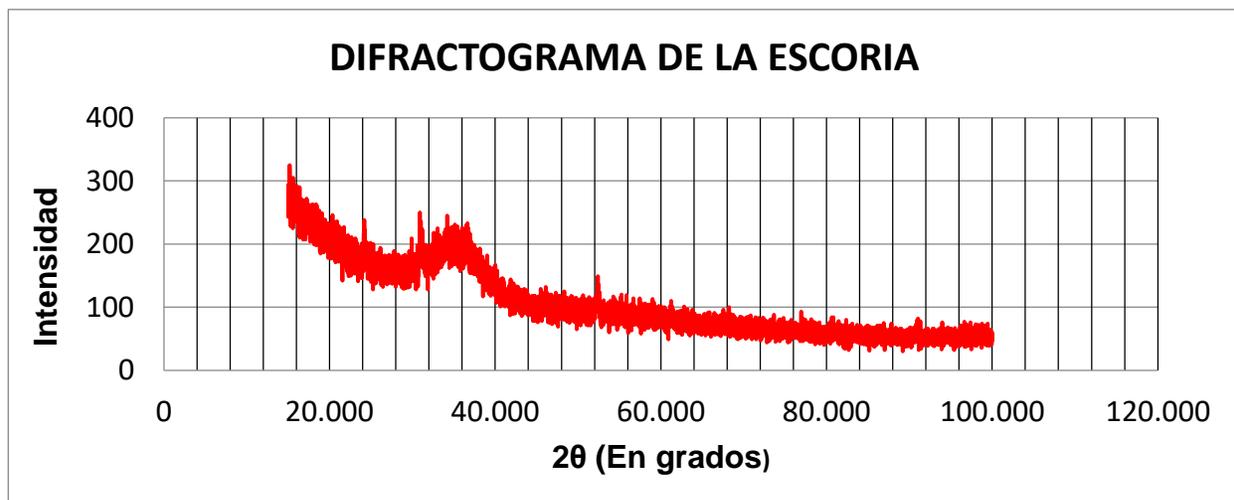
<b>ELEMENTO Y/O COMPUESTO</b>	<b>ESCORIA (% EN PESO)</b>
<b>CaO</b>	<b>42,31%</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>33,01%</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>12,85%</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>3,93%</b>
<b>MnO</b>	<b>3,35%</b>
<b>MgO</b>	<b>1,67%</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1,04%</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0,46%</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0,41%</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0,35%</b>
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>0,17%</b>
<b>Ba</b>	<b>0,16%</b>
<b>Sr</b>	<b>0,08%</b>
<b>Ce</b>	<b>0,07%</b>
<b>Cl</b>	<b>0,05%</b>
<b>V</b>	<b>0,03%</b>
<b>Zr</b>	<b>0,02%</b>
<b>Y</b>	<b>0,01%</b>
<b>Zn</b>	<b>48ppm</b>

Con respecto a los resultados de este análisis químico, la escoria de alto horno se considera básica de acuerdo con el índice de basicidad, que es la relación entre el total de los componentes básicos (CaO, MgO) y el contenido total de los componentes ácidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Si consideramos los componentes mayoritarios tenemos CaO/SiO<sub>2</sub>; al reemplazar los valores obtenemos un valor de 1.28, que es mayor a uno, lo que indica su característica básica. Este criterio diferencia las escorias y se considera importante cuando son activadas (ver ecuación 7).

$$I_h = \frac{CaO + 1.4MgO + 0.56Al_2O_3}{SiO_2} \quad (\text{Ec. 7})$$

La composición química también nos establece un módulo de hidratación denominado, en algunos casos, índices de calidad. Existen diferentes formas de calcularlo, dependiendo de si se consideran o no los constituyentes minoritarios. El resultado de estas relaciones es el producto de investigaciones que estudian la importancia y el papel que juegan estos elementos en la hidratación. Para este estudio consideramos una relación muy común y aceptada en muchos países. Al reemplazar los valores de la tabla, tenemos como resultado 1.57 que es un poco inferior al valor requerido de 1.65, lo que puede representar alguna pequeña limitación o cambio en los resultados.

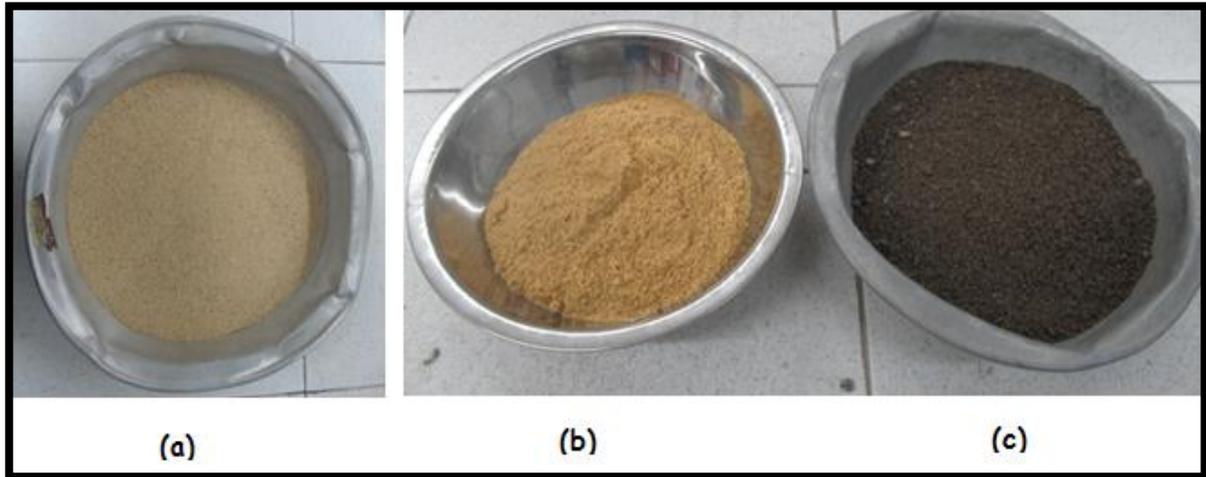
De acuerdo al difractograma que mostro el DRX en la **figura 16**, la escoria presenta un alto grado de amorficidad. El pequeño porcentaje de cristalinidad puede corresponder a una única fase cristalina de melilita y, en particular, una disolución sólida en la línea de gelenita ( $C_2AS$ ). Esto considerando el análisis que se realizó a un difractograma en el que se mezcló la escoria con 10% de rutilo puro (cristalino), y se correlacionó con otros posibles compuestos cristalinos que corresponderían al material. Además, se tuvo en cuenta la composición química de la escoria, que presenta valores muy importantes de óxido de aluminio en comparación con el óxido de magnesio.



**Gráfica 6** Curva granulométrica  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Arena

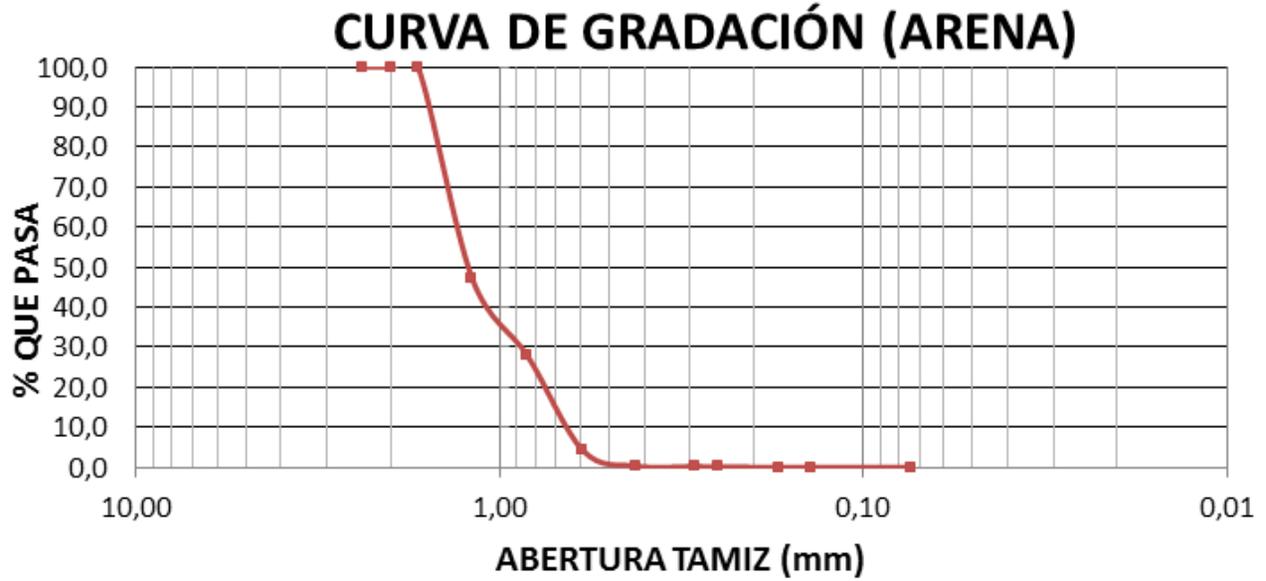
Como agregado fino se utilizó arena sílicea N° 30 distribuida por la empresa Arena Sílicea con la siguiente apariencia (Figura 18) y características.



**Figura 16** a) Arena sílicea; b) Arena de peña; c) Arena lavada  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 10** Composición química de la arena  
Fuente: elaboración propia.

ELEMENTO Y/O COMPUESTO	ARENA (% EN PESO)
SiO <sub>2</sub>	94,69%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,24%
SO <sub>3</sub>	3,93%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,45%
TiO <sub>2</sub>	0,18%
K <sub>2</sub> O	0,17%
Na <sub>2</sub> O	0,07%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05%
MgO	0,05%
SO <sub>3</sub>	0,02%
CaO	0,01%
Cl	0,01%



Gráfica 7 Curva granulométrica  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 11 Granulometría arena  
Fuente: elaboración propia.

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO CORREGIDO (g)	% RETENIDO	% PASA
3"				
2"				
N° 8	0,0	0,0	0,0	100,0
N° 10	0,0	0,0	0,0	100,0
N° 12	0,0	0,0	0,0	100,0
N° 16	53,3	53,3	53,3	47,0
N° 20	19,2	19,2	19,2	27,9
N° 30	23,9	23,9	23,9	4,1
N° 40	3,8	3,8	3,8	0,3
N° 50	0,1	0,1	0,1	0,2
N° 60	0,1	0,1	0,1	0,1
N° 80	0,1	0,1	0,1	0,0
N° 100	0,0	0,0	0,0	0,0
N° 200	0,0	0,0	0,0	0,0
FONDO	0,0	0,0	0,0	
	100,5	100,5		

Esta es la caracterización para la arena que se utilizó en el estudio intensivo. Al finalizar, como una variable adicional, en las mejores mezclas se cambió el tipo de arena y se utilizó una de río y otra de peña, obtenidas del almacén Homecenter. La caracterización no se presenta, pero se cuenta con la ficha técnica.

### 3.3.3. Grava.

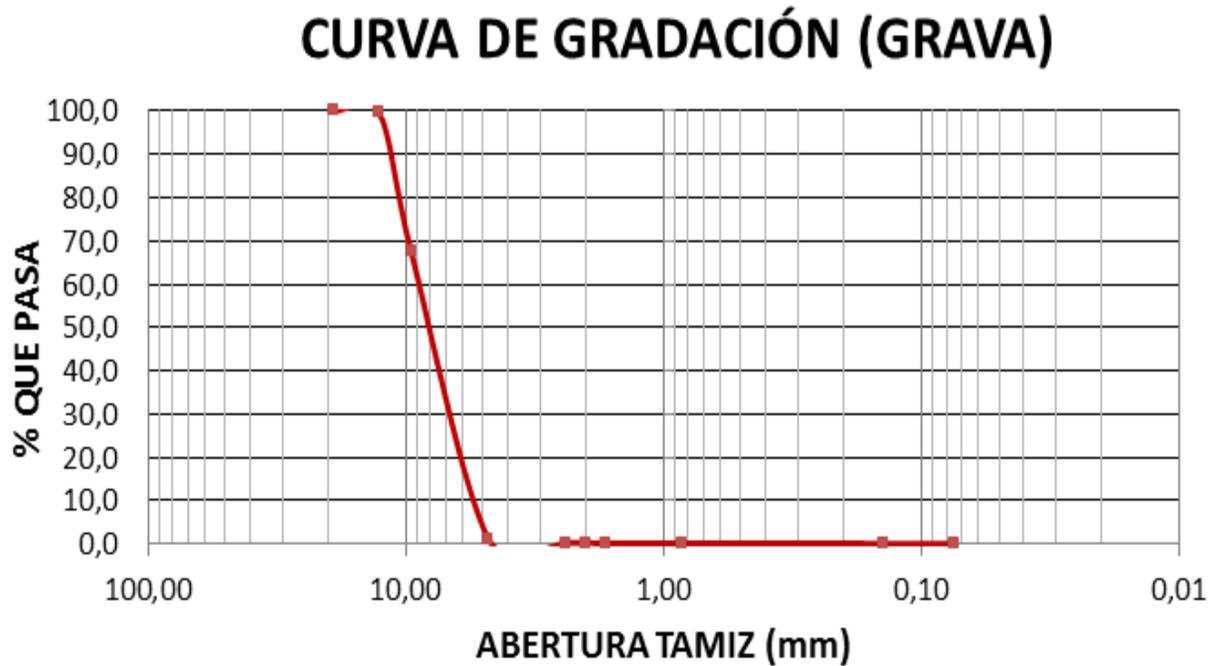
Como agregado grueso se utilizó grava  $\frac{3}{4}$ ", distribuida por la empresa Arena Silícea con la siguiente apariencia y características.



*Figura 17* Grava

**Tabla 12** Granulometría grava  
Fuente: Empresa Arena Silícea.

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO CORREGIDO (g)	% RETENIDO	% PASA
3"				
2"				
1 1/2"				
1"				
3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	2,1	2,1	0,3	99,7
3/8"	216,5	216,3	32,3	67,4
N° 4	444,3	443,9	66,3	1,1
N° 8	5,1	5,1	0,8	0,3
N° 10	0,3	0,3	0,0	0,3
N° 12	0,1	0,1	0,0	0,2
N° 20	0,4	0,4	0,1	0,2
N° 100	0,8	0,8	0,1	0,1
N° 200	0,3	0,3	0,0	0,0
FONDO	0,1	0,1	0,0	
	670,0	669,4		



*Gráfica 8* Curva granulometría grava  
Fuente: Empresa Arena Silícea.

La grava se utilizó en la mezcla de concreto, con la mejor dosificación y activante, para determinar la resistencia a compresión y hacer las probetas para el Ensayo de Penetración de Cloruros (RCPT).

#### 3.3.4. Activadores alcalinos y agua.

Como activadores alcalinos se empleó hidróxido de sodio (NaOH) en pellets al 98% de pureza y un silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) de grado industrial, proporcionado por la distribuidora Químicos Campota, cuyas composiciones se encuentran detalladas en las **tablas 13 y 14**.

**Tabla 13** Propiedades físico químicas del silicato de sodio

Fuente: Químicos Campota.

CONCEPTO	RANGO ACEPTADO	RESULTADOS
Color	Grisáceo	Grisáceo
Textura	Fluida	Fluida
Olor	Característico	Inodoro
Densidad (°Bé) A 20°	49 ± 1	50
Gravedad Especifica	1,480 a 1,500	1,5
Alcalinidad (%Na <sub>2</sub> O)	12,5 ± 1	12,7
Sílice (%SiO <sub>2</sub> )	31,20 a 33,15	31,2
Solidos Totales (%)	43,7 a 44,5	43,9
Relación (Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>2</sub> )	1:2,10 a 1:2,40	1:2,45
Viscosidad	600 a 850 CENTIPOISE	750
P/H	12 ± 05	12,1

**Tabla 14** Propiedades físico químicas del hidróxido de sodio

Fuente: Químicos Campota.

PRODUCT	CAUSTIC SODA FLAKES
Batch No.	412
Manufacturing Date	27.10,2016
Expiry Date	26.10,2020
Sodium Choride, NaCl	0.014% (m/m)
NaOH	98.2% (m/m)
Appearance	White or almost White hygroscopic flakes which tend to stick together

Los activantes caracterizados son los más utilizados en el mercado, son económicos y los resultados reportados en las distintas investigaciones han dado los mejores resultados.

### **3.4. Solución Activante**

#### **3.4.1. Tipo de Activador.**

Los activantes tienen la función de acelerar la solubilización de la materia prima, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura estable. El rendimiento de un conglomerante elaborado a partir de la activación de EGAH está influenciado de manera importante por el tipo de activante que se utilice. La resistencia mecánica, la trabajabilidad y los tiempos de fraguado son algunos de los aspectos que se pueden ver influenciados en la elaboración del material. Con esta información y los reportes de investigaciones previas que indican buenas prestaciones mecánicas y de durabilidad con ciertos activantes, se decidió utilizar dos activadores, el hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>).

Sumado a lo anterior, algunos estudios demuestran que la eficacia del activador está asociada con la afinidad entre el material precursor, que por su procedencia e historia térmica puede variar y el activador alcalino (Pinto, 2004) (Van Jaarsveld & Van Deventer, 1999). Por esto, parte de la investigación inicial es encontrar la relación entre el precursor EGAH y los activantes.

#### **3.4.2. Concentración del activador.**

Otro factor importante en la elaboración de una solución activante es la concentración del activador. En principio, cuanto mayor es su concentración, mayor es la solubilidad de la materia prima y, en consecuencia, mayores son las resistencias mecánicas alcanzadas por el conglomerante formado. Sin embargo, la presencia de álcalis en exceso puede generar problemas de carbonatación y eflorescencias que den como consecuencia una posible disminución en las propiedades mecánicas y de durabilidad; esto, sumado a los costos económicos y ambientales que se generan.

Las investigaciones señalan que existe una concentración óptima para el precursor utilizado (Fernández-Jiménez & Puertas, 1997; Palomo, Grutzeck, & Blanco, 1999).

Entendemos la activación alcalina como una reacción inorgánica de poli-condensación y formación de precursores zeolíticos, donde su estructura consiste en una red polimérica de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  enlazados alternadamente a través de los átomos de oxígeno. El aluminio, al tener cuatro átomos de oxígeno en su esfera de coordinación, crea una carga negativa en su entorno, y por tanto, la presencia de cationes, como  $\text{K}^+$  o  $\text{Na}^+$ , son importantes para mantener la neutralidad eléctrica en la estructura (Barbosa, MacKenzie, & Thaumaturgo, 2000). Dado que, la concentración en este trabajo está referida al porcentaje de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) en peso de escorial y no simplemente a la concentración de la solución.

### 3.4.3. Preparación de la solución activante.

Las soluciones utilizadas en la investigación se separaron de tres formas:

- **Disolución NaOH y agua destilada:** se preparó disolviendo el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) al 98% en pellets en agua destilada. Como la masa del disolvente (agua destilada) se mantuvo fija, variando únicamente el número de moles del soluto; como se mostrará más adelante, la concentración de esta solución está expresada en molalidad y no en molaridad como es habitual. La disolución genera una reacción exotérmica que hace que se caliente, por esta razón, su preparación se realizó un día antes de realizar las mezclas.
- **Disolución  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y agua destilada:** su preparación no genera una reacción exotérmica. Luego se adicionó el silicato de sodio y el agua destilada en el momento de preparar la mezcla. Esto hace que no se requiera una preparación previa del silicato con el agua, sino que entren directamente como componentes de la mezcla.

- **Disolución NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> y agua destilada que permitiera modificar el módulo del silicato (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O):** en este caso, la presencia de los dos activantes, uno de ellos con reacción exotérmica al diluirse en el agua, obligó a preparar una solución de hidróxido de sodio en agua destilada a una concentración molar; para el caso, fue de 8 molar con 24 horas de anticipación a la elaboración de la mezcla. Luego con los cálculos realizados, el agua, el silicato de sodio y la solución 8 molar del hidróxido de sodio se adicionaron directamente como componentes a la mezcla.

### 3.5. Dosificación de las mezclas

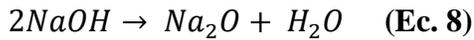
Uno de los aspectos que se consideran en la calidad de un cemento, es su resistencia a la compresión, no con respecto a las pastas, porque se quiere mirar es su propiedad conglomerante. Por esta razón, el estudio se desarrolla fundamentalmente en la elaboración de mezclas de morteros y su estudio en el comportamiento mecánico y de durabilidad. Además, los resultados que se obtengan son determinantes en la calidad del concreto que se quiere desarrollar. También se elaboraron pastas con el fin de poder tener una caracterización microestructural de los compuestos formados, al final con los mejores resultados se realizó un diseño de mezcla para concretos.

#### 3.5.1. Mezclas de pastas y mortero

En todas las mezclas de mortero se utilizó la proporción en masa de una parte de escoria por 2,75 de arena como se indica en la NTC 220. La relación agua - escoria se modificó en valores de 0,4, 0,45 y 0,5, para el caso de la activación alcalina con NaOH, en todos los demás casos se mantuvo constante en 0,4:

- **Dosificación con NaOH:** una vez definida la concentración en términos del porcentaje de Na<sub>2</sub>O y la cantidad de escoria a utilizar en la mezcla, se calcula la cantidad en masa de Na<sub>2</sub>O que se requiere. Por lo que sigue, consideramos la relación

estequiométrica entre este y el hidróxido de sodio (NaOH), de acuerdo con la siguiente reacción química balanceada y sus respectivos pesos moleculares (ecuación 8).



$$39.998 \rightarrow 61.997 + 18$$

Esto nos permite obtener la cantidad de hidróxido de sodio (NaOH) que se requiere para la concentración dada. Así, sin considerar el agua presente en el hidróxido de sodio, se calcula la cantidad de agua requerida para la solución con la relación agua cemento (A /C) previamente definida. Por ejemplo, para una activación del 4% en peso de Na<sub>2</sub>O con respecto al peso de la escoria de 1000g, se tiene que 1000g (escoria) x 0.04% = 40g de Na<sub>2</sub>O, que es la cantidad en masa de óxido de sodio que se requiere, pero el compuesto que se tiene es NaOH, luego se calcula como:

$$40g(Na_2O) \times \frac{39.981 \times 2gNaOH}{61.997gNa_2O} = 51.59gNaOH$$

Lo cual significa que, para una concentración de 4% de Na<sub>2</sub>O en peso de escoria (1000g), se requiere 51.59 gramos de NaOH. Si la relación agua cemento es de 0.4, la cantidad de agua que se requiere es de 400ml, que será en la que se diluirán los 51.59 gramos de NaOH. Finalmente, se tiene para la elaboración del mortero 1000g de escoria, 2700g de arena y la solución anteriormente calculada.

- **Dosificación con Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>:** como en el caso anterior, de acuerdo con la concentración se calcula la cantidad de Na<sub>2</sub>O en peso que se requiere. A partir de las características del silicato de sodio, observamos en porcentaje cuánto aporta el silicato de Na<sub>2</sub>O; con este porcentaje calculamos la cantidad en masa de silicato que

se requiere. Como el silicato se presenta en forma líquida, determinamos la densidad y así calculamos el volumen de silicato que debe ser agregado a la mezcla de mortero.

- **Dosificación con Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>- NaOH:** aquí más que utilizar dos activantes, lo que se quiere es modificar el módulo del silicato, definido como la relación SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O, en tanto valor significativo en las propiedades reológicas y de resistencia del mortero. Como el silicato industrial que se adquirió tiene definido un módulo, este valor se puede alterar cambiando la cantidad de Na<sub>2</sub>O. Si se quiere disminuir el módulo, se debe incrementar el Na<sub>2</sub>O, que se logra adicionando hidróxido de sodio (NaOH) a la solución; es el caso que corresponde a la investigación, ya que el módulo del silicato utilizado es de 2.45, pero se requiere menor valor. Por el contrario, se tendría que agregar sílice activa.

Para tener mejor claridad sobre la dosificación del activante, a continuación, se explica a partir de un ejemplo. Si la concentración que se quiere es de 5.5% de Na<sub>2</sub>O en masa de escoria y la cantidad de escoria es 1000g, se tiene que la cantidad en masa que se requiere de Na<sub>2</sub>O es 55g. Digamos que el módulo que se quiere en la solución es de 0.75, luego de la relación SiO<sub>2</sub>/ Na<sub>2</sub>O= 0.75 encontramos la cantidad en masa de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) que debe estar en la solución (41.25g); pero, como el único que aporta SiO<sub>2</sub> es el silicato de sodio, calculamos cuanto silicato de sodio en masa tiene esta cantidad de óxido de sodio SiO<sub>2</sub> a partir de la composición en porcentaje, tal y como se refleja en la ficha técnica:

- ✓ Densidad = 1.5263 g/cm<sup>3</sup>.
- ✓ SiO<sub>2</sub> = 31.2%.
- ✓ Na<sub>2</sub>O = 12.7%.
- ✓ H<sub>2</sub>O = 56.1%.

Por regla de tres simple se tiene que la cantidad de silicato de sodio es 132.21g, que corresponde a 86.62 ml. Luego, calculamos cuanto aporte de  $\text{Na}_2\text{O}$  ofrece esta cantidad de silicato, nuevamente con los datos que se tienen, tenemos que el aporte es de tan solo 16.8g de  $\text{Na}_2\text{O}$ . De acuerdo con la concentración calculada inicialmente, se encontrarían pendientes 38.2g de  $\text{Na}_2\text{O}$  que los aportará la solución de hidróxido de sodio 8M preparada previamente.

La cantidad 38.2g de  $\text{Na}_2\text{O}$  por relación estequiométrica, corresponde a 49.29g de NaOH y como conocemos, que en la solución 8M tiene 320g de NaOH por litro, calculamos el volumen en ml de la solución 8M que proporciona los 49.29g de NaOH, esto corresponde a 0.154 L. En este momento, tendríamos la cantidad de silicato de sodio y la solución 8M que se requieren en la mezcla, faltaría solo la cantidad de agua que se necesitaría.

Si la relación agua-cemento es de 0.4, se requeriría de 400ml de agua, pero resulta que el silicato de sodio, la solución de hidróxido de sodio 8M y el hidróxido de sodio contienen agua, por consiguiente, se debe calcular esta cantidad de agua y restársela a los 400ml. El agua del hidróxido de sodio se calcula con la relación estequiométrica de la ecuación 3.2; la del silicato de sodio con los valores que presenta la ficha técnica y la de la solución de hidróxido de sodio 8M, teniendo la densidad se calcula la masa y le restamos la masa del  $\text{Na}_2\text{O}$  presente en la solución (49.29g):

$$\text{Agua a adicionar} = 400\text{ml} - 11.1\text{ml (NaOH)} - 74.17\text{ml (Na}_2\text{SiO}_3) - 135.5\text{g (sol 8M)} = 179.23\text{g.}$$

Lo que significa que para una concentración de 5.5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  en peso de escoria, se requiere 1000g de escoria, 2700g de arena, 86.62ml de silicato de sodio, 154ml de solución de hidróxido de sodio 8M y 179.23ml de agua. En ningún caso se utilizaron aditivos.

Las mezclas para pastas se realizaron con la misma metodología de cálculo, sin utilizar arena y en menores cantidades. Éstas se manejaron para determinar la consistencia normal, los tiempos de fraguado, probetas para SEM, DRX, EIS, Y AFM.

### 3.5.2. Mezcla para concreto.

Con el mejor resultado obtenido en resistencia a compresión de los morteros, que no requerían de temperatura, se realizaron los cálculos del diseño de mezcla siguiendo la metodología paso a paso propuesta por el comité ACI 211. Con asentamiento de 10 cm, sin aire incluido, contenido de agua de mezclado de 191 Kg/m<sup>3</sup>, resistencia de diseño a la compresión de 350 Kg/cm<sup>2</sup>, relación solución activante escoria de 0.4, contenido de escoria 382Kg, granulometría combinada con 40% de fino y 60% de grueso, entre otros valores. Estos resultados corresponden a la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto, pero el volumen fundido pertenece a 0.0172m<sup>3</sup>; la solución de la mezcla se ajustó tanto para cumplir el % Na<sub>2</sub>O en peso de escoria, como la cantidad de agua de mezclado mediante porcentajes. En la **tabla 15** se indican las calidades de material utilizado:

**Tabla 15** Cantidades de material en la mezcla de concreto  
Fuente: elaboración propia.

MATERIAL	CANTIDAD
ESCORIA	6000 g
ARENA	10676g
GRAVA	16024g
SILICA DE SODIO	1541mL
SOLUCION 8M	1204mL
AGUA	254. 45mL

Es importante resaltar que la activación alcalina de la escoria es totalmente distinta al proceso de hidratación del cemento Portland; a pesar de que esta dosificación desarrolló buenos resultados, es solo un intento por empezar a descifrar las lógicas que subyacen en este proceso.

### 3.6. Elaboración de probetas

La elaboración de especímenes se desarrolló tomando como referencia las normas establecidas (NTC, I.N.V.E).

- **Pastas:** Se realizaron los ensayos de consistencia normal (NTC 110) y tiempos de fraguado (NTC 118). En la **tabla 16** se resumen los resultados.

**Tabla 16** Consistencia y tiempos de fraguado  
Fuente: elaboración propia.

ACTIVADOR	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH
CONSISTENCIA N. %	22	23
FRAGUADO INICIAL (min)	110	10
FRAGUADO FINAL (min)	165	30

- **Morteros:** se utilizó la norma NTC 220, que fija la composición de los morteros, el llenado de los moldes y la determinación de la resistencia a la compresión. Las modificaciones presentadas en su elaboración están relacionadas con los moldes que se manipularon, para este caso no son metálicos sino de acrílico con 6mm de espesor y un diseño que permitiera tener más unidades y facilidad de desmoldar. El otro aspecto tiene que ver con los tiempos de mezclado, algunas investigaciones reportan un incremento en la resistencia cuando los tiempos de mezclado son prolongados; con esta premisa, además del aspecto visual que presenta la mezcla, los tiempos se incrementaron en 4 minutos. Finalmente, se cambió el orden en que se mezclan los componentes, para esto resulta mejor diluir primero la escoria con el activante y luego adicionar la arena. La **figura 18** muestra el aspecto de los cubos, moldes utilizados y consistencia del mortero.



**Figura 18** Moldes, cubos y mortero  
Fuente: elaboración propia.

Las mezclas elaboradas con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  no fraguaron a las 48 horas, se colocaron en el horno durante 24 horas a una temperatura de  $50^\circ\text{C}$ . Estas mezclas requieren de temperatura para acelerar el proceso de activación y, de acuerdo con la experimentación, el tiempo puede ser más corto. Los resultados de fluidez son bajos por la relación activante de escoria utilizada de 0.4; es aún más crítico cuando se utiliza  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , ya que su viscosidad es mayor y se hace más cohesiva. En la **tabla 17** se muestra la fluidez de los morteros y en la **figura 21** el ensayo.

**Tabla 17** Fluidez en morteros  
Fuente: elaboración propia.

ACTIVADOR	NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$
FLUIDEZ %	34	18	13

A pesar de que la fluidez es muy baja, el mortero permite ser trabajado y colocado. Es importante tener presente que el  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  tiene mayor viscosidad que el agua y que al reaccionar se hace pegajoso. Podemos mejorar su fluidez pero puede resultar en una disminución de su resistencia a compresión o disminuir drásticamente los tiempos de fraguado. Estos aspectos y la estandarización de un ensayo deben ser estudiados con detalle en otras investigaciones.



**Figura 19** Aspecto del tronco de cono del mortero  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$   
Fuente: elaboración propia.

- **Concreto:** se elaboró utilizando los activantes  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . A pesar de que los tiempos para la colocación son muy cortos, se pudo realizar el llenado en los 10 cilindros disponibles como lo indica la norma NTC 550. Es claro que esta mezcla con los ajustes correspondientes pueden ser utilizados en prefabricados. La *figura 20* muestra el aspecto de los cilindros elaborados.



**Figura 20** Cilindros de concreto activados alcalinamente  
Fuente: elaboración propia.

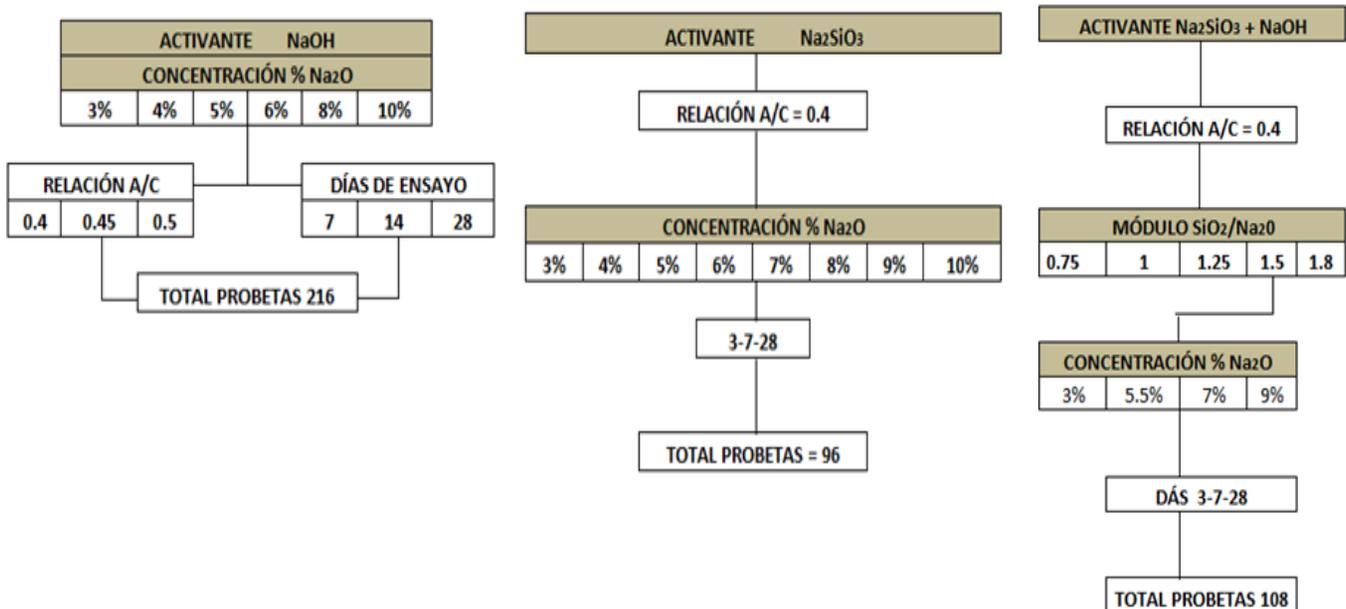
### 3.7. Ensayos realizados

El estudio tiene como objetivo la elaboración de mezclas de escoria activadas alcalinamente para determinar si las propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, son comparables con las de un cemento convencional. Además, si el comportamiento frente al contacto con soluciones agresivas es más eficiente y permite ser utilizado como una alternativa viable en la industria de la construcción. En este conocimiento potencial del uso del material, se quiere también extraer información sobre su micro estructura, formas de reaccionar y productos generados en el momento de activarse. En el logro de esta propuesta se adelantaron los siguientes ensayos.

#### 3.7.1. Resistencia mecánica.

Inicialmente, se definió una matriz de ensayos sobre la resistencia a compresión de morteros, que permitiera identificar las mezclas con mejores resultados. En la **tabla 18** se muestran los ensayos realizados. Para cada mezcla se elaboraron 4 probetas y se fallaron 3, con un total de 420 probetas. Luego, cada punto representado en los resultados es el promedio de tres probetas ensayadas.

**Tabla 18** Matriz de ensayos a compresión de morteros  
Fuente: elaboración propia.



Con el mejor resultados de NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + NaOH, se elaboraron probetas para ensayos a flexión y tensión, de acuerdo con las normas I.N.V.E-324-07 y I.N.V.E.-327-07 (Instituto Nacional de Vías), respectivamente. Además, se elaboraron probetas para condiciones de curado a una temperatura de 25° y humedad relativa de del 65%. En la **figura 21** se muestran las probetas y el montaje. Al igual que en el caso anterior, para cada mezcla se realizaron 4 probetas y se fallaron 3, para un total de 99 probetas.



**Figura 21** Ensayos a flexión y tensión  
Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2. Durabilidad.

La durabilidad es una de las propiedades deseadas más importantes en el concreto, la característica directamente asociada con el tema, es la permeabilidad del material. El control de la velocidad de entrada de la humedad, que puede contener productos químicos agresivos, es significativo para incrementar el tiempo de uso de una estructura. Con las dosificaciones óptimas, se realizaron ensayos para evaluar el comportamiento de los morteros en medios sulfáticos y agua de mar. El método de Kock Steinegger (1990) fue utilizado para evaluar la resistencia a los sulfatos y agua de mar. La acción corrosiva de la disolución acuosa se determina con la resistencia a flexotracción que experimenta la probeta con el transcurso del tiempo sumergido en la solución. Dada la disponibilidad de los moldes se evaluó la compresión del mortero expuesto.

La solución acuosa de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), contiene un 4.4% en peso de agua y la disolución de agua de mar artificial se preparó con las recomendaciones de la ASTM 1141-98. Además, se utilizaron soluciones como medio de referencia agua destilada y agua de suministro del acueducto. Las probetas se elaboraron y curaron en cámara de humedad durante 21 días, a partir de los cuales fueron sumergidos totalmente en la solución y luego sacados al medio ambiente para ser fallados a los 3, 28, 56 y 90 días. La **figura 22** muestra la inmersión de las probetas; en la **tabla 19** se indica los ensayos realizados al mejor resultado de NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ , en las cuatro soluciones.



**Figura 22** Inmersión de probetas  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 19** Matriz de ensayos a compresión de morteros  
Fuente: elaboración propia.

<b>AGUA CON SULFATOS</b>											
NaOH				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH			
33	28	56	90	33	28	56	90	33	28	56	90
<b>AGUA SALADA</b>											
NaOH				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH			
33	28	56	90	33	28	56	90	33	28	56	90
<b>AGUA DESTILADA</b>											
NaOH				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH			
33	28	56	90	33	28	56	90	33	28	56	90
<b>AGUA DEL ACUEDUCTO</b>											
NaOH				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>				Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH			
33	28	56	90	3	28	56	90	33	28	56	90
<b>TOTAL, PROBETAS</b>				144							

Como complemento a los anteriores ensayos, se evaluó la resistencia en el concreto activado alcalinamente al ingreso de iones cloruro mediante la Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (Rapid Chloride Permeability, RCPT). Esto se realizó con la mejor mezcla y de acuerdo con la norma ASTM 1202. En la *figura 23* se muestra el montaje de ensayo.



**Figura 23** Ensayo RCPT  
Fuente: elaboración propia.

### 3.7.3. Microestructura.

La comprensión detallada de la microestructura en los MAA, resulta actualmente de gran interés. Entender las condiciones de activación y los productos de reacción generados, permitirá encontrar las condiciones óptimas de resistencia, trabajabilidad y durabilidad de materiales que generen las bases técnicas en la adopción de normas y garanticen su comercialización. En un intento por alcanzar el anterior propósito, se realizaron una serie de ensayos que se complementan y correlacionan con los resultados.

- **Calorimetría:** es una forma de relacionar las características de evolución del calor generado en el momento de la reacción entre la escoria y el activante, con los diferentes procesos que ocurren en la activación alcalina a edades tempranas. Se determinó el calor de reacción y las curvas características para cada una de las

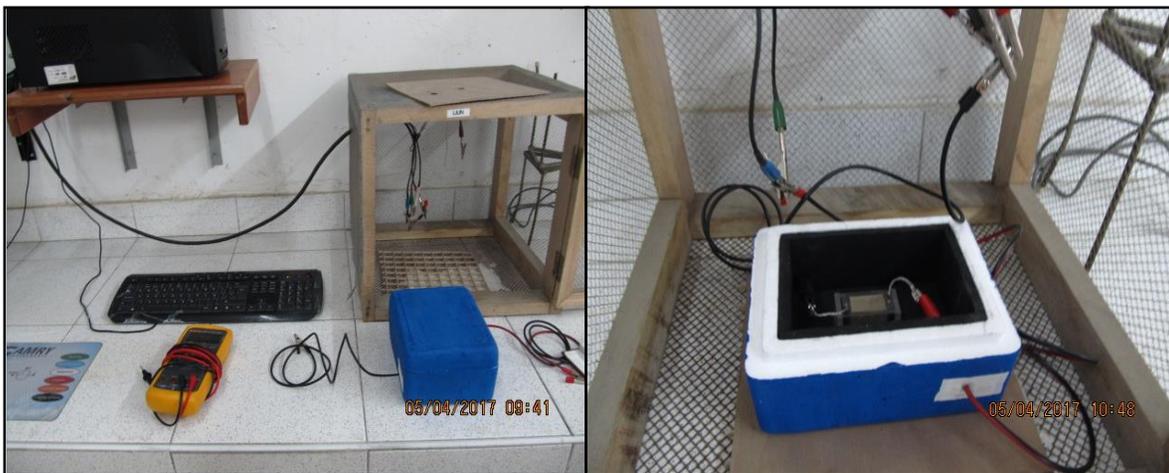
mezclas óptimas, para ser comparadas con las del cemento Portland. El equipo utilizado es una cámara semi-adiabática que registra automáticamente la evolución de la temperatura durante la hidratación de probetas de pasta de cemento.

- **DRX:** con el fin de conocer las transformaciones mineralógicas que se pueden presentar en la microestructura de las pastas y morteros, se realizaron estudios por difracción de rayos X. Algunos productos de reacción presentan naturaleza cristalina. Se quiere establecer cualitativamente este cambio y, si es posible identificar, estas estructuras. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de materiales de la Universidad Militar.
- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** observar las transformaciones y las características morfológicas presentes en la microestructura a edades tempranas, también nos puede dar idea de los procesos que ocurren en la química de reacciones. El estudio se realizó con el apoyo del Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Nacional de Colombia. Se utilizó un microscopio electrónico de Barrido QUANTA 200 FEI Recubridor TARGET de ORO QUOHRUM 150R.
- **Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas (EIS):** relacionar la evolución entre la resistividad que ofrecen los materiales activados alcalinamente con la velocidad de reacción, el calor y los tiempos de ajuste, son una posibilidad más en la correlación de fenómenos presentes en las mezclas. El monitoreo eléctrico se basa en el supuesto de que, en un sistema sometido a modificaciones físicas, químicas y los parámetros eléctricos, reflejan el cambio de la naturaleza, movilidad, concentración y distribución de los portadores de carga. Se ha demostrado que la

cantidad de agua, la velocidad de reacción y la consolidación de los productos de geopolimerización, afectan profundamente la respuesta dieléctrica (Camp & Bilotta, 1989; Gu & Beaudoin, 1996). Para esto se utilizó un potenciostato-galvanostato marca Gamry-750, con licencia de EIS hasta 300 KHz.

Los datos obtenidos en los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica, son el módulo de la impedancia IZI, el ángulo de fase  $\varphi$  y los componentes real e imaginario de la impedancia total. Hay dos maneras comunes de representar estos datos, denominados gráficos de Nyquist y de bode.

Los instrumentos electrónicos básicos, para obtener los espectros de impedancia de un sistema electroquímico, están constituidos por un generador analizador de funciones (FRA por sus siglas en inglés "frequency response analyser"), el cual puede analizar señales sinusoidales, en un amplio rango de frecuencias, a un potenciostato de alta velocidad de respuesta y sensibilidad. Este aplica la señal sinusoidal correspondiente al electrodo de trabajo en la celda electroquímica. La respuesta del electrodo mediada por el potenciostato es alimentada por analizador de funciones digital, que determina la respuesta de impedancia y el ángulo de fase correspondiente a cada frecuencia. El montaje del sistema se observa en la *figura 24*.



**Figura 24** Montaje circuito de impedancia eléctrica y probeta  
Fuente: elaboración propia.

• **Microscopia De Fuerza Atómica (AFM):** es una técnica para estudiar las características nano y microestructurales, proporcionando una representación topográfica de la superficie de la pasta de cemento y los productos de reacción. También podría utilizarse para calcular la rugosidad de la zona de transición interfacial.

En esta investigación es fundamentalmente entender como esta herramienta puede brindar información sobre la estructura del cemento activado alcalinamente y proporcionar mapas topográficos, que relacionen la porosidad con los diferentes activantes utilizados en las mezclas.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de materiales de la Universidad Militar. Por las características del equipo no fue posible estudiar los morteros ya que las muestras presentaron gran rugosidad y las lecturas se ubicaban fuera del rango, con el peligro de dañar el equipo. Se tomó determinación de trabajar solo con pastas, identificando solo la superficie y topografía de las muestras.

## 4. Resultados y discusión

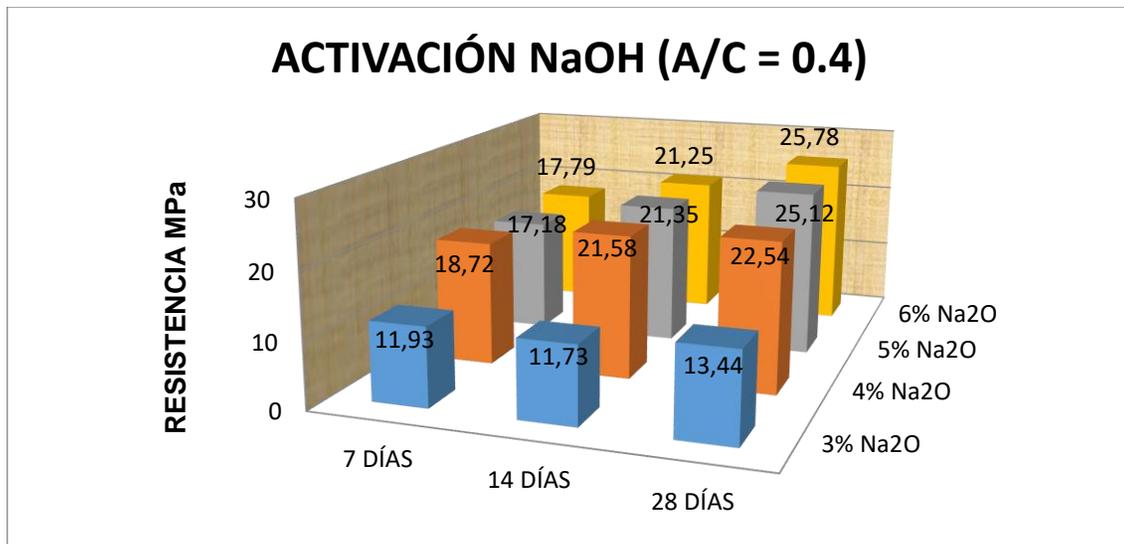
A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados y se evalúa su comportamiento en aspectos de resistencia mecánica, durabilidad y microestructura.

### 4.1. Resistencia a la compresión de morteros

De acuerdo con la matriz de ensayos diseñada, el estudio se inicia con un primer activante denominado hidróxido de sodio (NaOH), se varió su concentración y dosificación agua/escoria. Seguido de esto, se evaluó un segundo activante llamado silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), que por su reacción lenta fue llevado a una temperatura de  $50^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Al final, se elaboraron muestras modificando el módulo del silicato ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ), agregando solución de hidróxido de sodio con una concentración de 8 molar. Los resultados se muestran a continuación en el mismo orden.

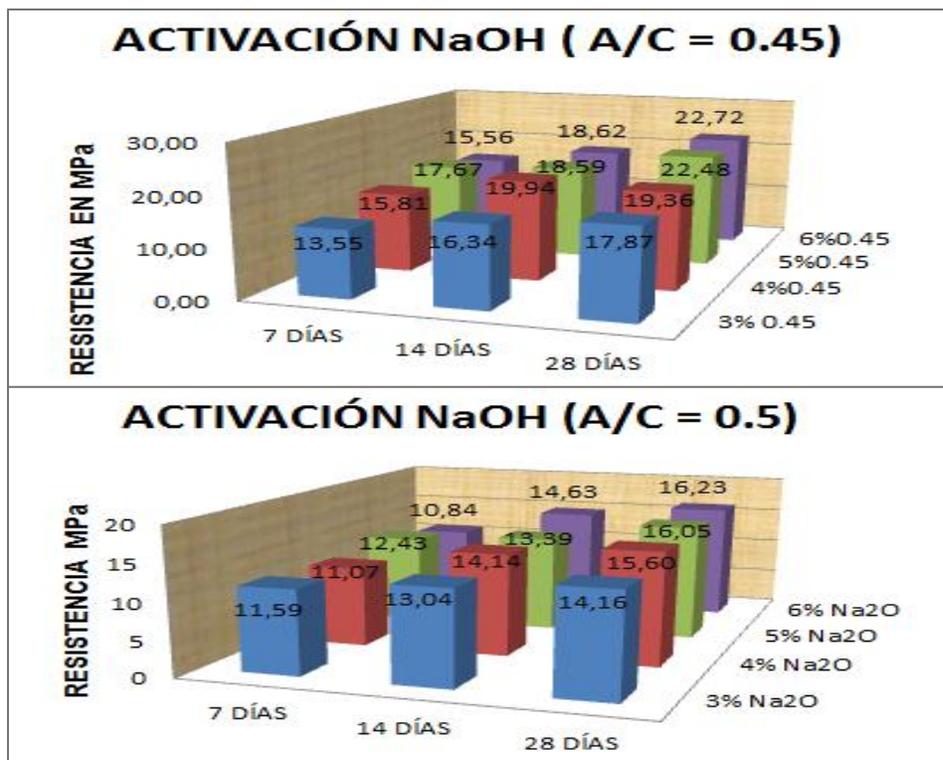
#### 4.1.1. Morteros activados con hidróxido de sodio (NaOH).

La literatura consultada indica que la concentración del activador para EGAH se encuentra entre el 3-5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  como valores óptimos. De igual manera, se indica que la mejor evolución de la resistencia se consigue a temperatura ambiente; manteniendo constante la naturaleza del activante, la finura del material y el tipo de curado. El rango de concentración para esta primera parte del estudio se determinó entre el 3% y el 6%, con una relación agua/escoria de 0.4, aclarando que el agua es la suma del agua que contiene el activante con el agua adicionada. La resistencia a compresión aumenta con el tiempo, muy similar a los morteros elaborados con cemento portland. Los resultados se muestran en la *gráfica 9*.



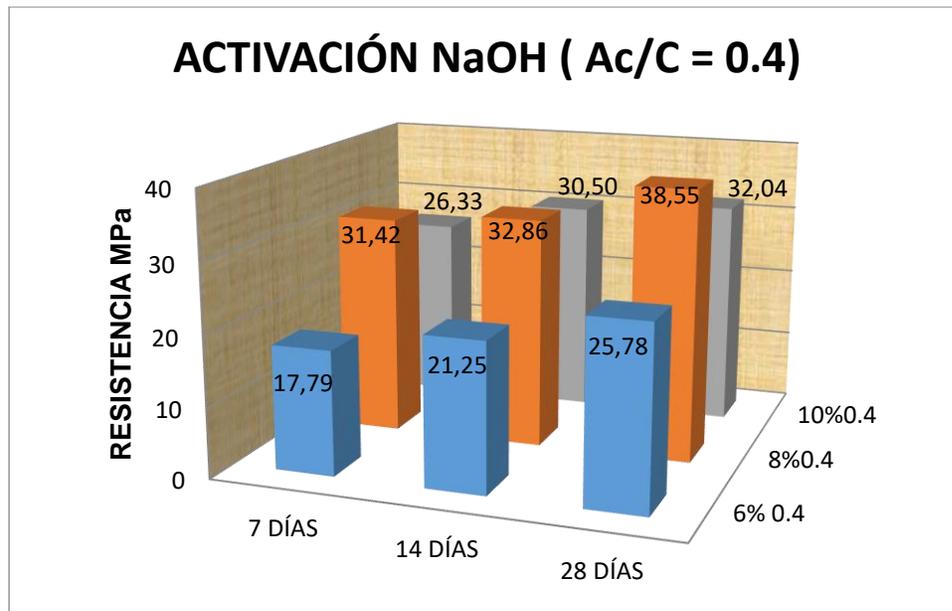
**Gráfica 9** Resistencia de morteros a compresión activados con NaOH  
Fuente: elaboración propia.

Cuando se varió la relación agua/cemento a 0.45 y 0.5 y se mantuvieron constantes el activante y las concentraciones, los resultados muestran que, al aumentar la relación, disminuye la resistencia, los resultados se encuentran en la *gráfica 10*.



**Gráfica 10** Resistencia de morteros a compresión con diferente relación agua/escoria y activador NaOH  
Fuente: elaboración propia.

Con los resultados encontrados, se puede determinar que un aumento de la relación agua/escoria da lugar a un efecto de disolución del activador, que disminuye la velocidad de reacción de la escoria y la fuerza del sistema. Finalmente, se tomó la relación agua/escoria de 0.4 y se incrementó la concentración para identificar su mejor valor de resistencia, como muestra la *gráfica 11*.



*Gráfica 11* Resistencia de morteros a compresión con mayor concentración y activante NaOH  
Fuente: elaboración propia.

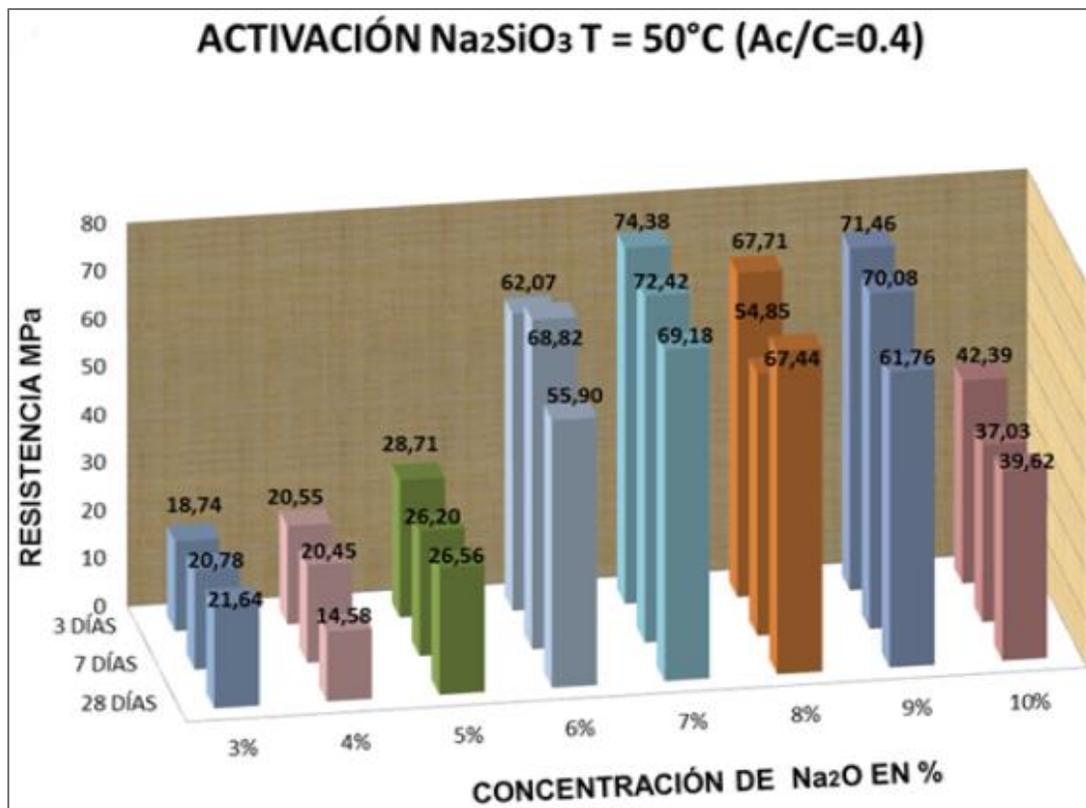
La concentración de 8% de Na<sub>2</sub>O en peso de escoria nos arroja los mejores resultados de resistencia; sin embargo, se debe considerar que con el tiempo presenta mayor eflorescencia y se requiere más gasto de material activante. Una mayor concentración como la del 10% no incrementa su resistencia, posiblemente porque se incrementa la fragilidad.

A diferencia de los demás activantes utilizados, que se estudiarán más adelante, el comportamiento de estos morteros en cuanto a la relación agua/cemento, el incremento de la resistencia con el tiempo y su tasa de ajuste, son similares a lo que ocurre con las mezclas de cemento Portland.

#### 4.1.2. Morteros activados con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Al utilizar el silicato de sodio como activante, se identificó la necesidad de someter los morteros a temperatura para que fraguaran. Se fijó un tiempo de 24 horas y una temperatura  $50^\circ\text{C}$  como valores estándar para la elaboración de los morteros, sin embargo, estas condiciones se pueden optimizar. La relación agua/escoria se mantuvo en 0.4, nuevamente aclarando que el agua es la suma del agua que contiene el activante con el agua adicionada.

De los resultados encontrados en la activación de la escoria con el hidróxido, se puede observar que la eficacia del activador está asociada con la afinidad entre el material precursor y el activador alcalino. Por esta razón, se amplió el espectro de concentraciones del 3% al 10% y así identificar los mejores resultados de resistencia. La *gráfica 12* muestra lo que se obtuvo.



*Gráfica 12* Resistencia de morteros a compresión activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$   
Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que las mejores resistencias se alcanzan cuando la concentración es del 7% de Na<sub>2</sub>O y que para la concentración del 10% se nota una considerable disminución de la resistencia. Esto confirma una vez más, que si existe una relación entre la resistencia a la compresión y la concentración de Na<sub>2</sub>O en peso de escoria.

Las resistencias que se obtienen son bastante altas comparadas con un mortero convencional, incluso tres veces más que cuando el activador es hidróxido de sodio. Esto es consistente con otros estudios que afirman tener una mayor resistencia mecánica cuando el activante es el silicato de sodio, en comparación con el hidróxido de sodio (Haha, Le Saout, Winnefeld, & Lothenbach, 2011; Atiş, Bilim, Çelik, & Karahan, 2009; Fernández-Jiménez, Palomo, & Puertas, 1999; Wang, Scrivener, & Pratt, 1994).

Si se considera el pH de las soluciones, también es un indicador de la eficiencia del activador porque controla la disolución inicial del precursor y las consiguientes reacciones de condensación (Fernández-Jiménez & Puertas, 2003; Shi, 2003; Shi & Day, 1996; Song, Sohn, Jennings, & Mason, 2000). La solución de NaOH tiene un pH mayor que la solución de silicato de sodio para concentraciones similares de álcalis, pero su efecto depende en gran medida del tipo de activador, porque la solubilidad del calcio presente en la escoria disminuye a pH altos y la solubilidad de la sílice y la alúmina aumentan.

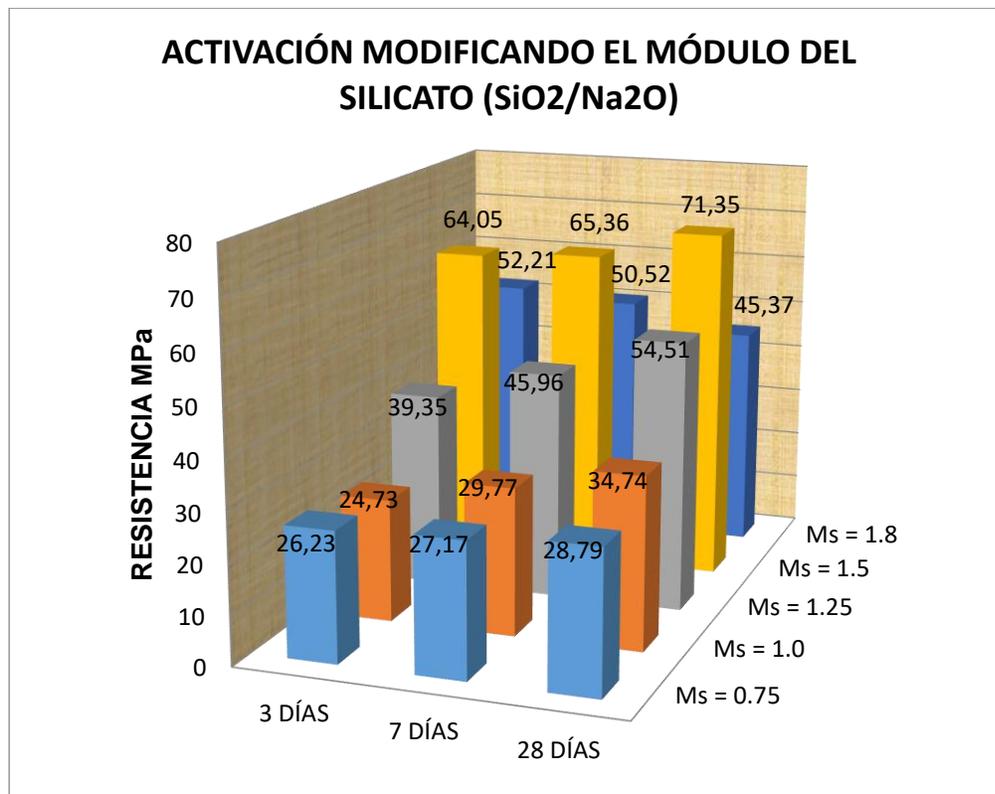
Además, cuando el activador es silicato de sodio, la adición de especies de silicato en los sistemas para reaccionar con los cationes Ca<sup>2+</sup> disueltos, derivados de la escoria, forman productos densos de reacción como el CASH (Fernández-Jiménez, Puertas, Sobrados, & Sanz, 2003). En resumen, para elegir el activador más apropiado se deben considerar, tanto la solubilidad de las especies de calcio en el pH de la solución de poros en la pasta fresca, así como las interacciones

que involucran los cationes suministrados por el activador y promueve la formación de productos de reacción específicos.

Por último, se observa una variación de la resistencia que no es claro si está asociada con la variabilidad de los resultados o con el tiempo de curado. Más adelante, con los demás ensayos de las mezclas óptimas, se espera tener mayor claridad sobre este fenómeno.

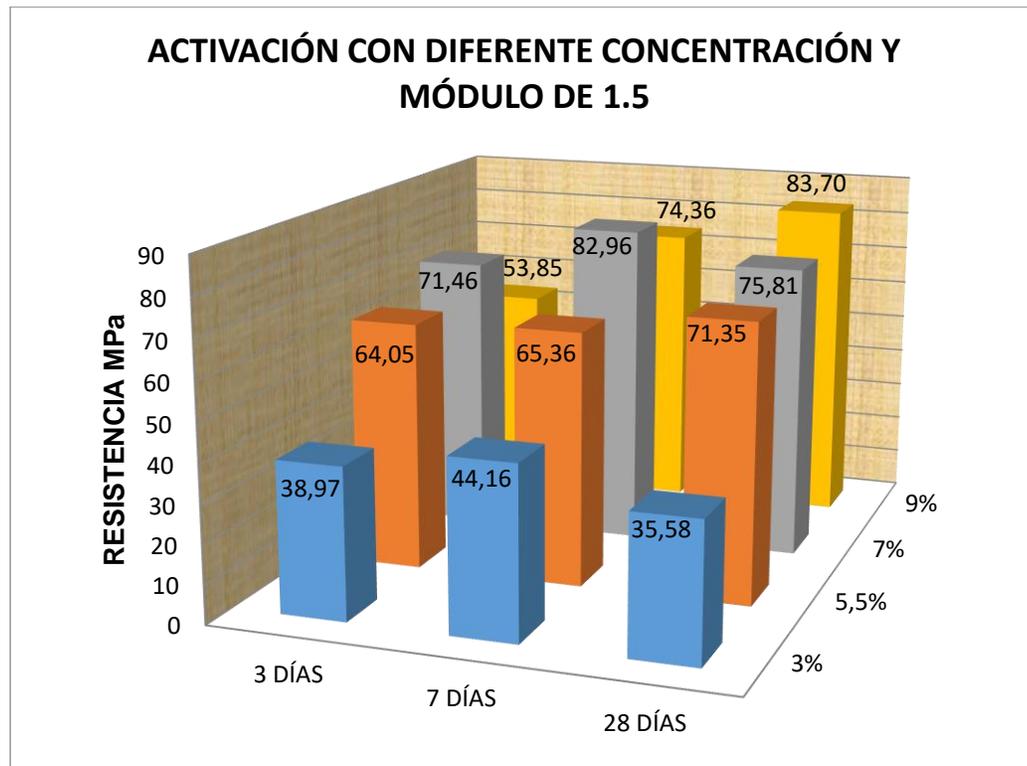
#### 4.1.3. Morteros activados con silicato de sodio y su módulo ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ).

Estudios afirman que el módulo del silicato de sodio influye significativamente en las propiedades de los cementos de escoria activados alcalinamente y que su valor óptimo está entre 1 y 1.5 (Fernández-Jiménez, et al., 2003). Con esta información se definió una concentración del 5.5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  en peso de escoria y se varió el módulo del silicato de 0.75 a 1.8. Los resultados se presentan en la *gráfica 13*.



*Gráfica 13* Resistencia de morteros a compresión activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  de diferente módulo  
Fuente: elaboración propia.

En el gráfico el módulo del silicato sí es un factor determinante en la resistencia a compresión, que viene acompañada como se verá más adelante de un cambio en las propiedades reológicas. Este resultado permitió encontrar el módulo más apropiado, faltaba encontrar la concentración óptima, por esto, se realizaron ensayos manteniendo constante el módulo a 1.5 y modificando la concentración a 3%, 7% y 9% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , como se muestra en la *gráfica 14*.



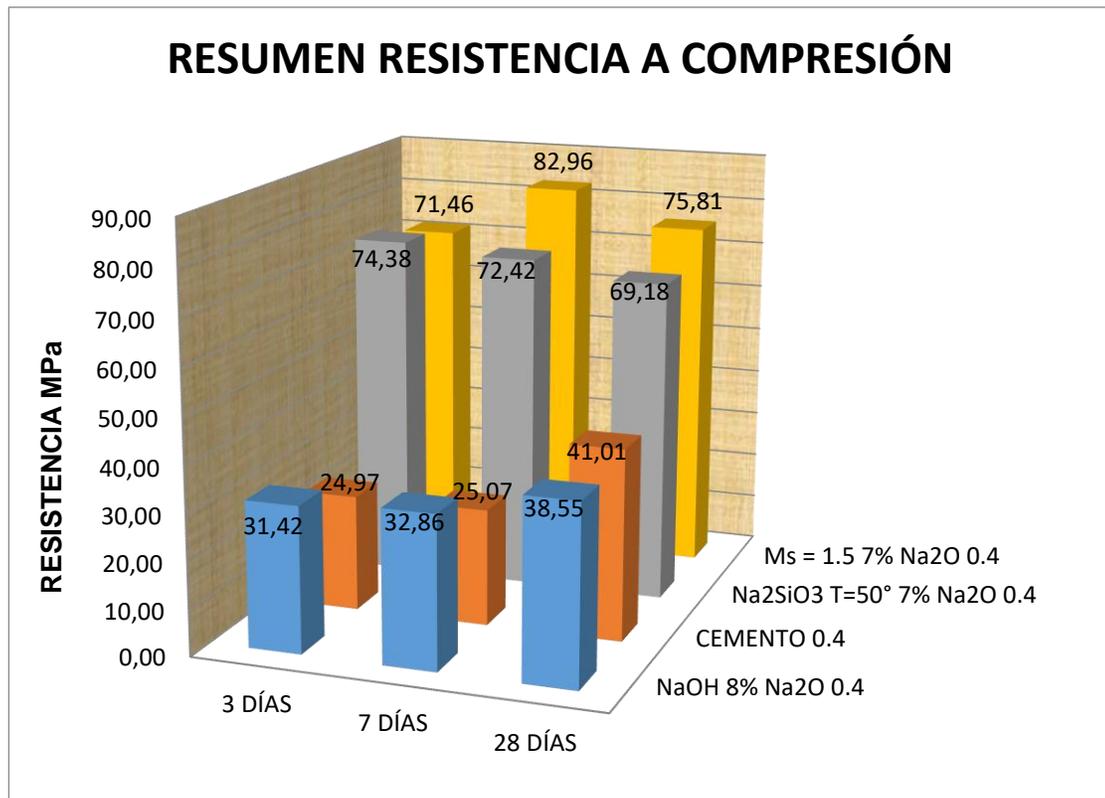
*Gráfica 14* Resistencia de morteros activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  de módulo 1.5  
Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que el desarrollo de la resistencia es fuertemente dependiente del módulo del silicato y que la influencia de la dosificación y el agua en el aglutinante es menor. Si bien la concentración que se asumió como óptima fue la de 7%, es importante señalar que una mayor concentración implica mayor material activante además de la gran influencia que el módulo tiene en la tasa de ajuste (tiempo para el vertimiento). La *figura 25* muestra las dificultades como el poco tiempo de ajuste para el llenado de los moldes a dos capas y que se evidencia en la formación de juntas frías en el mortero.



**Figura 25** Resultados de colocación de morteros con módulos de 0.75, 1, 1.25  
Fuente: elaboración propia.

La presencia del hidróxido de sodio en la solución del silicato permite la activación de la mezcla y no requiere de temperatura para que ocurra. El efecto de la combinación de diferentes aniones en la reacción hace más eficaz el activante, ya que contribuyen a la formación primaria de CSH y la polimerización de aniones de silicato promoviendo la reacción de la escoria. Un consolidado de todas las muestras ensayadas que presentaron buena resistencia junto con el cemento Portland se presenta en la *gráfica 15*.



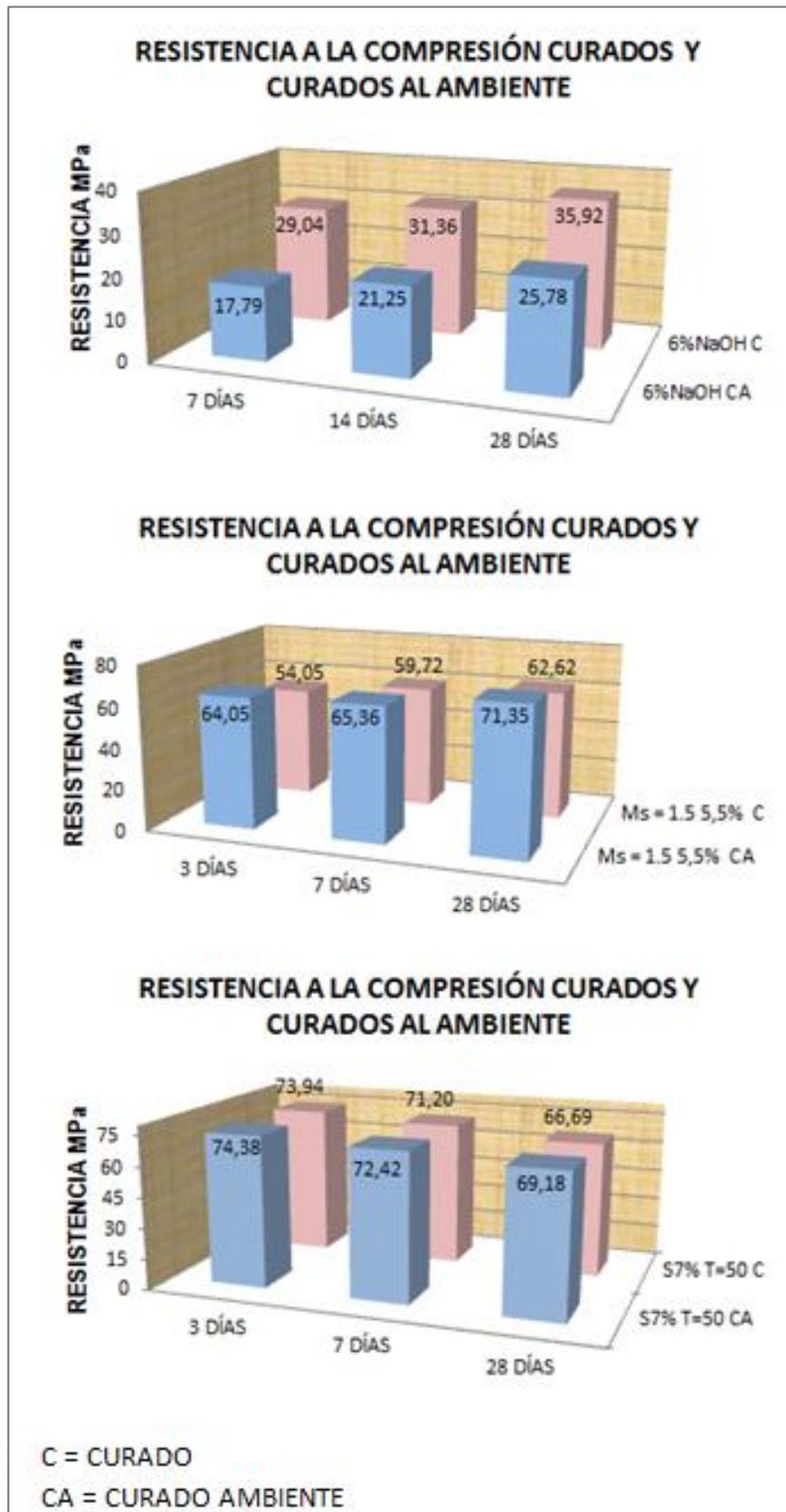
**Gráfica 15** Resistencia de morteros a compresión con las mejores mezclas  
Fuente: elaboración propia.

Las mezclas de activación con solo silicato de sodio y la de módulo de silicato 1.5, muestran una alta resistencia a la compresión, casi que duplican a la del cemento Portland y solo requieren de tres días para alcanzar estos resultados. Así, realizados los ensayos surgen preguntas que se intentaron resolver, una relacionada con la influencia que tiene el curado en estos morteros; otra, sobre si la procedencia de la arena utilizada cambia mucho los resultados. En un intento por aclarar estos interrogantes se realizaron dos ensayos más, relacionados con su resistencia a la compresión.

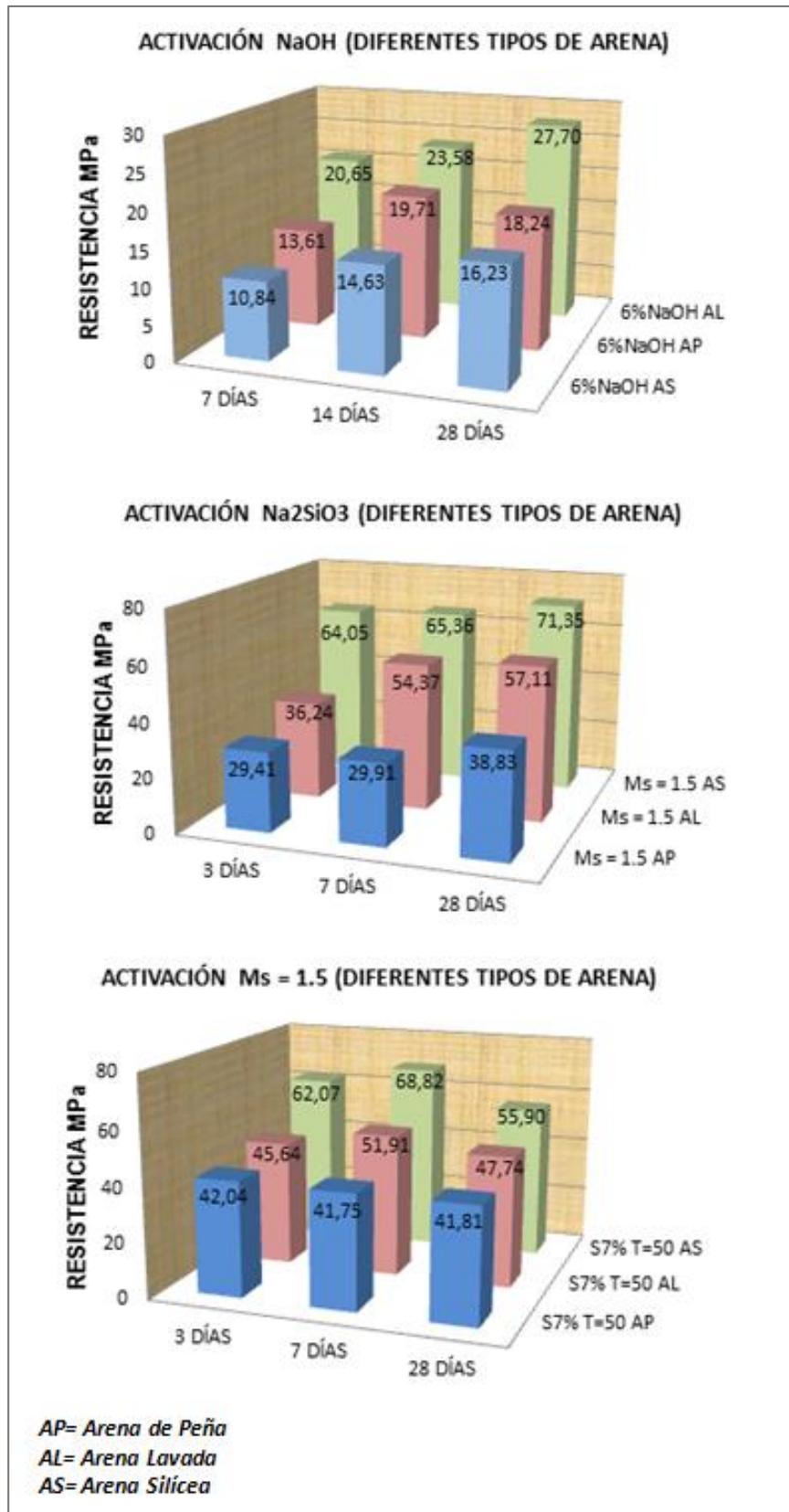
En el primero se elaboraron las probetas con la dosificación que se consideró más óptima, unas se colocaron en una cámara de curado a una temperatura de 25° y humedad relativa de 65%, otras dejaron en el medio ambiente. Los resultados se pueden observar en la **gráfica 16**. Esto indica que el curado incrementa la resistencia a la compresión en mezclas activadas con NaOH, como ocurre con las mezclas de cemento portland. Contrario a esto ocurre en las mezclas activadas con Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + NaOH.

En el segundo caso, se elaboraron probetas con las mezclas más eficientes y se cambió el tipo de arena, la sílicea normalizada, la arena lavada y la arena de peña. Los resultados se muestran en la **gráfica 17**.

La **gráfica 17** muestra que se tiene un mejor comportamiento con la are lavada cuando el activante es NaOH, para los otros dos casos se comporta mejor la arena sílicea. Sin embargo, no se puede olvidar que a pesar de que se intentó trabajar con el mismo tamaño de la arena, estas diferencias pueden ser representativas. Además se observó con la experiencia que cambiar el tipo de arena implica modificar el módulo del silicato, ya que la tasa de ajuste se ve fuertemente influenciada. Seguramente, hay muchas cosas al respecto por analizar y estudiar, pero si podemos afirmar que, tanto la arena de rio como la arena de peña de origen industrial (no reactivos), pueden ser utilizadas en la elaboración de morteros con cementos activados alcalinamente.



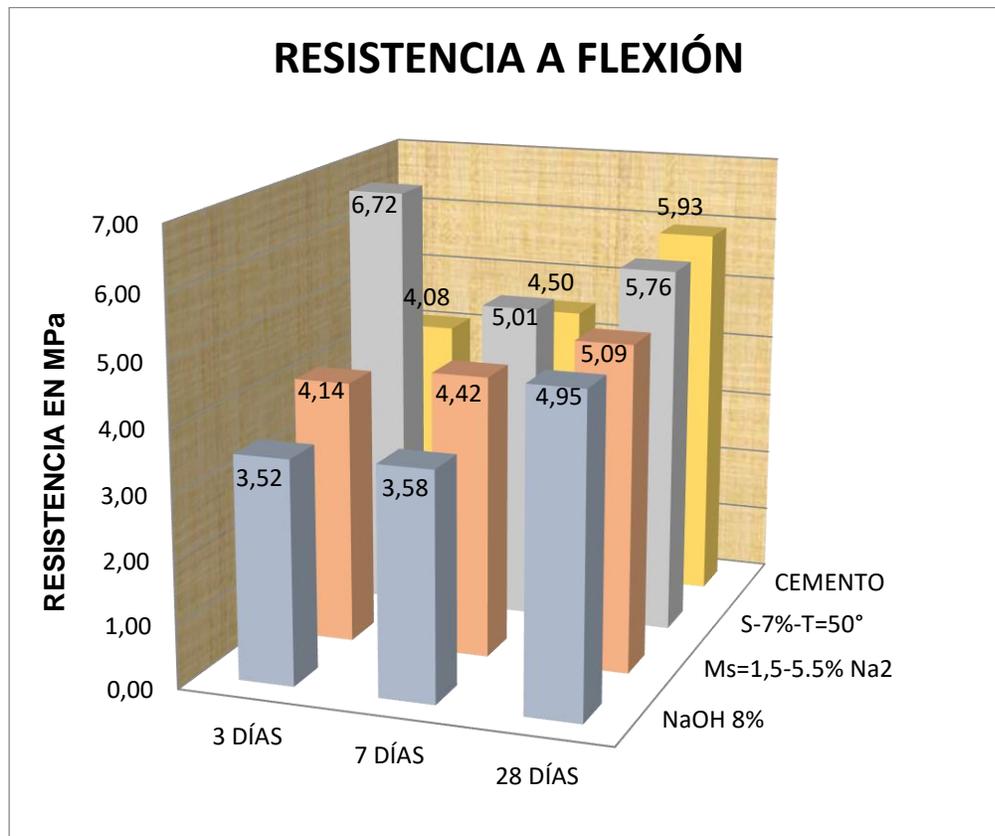
Gráfica 16 Resistencia de morteros a compresión con las mezclas y diferente curado  
Fuente: elaboración propia.



Gráfica 17 Resistencia de morteros a compresión con las mejores mezclas y arena  
Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Resistencia a la flexión de morteros

Se elaboraron probetas prismáticas de 40 x40 x 160 mm, para determinar la resistencia a flexión de las mezclas con los mejores resultados, de acuerdo con la norma I.N.V.E-324-07. Los resultados se encuentran en la *gráfica 18*.

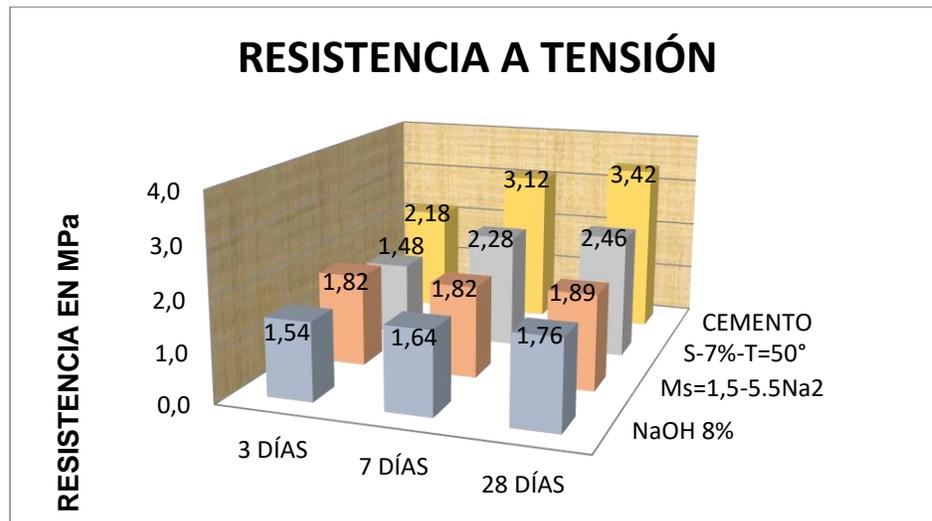


*Gráfica 18* Resistencia de morteros a flexión  
Fuente: elaboración propia.

Los resultados a flexión muestran un comportamiento más parecido, guardadas las diferencias y los valores de magnitud. En la mayoría de las mezclas, se observa un crecimiento de la resistencia con el tiempo transcurrido. Es interesante encontrar unas resistencias muy altas a compresión de estos morteros elaborados con cemento activado alcalinamente y, contrario a ello unas bajas resistencias, a flexión. Se requiere en futuras investigaciones, establecer la relación compresión/flexión para estos materiales.

### 4.3. Resistencia a la tensión

Si bien los morteros y concretos no ofrecen un buen comportamiento a tensión y en algunos casos se considera que no es importante medir esta propiedad; por tratarse de una forma diferente de producirse y ser un material de estudio, se realizaron los ensayos que muestran los resultados en la *gráfica 19*.



*Gráfica 19* Resistencia de morteros a tensión  
Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican un mejor comportamiento a tensión del cemento Portland, esto puede ser por la fragilidad que presentan estos materiales activados alcalinamente y porque el aire naturalmente atrapado del cemento Portland es menor, como se muestra en la *figura 26*.



*Figura 26* Secciones de las probetas utilizadas en el ensayo de tensión.

La relación entre porosidad y resistencia mecánica para los cementos de escoria activados, son diferentes a las del cemento Portland, como se observa en la **figura 26**, la porosidad es mayor para los morteros de escoria activada alcalinamente y los resultados de resistencia a compresión pueden ser altos. Lo que significa que la resistencia intrínseca del cemento de escoria es mayor que el cemento Portland.

#### **4.4. Durabilidad**

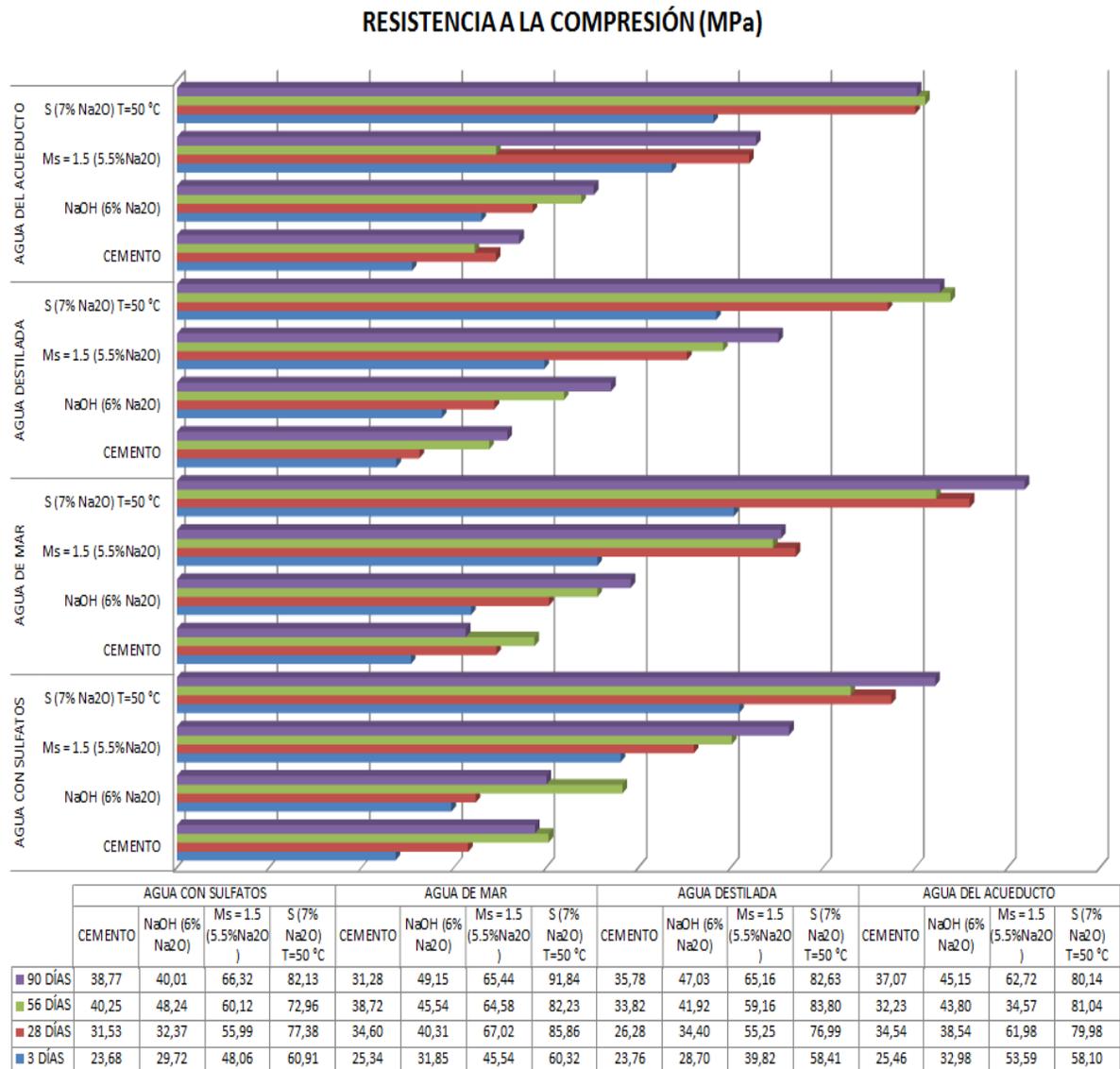
Se evaluó la resistencia de los morteros a los sulfatos y agua de mar utilizando el método de Kock-Steinegger (con cubos) y la penetración de iones cloruro en un concreto activado alcalinamente por el método de prueba rápida de penetración de cloruros (RCPT). El primero es el tiempo el que nos determina su comportamiento, y el segundo una diferencia de potencial acelera el proceso. Los resultados se muestran a continuación.

**Resistencia a sulfatos y agua de mar:** la metodología de colocar el material en contacto con una sustancia agresiva por un tiempo prolongado, sea un indicativo de su resistencia a ser deteriorado, es la más aceptada y confiable. El tiempo considerado en estos ensayos fue de tres meses y se tomó como solución de referencia el agua destilada y el agua que suministra el acueducto, pues es la que se usa en obra. Los resultados se muestran en la **gráfica 20**.

Los resultados indican que:

- ✓ Los morteros en solución de sulfato mejoran su resistencia con el tiempo y solo hasta los 90 días, se logra identificar una disminución del 3.6% y del 17% en los morteros de cemento Portland y los activados con NaOH, respectivamente. Si bien se requiere de mucho más tiempo para ser concluyentes, la tendencia indica que los cementos activados con silicato y silicato e hidróxido de sodio, mantienen o incrementan su

resistencia a la compresión, lo que es consistente con los resultados de otras investigaciones.



**Gráfica 20** Resistencia a compresión de morteros sometidos a la acción de sulfatos y agua de mar  
Fuente: elaboración propia.

- ✓ Con el agua de mar hay dos hechos notables, el primero es una disminución del 19.2% de la resistencia del mortero elaborado con cemento Portland a los 90 días, y el segundo un incremento del 10.2% en los morteros activados con silicato de sodio y temperatura. Luego, se entiende que la solución salina es una forma de curar los

morteros activados con silicato. Para los demás morteros activados alcalinamente la resistencia se mantiene o incrementa.

- ✓ El agua destilada y del acueducto no presentan diferencias notables, en los dos casos se mejora la resistencia de los morteros. Una observación importante es la poca afectación en su resistencia que experimentan los morteros activados con silicato temperatura y silicato hidróxido después de los 28 días.

**Resistencia a la penetración del ion cloruro:** se realizaron ensayos de RCPT a un concreto elaborado con agregado y escoria activada con silicato de módulo 1.5. El concreto presentó una resistencia a la compresión de 36 MPa días. En el montaje se utilizaron tres celdas y los procedimientos se realizaron como se establece en la norma ASTM C 1202. Los resultados del ensayo se muestran en la **tabla 20**.

**Tabla 20** Ensayo prueba rápida de permeabilidad de cloruros  
Fuente: elaboración propia.

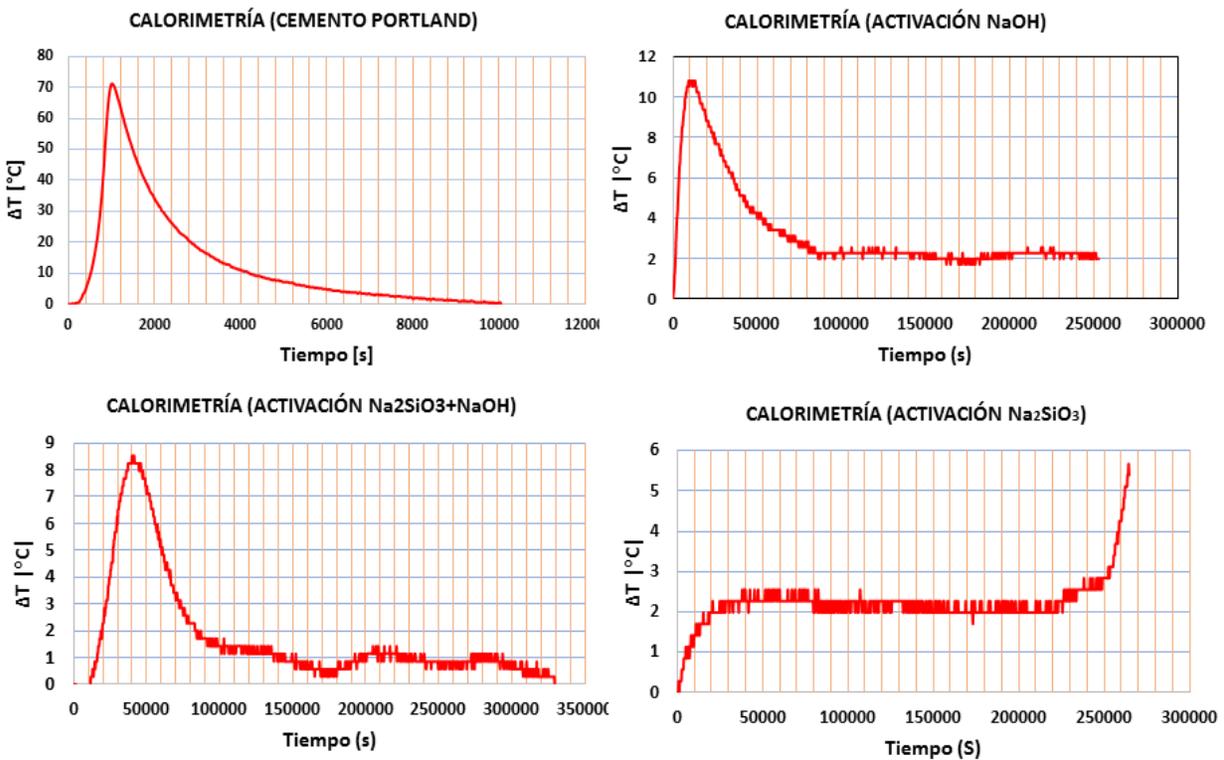
TIEMPO (min)	TEMPERATURA °C	CORRIENTE mA
25	24	482.1
10	17	445.6
15		462.0

De acuerdo con el ensayo, entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajarán a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. El máximo tiempo de la probeta ensayada fue de 25 minutos y, en un ensayo con muestras de concreto convencional, puede demorar 6 horas antes de completar una corriente de 500 mA; este es el tope del equipo y automáticamente se detiene. Estos resultados indican una alta permeabilidad, considerando que lo que estamos analizando es un concreto activado alcalinamente. Es natural que la solución de poros

presente un gran número de iones y, como el ensayo se realiza con corriente directa donde el mecanismo de conducción es iónico, podemos considerar un aumento considerable de la conductividad eléctrica que no tiene que ver con la penetración del ion cloruro. Esto permite entender por qué en tan poco tiempo se obtiene la corriente límite. Luego, este ensayo no nos permite medir la permeabilidad del concreto activado alcalinamente. Por lo cual, se requiere utilizar otra metodología.

#### 4.5. Calorimetría

El mecanismo de reacción de la activación alcalina no se entiende completamente, la calorimetría juega un papel importante en la comprensión en la química de la reacción. A continuación, en la *gráfica 21* se muestran los resultados de las curvas calorimétricas de las diferentes pastas.

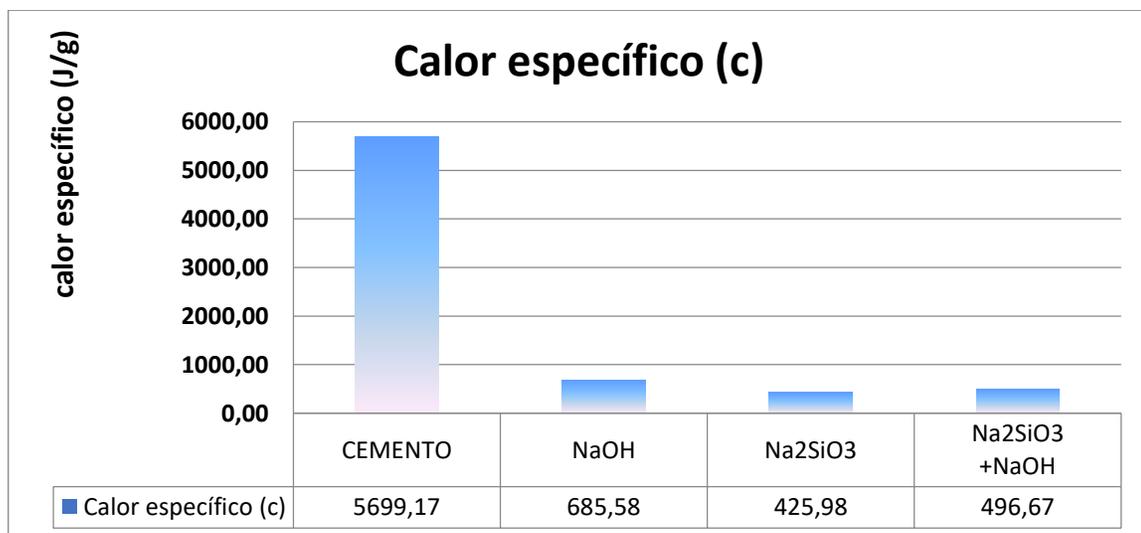


*Gráfica 21* Curvas calorimétricas de las diferentes pastas estudiadas  
Fuente: elaboración propia.

A partir de las gráficas, es posible observar que:

- El calor representado en la temperatura, que se genera en la activación del cemento Portland, es mucho mayor que en las demás pastas. Se identifica un pico inicial, que también se presenta en la activación con hidróxido de sodio y con el silicato de sodio modificando su módulo, atribuido a la humectación y disolución de las partículas de escoria, en particular cuando el activante es NaOH (Shi & Day, 1995).
- Los pequeños picos que se presentan en la activación Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> con NaOH, se pueden asociar a la aceleración de reacciones de la escoria.
- La curva calorimétrica para la activación con silicato de sodio nos indica que sus reacciones son muy lentas o se encuentra en un estado pasivo, esto se evidencia porque las muestras no fraguan. Este fenómeno continúa por casi tres días, sólo al final del ensayo se empezaron a presentar cambios en la temperatura, que indican un incremento importante en las reacciones. Esto se corrobora con un endurecimiento inicial del mortero.

En la **gráfica 22** se indican los calores específicos calculados para cada una de las muestras.

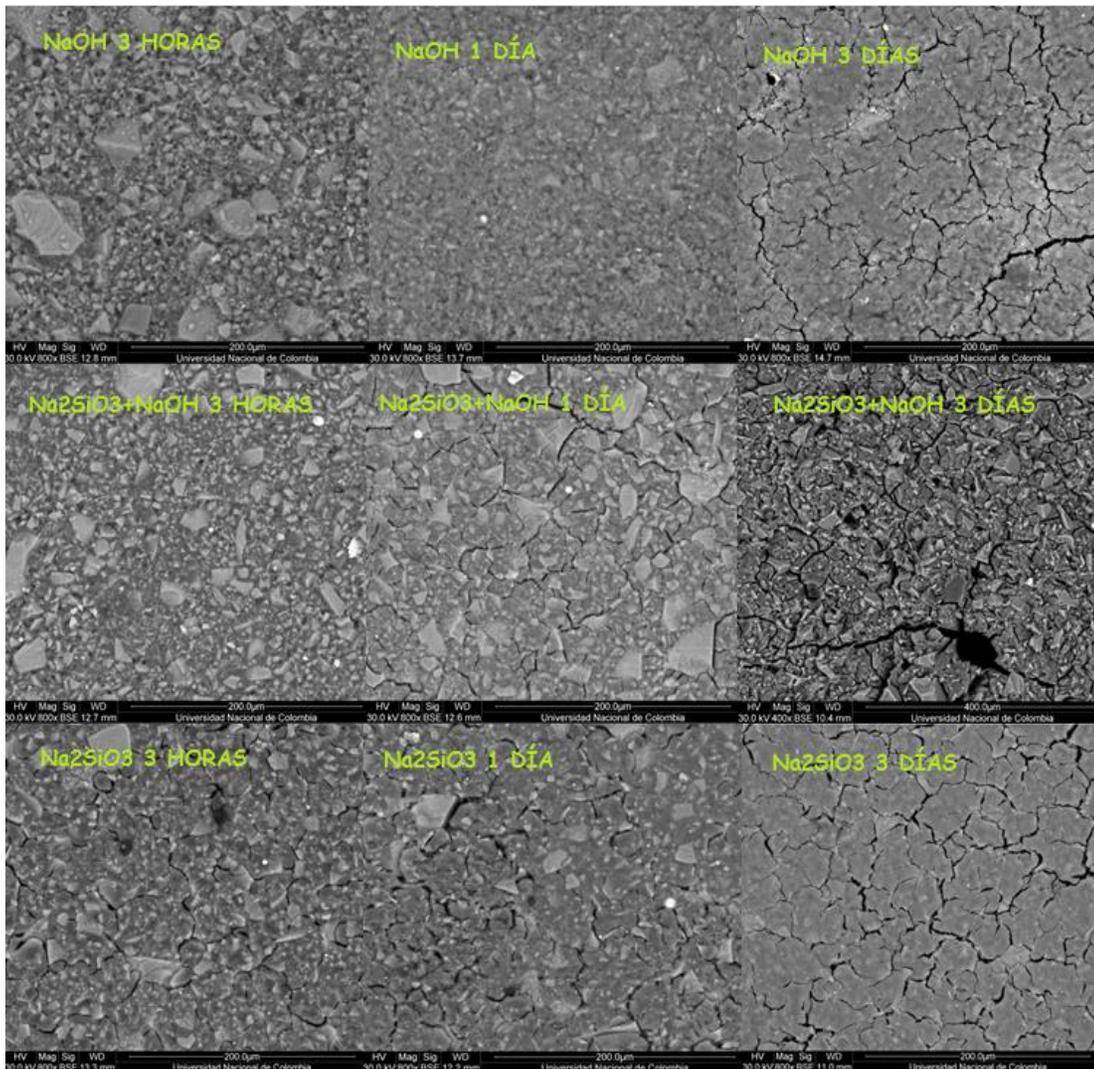


**Gráfica 22** Calor específico de las pastas  
Fuente: elaboración propia.

Esta gráfica advierte que las reacciones en la activación alcalina no están gobernadas completamente por el calor que se genera en la reacción. Se deben explorar otras técnicas de experimentación que permitan comprender mejor el fenómeno de la activación alcalina de la escoria.

#### 4.6. Microscopia electrónica de barrido

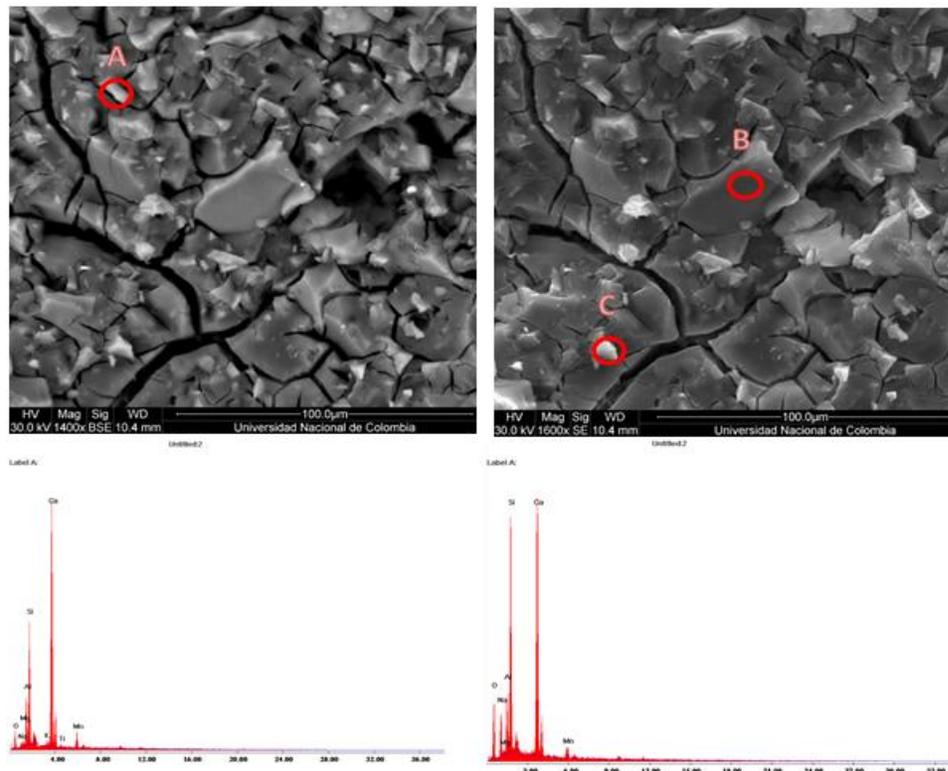
A través de esta técnica se pretende identificar los cambios microestructurales que presenta la pasta de escoria activada alcalinamente en edades tempranas. De igual forma, reconocer las características de los productos de reacción.



**Figura 27** Micrografías de las pastas activadas  
Fuente: elaboración propia.

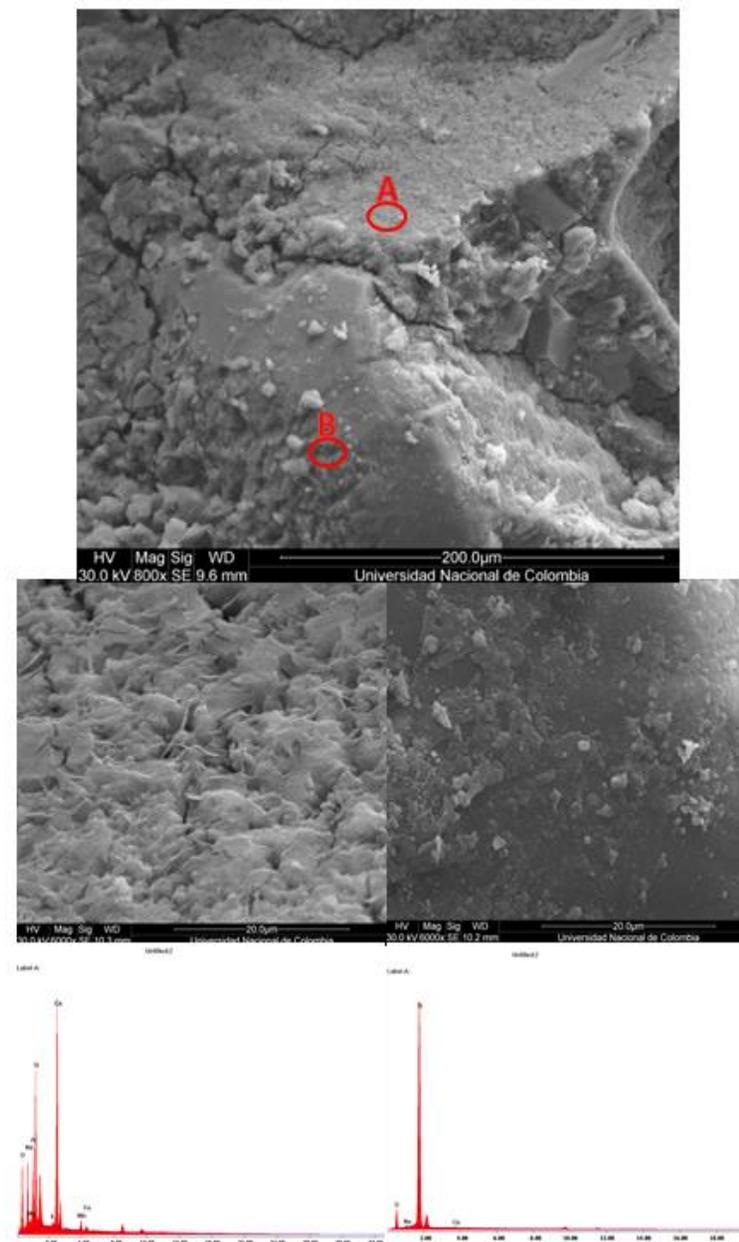
La **figura 27** muestra las diferentes pastas de escoria activada y en edades de 3 horas, 1 día y 3 días. Con el transcurso del tiempo, en todas las pastas se observa la formación de productos de reacción, que dependiendo de cada activante, presenta diferente estructura. En las primeras horas se logra diferenciar entre la escoria sin reaccionar y el gel que está reaccionando; para el tercer día, aumenta el gel producto de las reacciones ocurridas. Esto se encuentra en correspondencia con los resultados de calorimetría que se presentan en las primeras horas, relacionado con la humectación y disolución de las partículas de escoria. Con el tiempo, se empiezan a mostrar pequeñas fisuras, lo cual indica la pérdida de activante que reacciona con la escoria, denominado retracción autógena como parte de todos los materiales porosos.

Si miramos con un poco más en detalle, podemos observar los productos de reacción. En la **figura 28** se indica una pasta de escoria activada con silicato de sodio e hidróxido de sodio.



**Figura 28** Micrografía de la escoria activada con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$   
Fuente: elaboración propia.

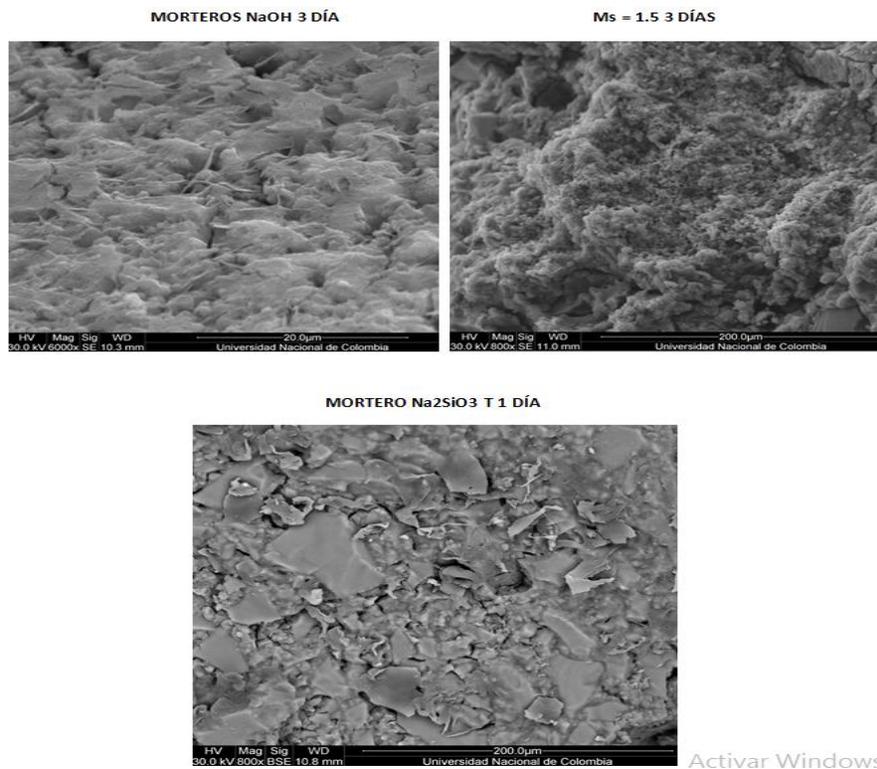
El punto A corresponde al gel silicato de calcio hidratado CSH que presenta una relación Ca/Si mayor a la identificada en el punto B. De acuerdo con la composición química, notamos que hay un valor importante de aluminio adicionado al gel, relacionado con el denominado gel CASH. Los colores claros y oscuros pueden estar asociados al cambio de la composición química de los elementos, o a un cambio en la topografía del lugar en estudio. La superficie de fractura parece ser más densa que con otros activantes.



**Figura 29** Micrografía de un mortero  
Fuente: elaboración propia.

En la **figura 29** se identifica el gel producto de la reacción de la escoria con el activante, el agregado y la zona interfacial pasta agregado. El punto A corresponde al gel CSH y se corrobora con la composición química. El punto B corresponde al agregado con altos contenidos de sílice; por tanto, identificar productos de reacción secundaria es más difícil porque se encuentran inmersos dentro de la matriz y se presentan en pocas cantidades.

Finalmente, se muestra que para diferentes activantes los productos de reacción son diferentes. En la **figura 30** se observa este caso.



**Figura 30** Micrografías con diferentes activantes  
Fuente: elaboración propia.

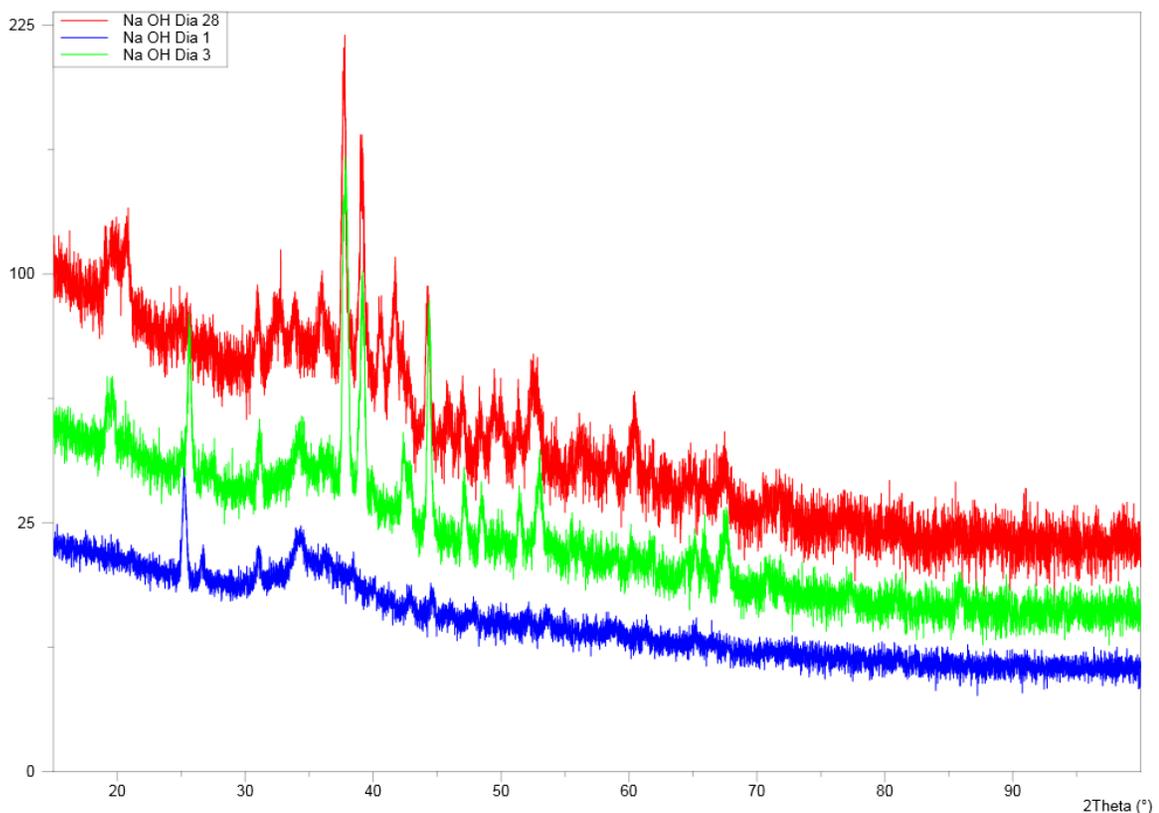
En esta figura se ve claramente que a pesar de que el precursor utilizado en todos los casos es la misma escoria, diferentes activantes forman productos de reacción con distintas características. Para la activación con NaOH son como montículos con pequeños filamentos, para

el caso de utilizar silicato e hidróxido de sodio tiene forma de una espuma porosa, y para solos silicatos son láminas en forma de hojas conocidas como morfología papel de aluminio.

#### 4.7. Difracción de Rayos X (DRX)

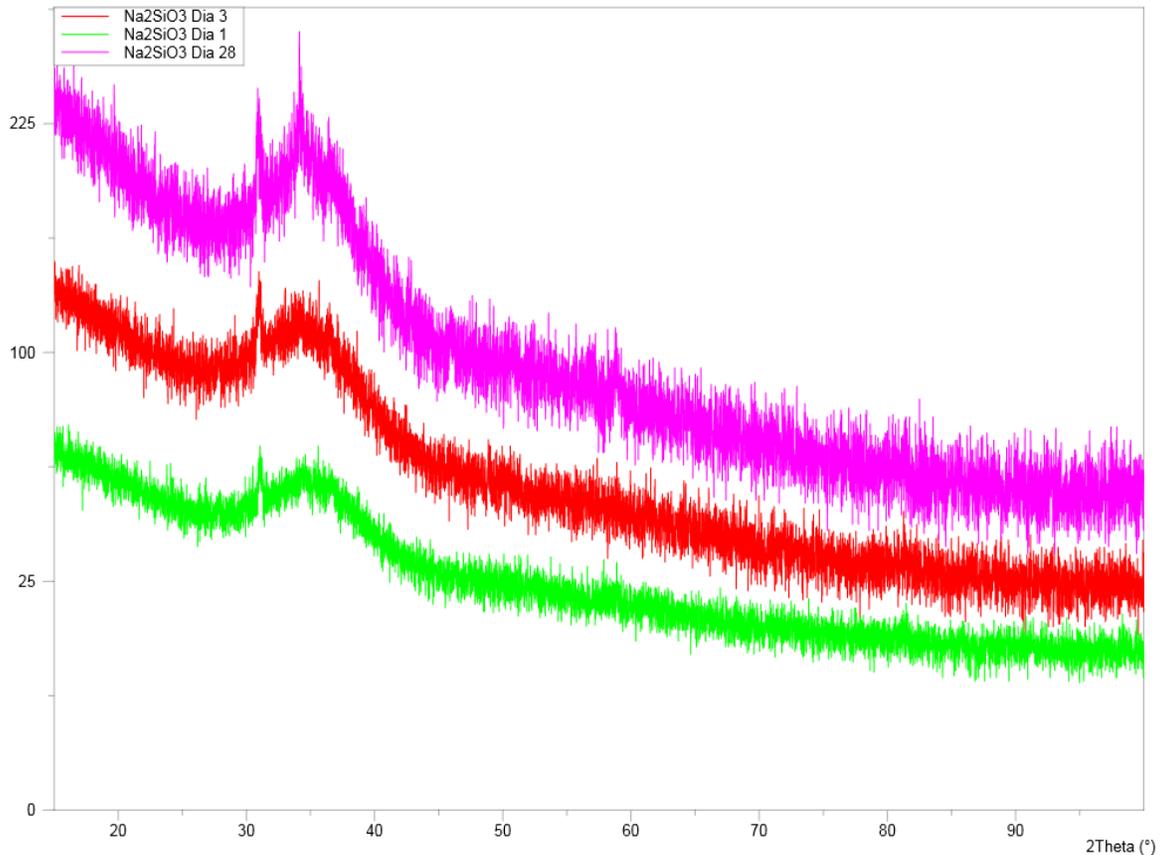
Como complemento a lo que se pudo observar, se buscó determinar la estructura mineralógica de los productos de reacción, si los procesos que se generaron en las reacciones cambiaron la amorficidad del material. El estudio es un proceso semicuantitativo que intenta estimar los cambios en su estructura. Para esto, se realizaron DRX a las muestras y se determinó así un cambio de su configuración inicial.

Al realizar un estudio comparativo de las pastas activadas con NaOH a diferentes edades, se observa una pequeña variación en su estructura amorfa. Como lo indican los difractogramas superpuestos en la *figura 31*.



**Figura 31** Difractograma de una pasta activada con NaOH para diferentes días  
Fuente: elaboración propia.

Las pequeñas estructuras cristalinas pueden ser hidrotalcita común en la activación con NaOH, otros posibles componentes cristalinos están la tobermorita y xonotlita. Para cuando se activó con silicato, los resultados no evidencian modificación alguna al pasar los días; luego, los productos de reacción siguen siendo amorfos. En la *figura 32* se indica un difractograma.



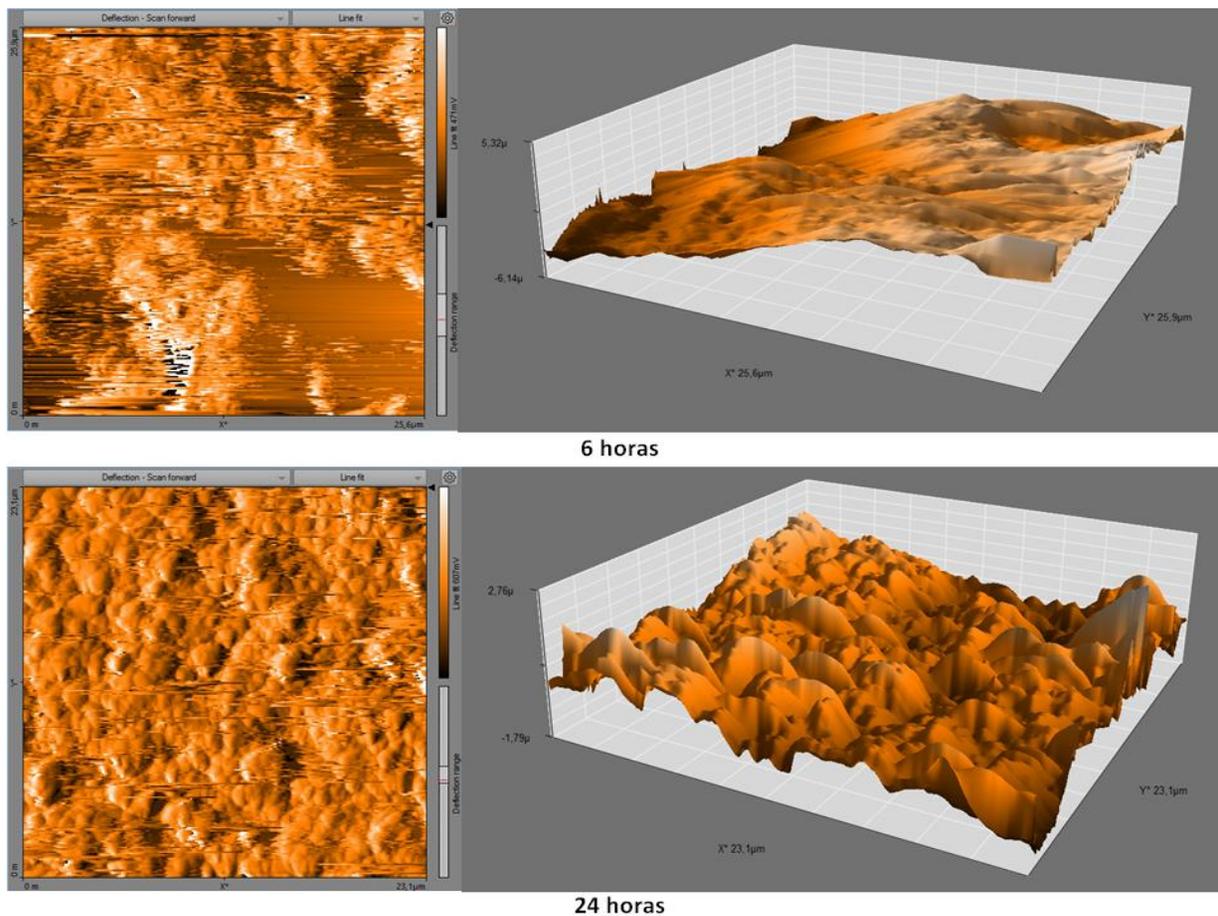
*Figura 32* Difractograma: pasta activada con silicato de sodio para diferentes días  
Fuente: elaboración propia.

Para una plena identificación de las pequeñas cantidades cristalinas que pueden resultar de la activación alcalina, se debe complementar el ensayo con una espectroscopia de absorción infrarroja y microscopia de luz reflejada.

#### 4.8. Microscopia de fuerza atómica

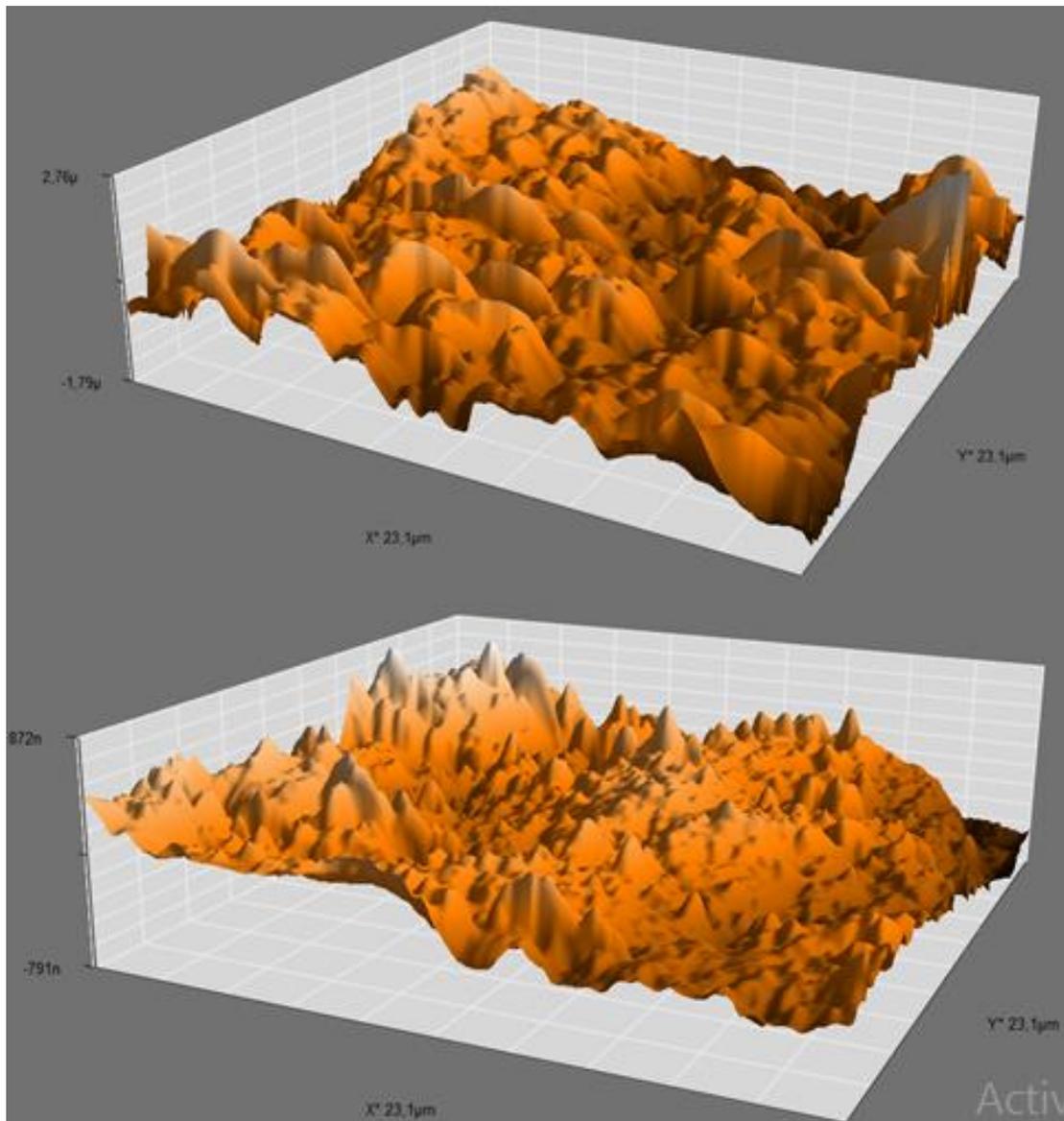
Otra mirada en la microestructura de los materiales activados alcalinamente, es el uso de la microscopia de fuerza atómica, que permite apreciar los cambios topográficos asociada a la rugosidad del material en la zona de transición interfacial, a la forma y tamaño de las características nanoestructurales de los productos de reacción y la porosidad; bajo el fin de relacionarlos con los parámetros macroscópicos de la mecánica y de durabilidad.

Si analizamos la topografía que presenta una pasta de escoria activada con NaOH, en las primeras horas podemos notar un cambio importante, que estará adjunto a la formación de productos de reacción y, en otros casos, por las fisuras o poros que generan las reacciones. La *figura 33* muestra los cambios topográficos en el tiempo.



**Figura 33** Imágenes AFM para una pasta activada con NaOH a 6 y 24 horas  
Fuente: elaboración propia.

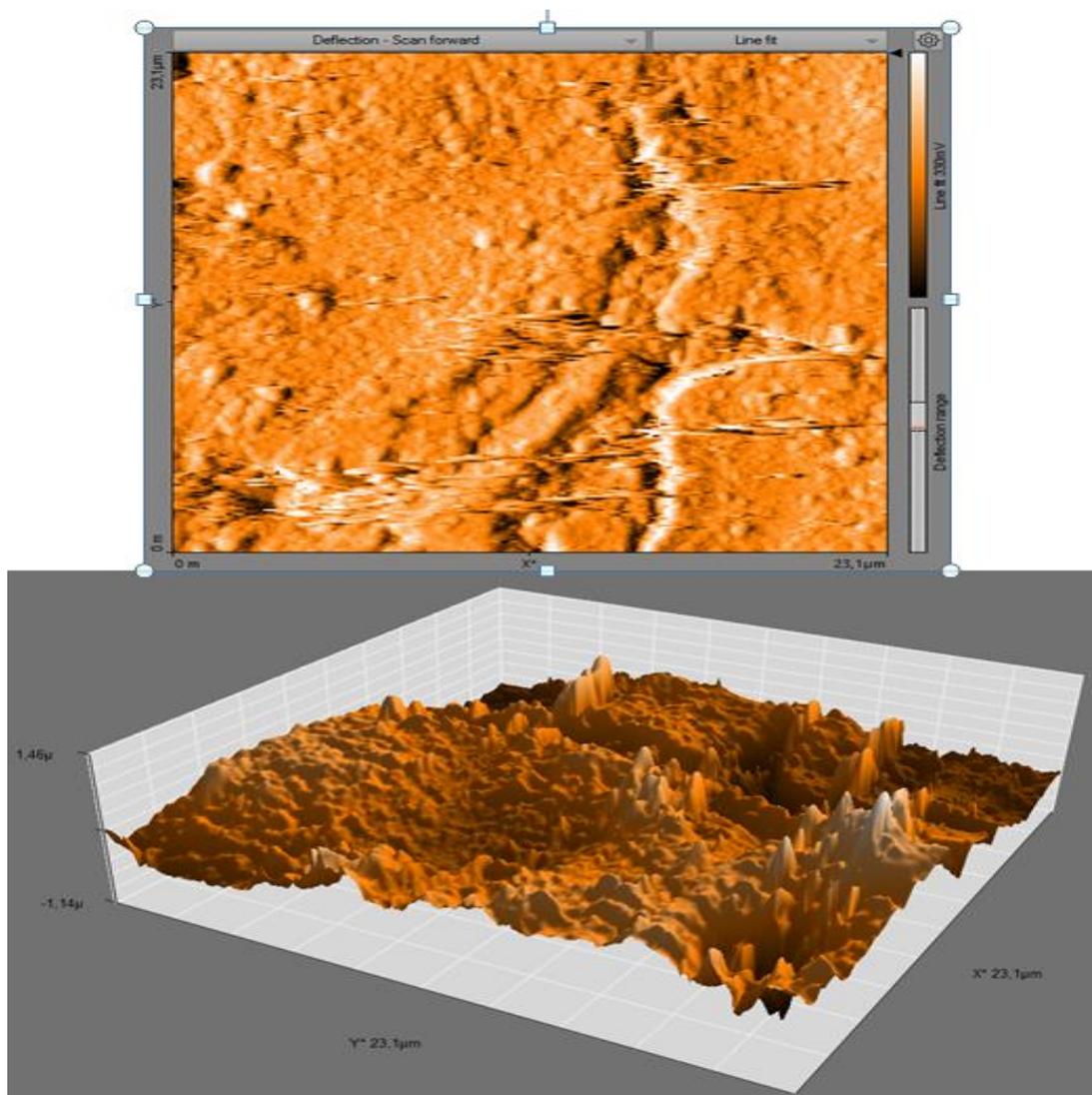
La topografía se modifica no solo en el tiempo de reacción, sino con el tipo de activante que se utilice. Cuando el activante es hidróxido de sodio, la superficie es más irregular, se identifican montículos robustos y los cambios en altura son de un orden mayor en comparación con una pasta activada con silicato de sodio e hidróxido de sodio. Esta microestructura y el tratamiento pueden ser determinantes en la resistencia, porosidad y durabilidad. La *figura 34* pone en evidencia este aspecto.



**Figura 34** Imágenes AFM para diferentes activantes hidróxido y silicato a las 24 horas  
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, podemos identificar el grado de fisuramiento que puede presentar la pasta, debido a la retracción que puede experimentar. La **figura 35** señala una fisura pronunciada, unos poros y una topografía de los productos de reacción, que dan cuenta del comportamiento del material a nivel macro.

Actualmente, hay un creciente interés por utilizar esta técnica que es complementaria a las demás, en tanto que pueden en tiempo real tener información sobre las distancias y tamaños de los productos que reaccionan.



**Figura 35** Imágenes AFM pasta activada con silicato de sodio, 1.5 a las 24 horas  
Fuente: elaboración propia.

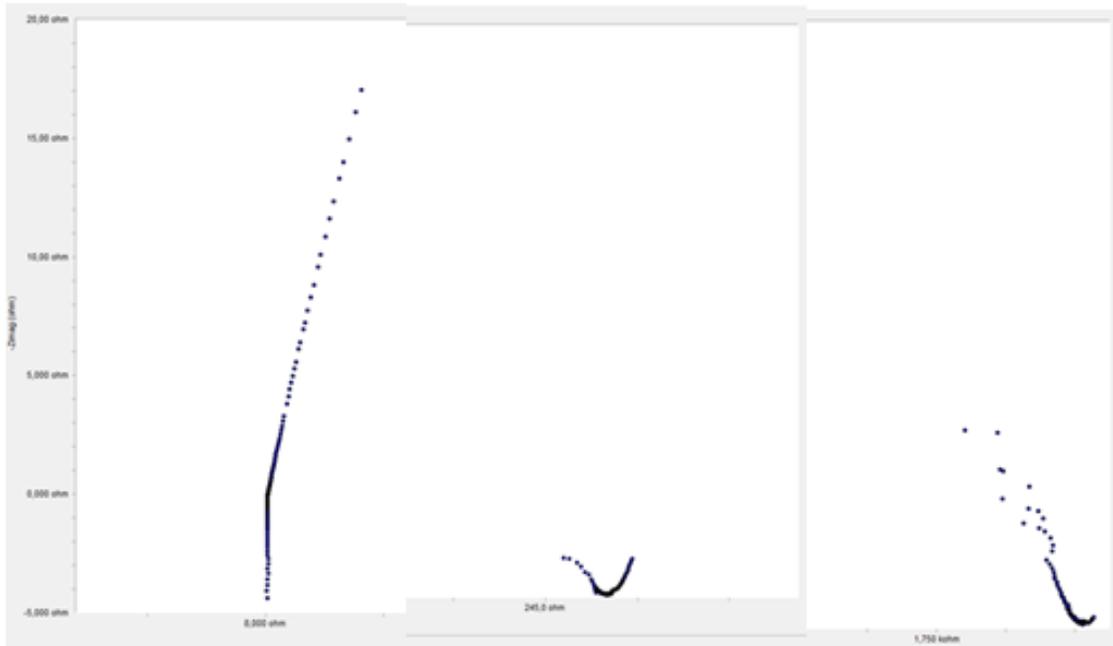
#### 4.9. Impedancia electroquímica

La Impedancia Electroquímica (Electrochemical Impedance EI) es una técnica no destructiva que permite caracterizar el comportamiento electroquímico de una interfase electrodo-electrolito. La impedancia eléctrica ( $Z$ ) es la resistencia ofrecida por un material al flujo de corriente a través de ella. Bajo un campo eléctrico sinusoidalmente alterno, que no está en fase con el flujo de corriente, la impedancia se define como una cantidad compleja (descrita por componentes reales e imaginarios, resistencia  $R$  y reactancia  $X$ , respectivamente) y es una función de la frecuencia de la aplicación del campo.

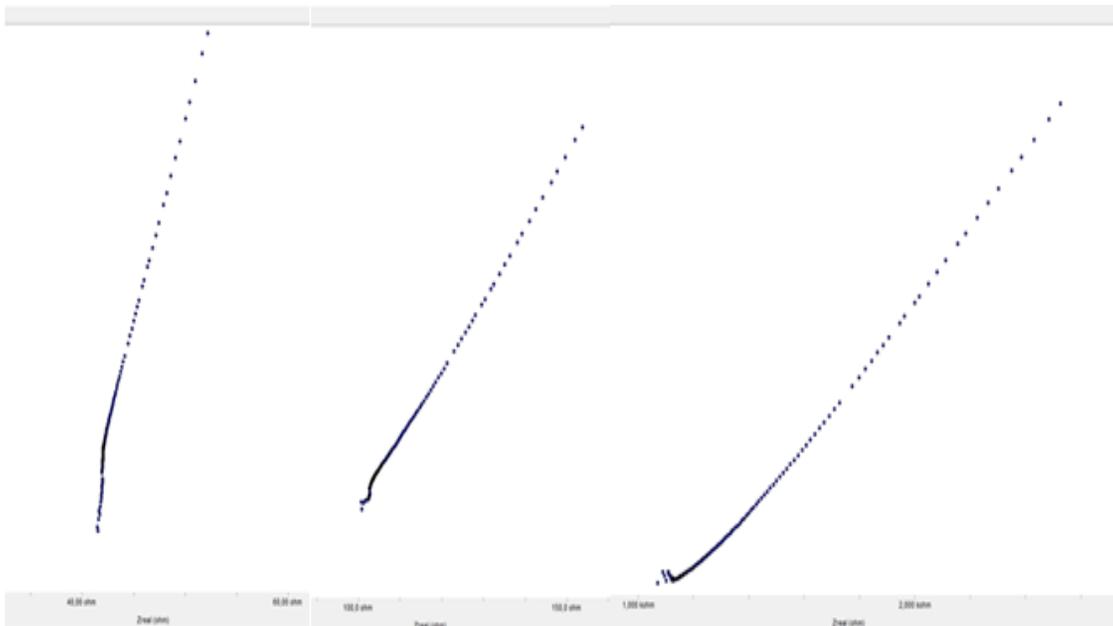
La resistencia se puede relacionar con la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) inherente del material como:  $R = \rho C_c$ , donde  $C_c$  es la constante celular, que depende de la geometría del cuerpo conductor;  $\rho$  se mide en  $\Omega\text{m}$ . De manera similar, la componente real de la admitancia, que es la inversa de la impedancia, puede estar relacionada con la conductividad ( $\sigma$ ) del material, la inversa de la resistividad.

Las mediciones se realizan en un rango de frecuencias y usualmente se presentan en un diagrama de Nyquist, mostrando los componentes imaginarios versus la impedancia real, que generalmente toma la forma de dos arcos semicirculares completos o parciales. El arco de baja frecuencia está dominado por la resistencia a la polarización de los electrodos y el arco de alta frecuencia por el comportamiento del material a granel; aunque, las mediciones a frecuencias muy altas (rango MHz) pueden verse afectadas por efectos capacitivos / inductivos dispersos. Se ha demostrado que el parámetro más fiable que se puede obtener de IS es la resistividad en masa del material ( $\rho_b$ ); este se encuentra en la intersección de los dos arcos donde el componente imaginario es prácticamente cero. La frecuencia de corte, en la que se produce la intersección, depende de la composición de la pasta de cemento y disminuye con el tiempo de hidratación.

Así, por ejemplo, en los ensayos realizados para cero, 1 y 3 días, los diagramas de Nyquist tienen el siguiente comportamiento:

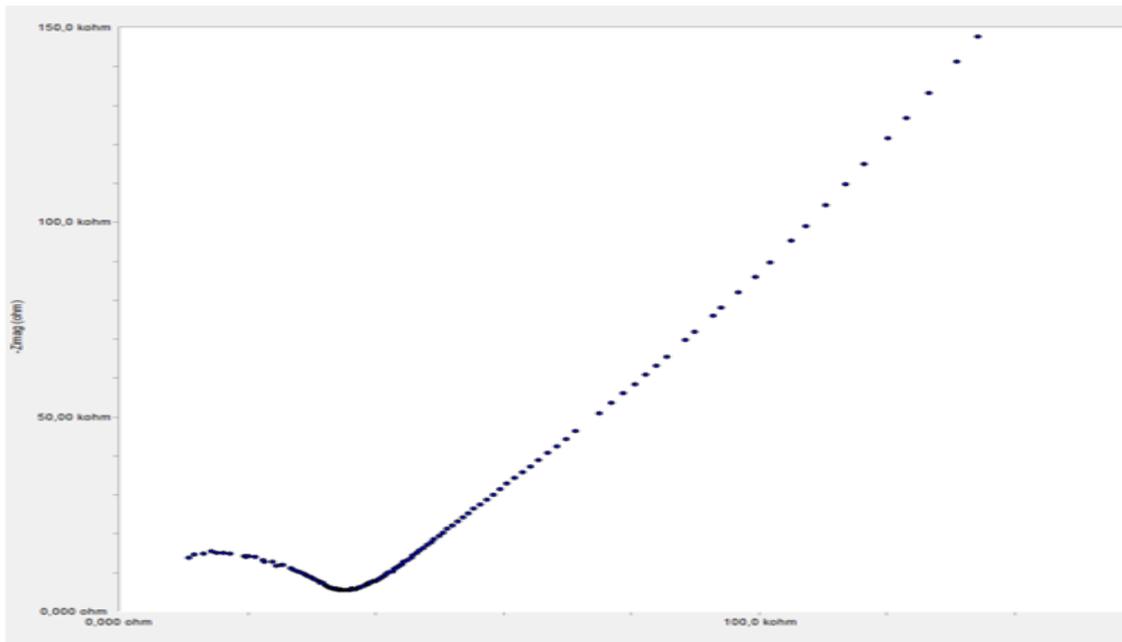


**Figura 36** Diagramas de Nyquist para la activación con NaOH  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 37** Diagramas de Nyquist para la activación con Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + NaOH  
Fuente: elaboración propia.

Esto indica que los procesos electroquímicos desarrollados en el interior de las pastas dependen del activador utilizado. Contrario a la resistencia avanzada, estos diagramas en el tiempo toman la forma característica que permite identificar la impedancia del sistema. La **figura 38** es un ejemplo de la curva característica.



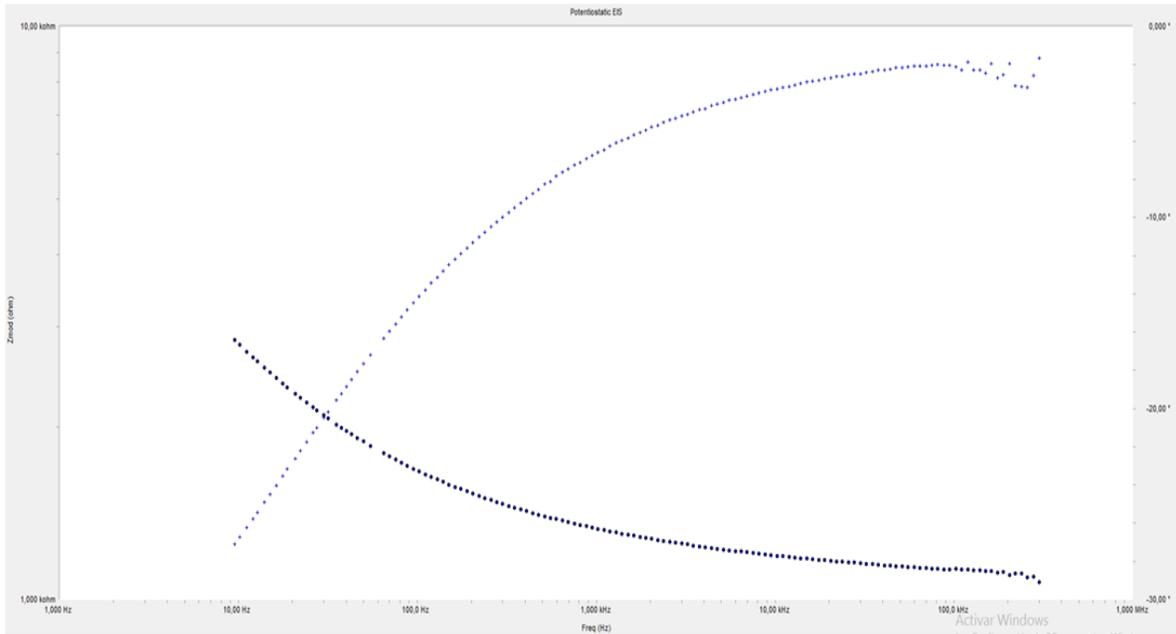
**Figura 38** Diagramas de Nyquist para la activación con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$   
Fuente: elaboración propia.

En principio, la disminución de la constante dieléctrica con el tiempo puede atribuirse a tres fenómenos: (1) modificación de la naturaleza química de los constituyentes, (2) cambio de la cantidad relativa de fases individuales y (3) variación de la topología local. El primer efecto parece ser de poca importancia porque la concentración de componentes iónicos en el agua libre no cambia significativamente en el tiempo; por su parte, las constantes dieléctricas del precursor y del CSH son sustancialmente similares, los fenómenos 2 y 3 están estrictamente relacionados entre sí. La hidratación del cemento se acompaña de una disminución del contenido de agua libre y un aumento del volumen de la fase sólida.

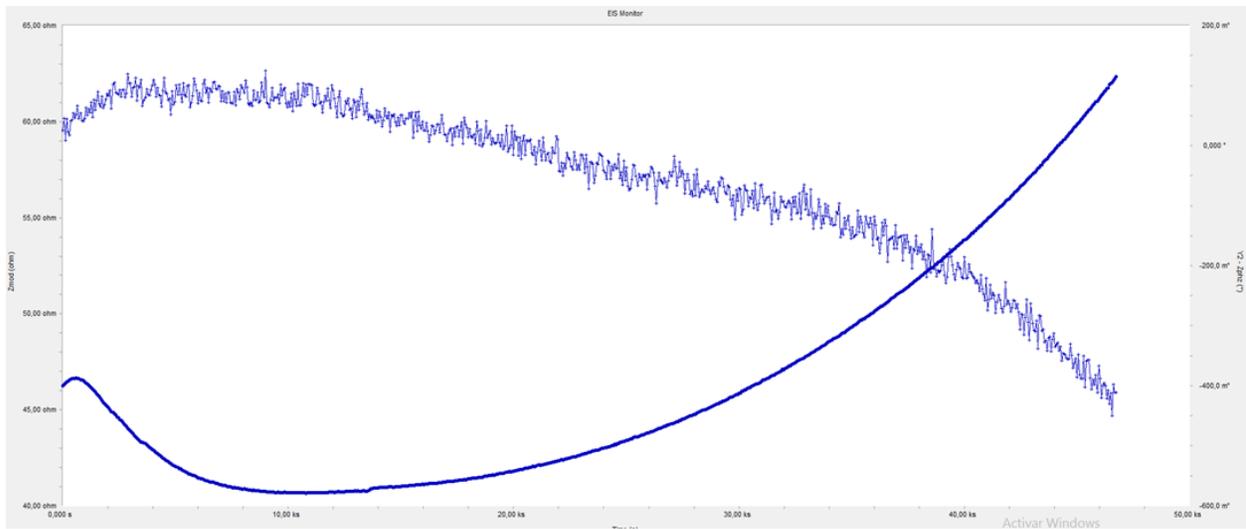
El diagrama de Bode es un tipo de representación gráfica de funciones complejas (en nuestro caso, funciones de transferencia) dependientes de una variable real (la frecuencia angular o lineal).

Este consta de dos trazados:

- Diagrama del logaritmo del módulo de una función de transferencia sinusoidal.
- Diagrama del ángulo de fase.



**Figura 39** Diagramas de Bode para una mezcla activa con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  a los 3 días  
Fuente: elaboración propia



**Figura 40** Diagramas de frecuencias para un tiempo de 72 horas  
Fuente: elaboración propia.

Para todos los especímenes examinados en este estudio, sus resistencias eléctricas aumentan de nuevo con el tiempo. Se pueden identificar tres etapas sobre la evolución de la resistencia eléctrica con el tiempo de curado de la escoria activada, una etapa inicial de rápido crecimiento, una fase plana / ligeramente creciente y una etapa final creciente. La primera etapa de rápido crecimiento, debería estar dominada por la consolidación de los productos de reacción, como señalan varias investigaciones. Al final, la fase de aumento debe estar dominada por la pérdida de humedad; mientras que la fase plana / ligera creciente en el centro debe ser una combinación de todos estos tres factores. Características similares se pueden encontrar en otros tres geopolímeros.

## 5. Conclusiones

1. La escoria granulada de fabricación nacional, se caracteriza por tener un porcentaje alto en peso de escoria, de óxido de calcio (CaO) que la clasifica como una escoria básica. Su morfología presenta un alto grado de amorficidad con pequeños porcentajes de cristalinidad, lo que corresponde a la fase de melilita en solución sólida de gelenita. Esto la hace un material que puede ser utilizado como adición mineral hidráulica o en la elaboración de geopolímeros.
2. De los activantes utilizados, la combinación de hidróxido de sodio y silicato de sodio con la concentración de 7% de Na<sub>2</sub>O en peso de escoria y la relación SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O igual a 1.5, mostraron en los morteros elaborados, las mejores resistencias a compresión a edades tempranas, del orden de 70MPa. Su mayor tasa de ajuste y el buen comportamiento que muestra al curado al aire ambiente, hacen de esta mezcla un material importante para ser utilizado en la construcción.
3. Si bien el tiempo de exposición de los morteros a ambientes agresivos en medios sulfáticos y de agua de mar no son prolongados, los resultados indican una tendencia a tener mejor comportamiento en los cementos activados alcalinamente frente al cemento portland; incluso, la mezcla activa con silicato presentó un incremento del 10.2% de su resistencia a compresión a los 90 días. Esta estabilidad se debe a que la composición química de estas pastas no se logra observar en fases de aluminato ni portlandita (Ca(CO)<sub>2</sub>).
4. Los cementos activados alcalinamente mostraron una tasa muy baja de desprendimiento de calor en comparación con la mostrada por el cemento portland, lo que puede estar indicando que la cinética de las reacciones no está gobernada exclusivamente por el calor

que se genera, sino que pueden estar presentes otros procesos como los catalizadores. Estos procesos son característicos de la polimerización de los compuestos.

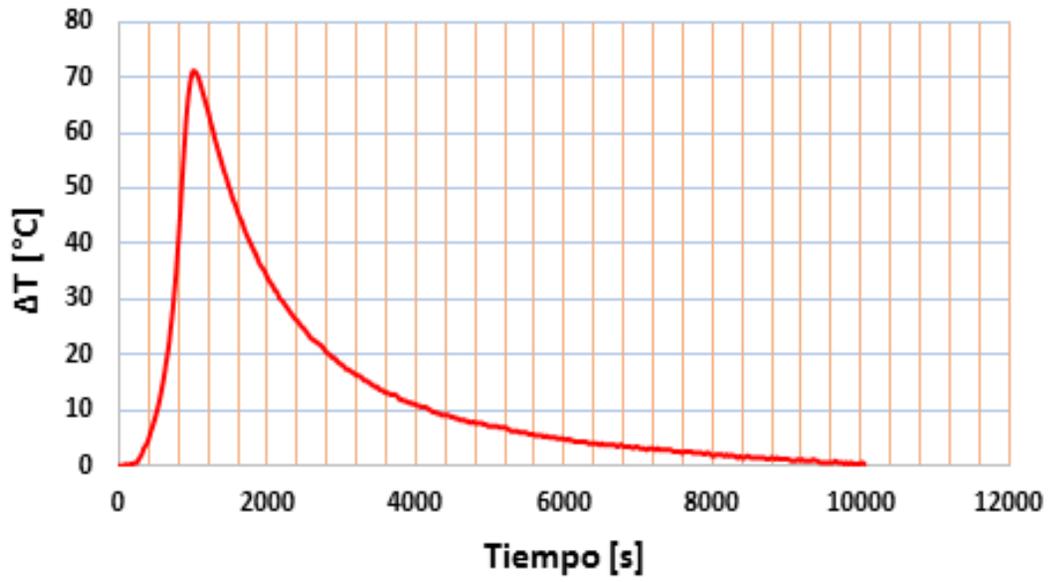
5. Las micrografías y difractogramas realizados a las muestras, permiten diferenciar en morfología (fibrosa, plana, irregular, reticulada) y composición química los productos de reacción. El tipo de activador define una forma particular para estos productos. Sin embargo, en todos ellos se observa una alta presencia de C-S-H y, en menor cantidad, el silico aluminato cálcico hidratado C-A-S-H. Los demás productos de reacción que reportan las investigaciones no lograron ser identificadas.
6. Las muestras analizadas por difracción de rayos x (DRX), en un proceso semicuantitativo, muestran que tanto la escoria como los productos de reacción son estructural altamente amorfas. Solo para mezclas activadas con hidróxido de sodio se observa con el tiempo un incremento de las estructuras cristalinas, que no se lograron identificar en la microscopia electrónica de barrido pero que pueden estar relacionadas con hidrotalcita, hidrogranate o fases de aluminato.
7. La microscopia de fuerza atómica (AFM) permitió identificar el cambio de topografía en las muestras con el tiempo, asociadas con la formación de productos de hidratación. Las muestras activadas con hidróxido de sodio mostraron un mayor cambio en su topografía en relación con los activados por silicato en un periodo de 24 horas; lo que indica la presencia de un mayor número de productos de reacción, que se corrobora con los ensayos de calorimetría. La limitación del equipo utilizado no permitió estudiar la rugosidad asociada con la porosidad y fisuras provocadas por la activación, que dieran cuenta del comportamiento del material a nivel macroscópico.

8. Los diagramas de Nyquist en la espectroscopia electrónica, son bien diferenciados dependiendo del tipo de electrolito conectado, que para nosotros represente las diferentes muestras activadas. Esto, permite comprender que la velocidad de reacción de los procesos ocurridos son diferentes. El corrimiento a la derecha de las curvas, para la misma muestra, nos están indicando un aumento de la resistividad debido a la reacción que se presenta en la mezcla.
9. La activación alcalina de la escoria es un proceso distinto a la hidratación del cemento Portland; luego, los tiempos de mezclado que establece la norma para un cemento convencional, pueden perfectamente no ser los requeridos para este tipo de material. La polimerización de la escoria con el activante puede no depender necesariamente del calcio para su formación.

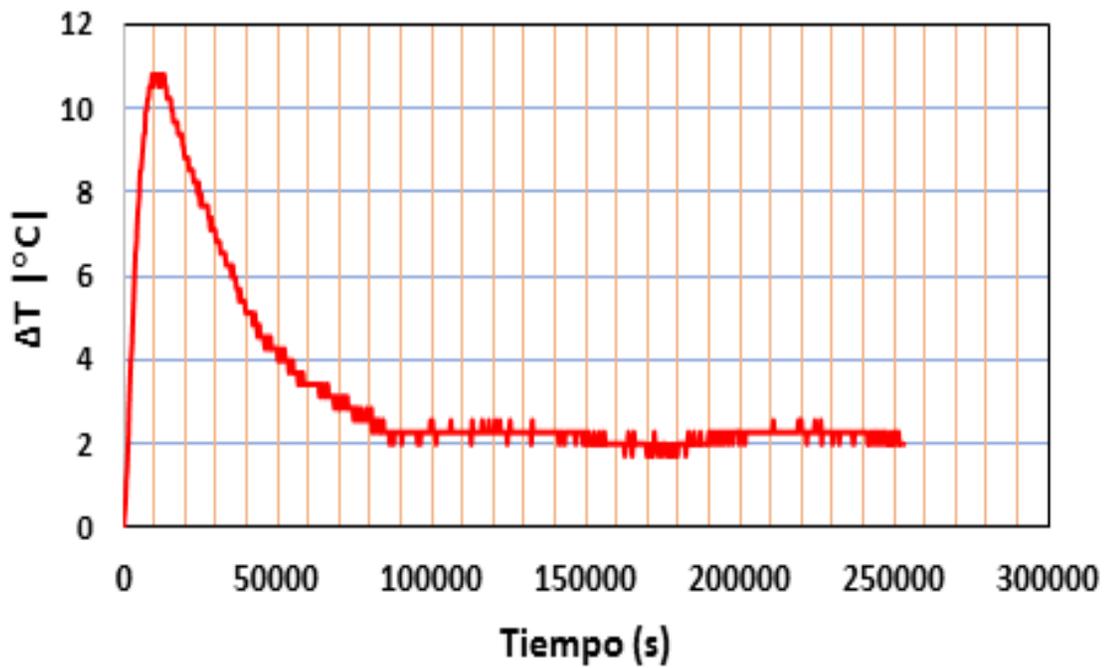
## **6. Anexos**

# **ANEXO A: Calorimetría.**

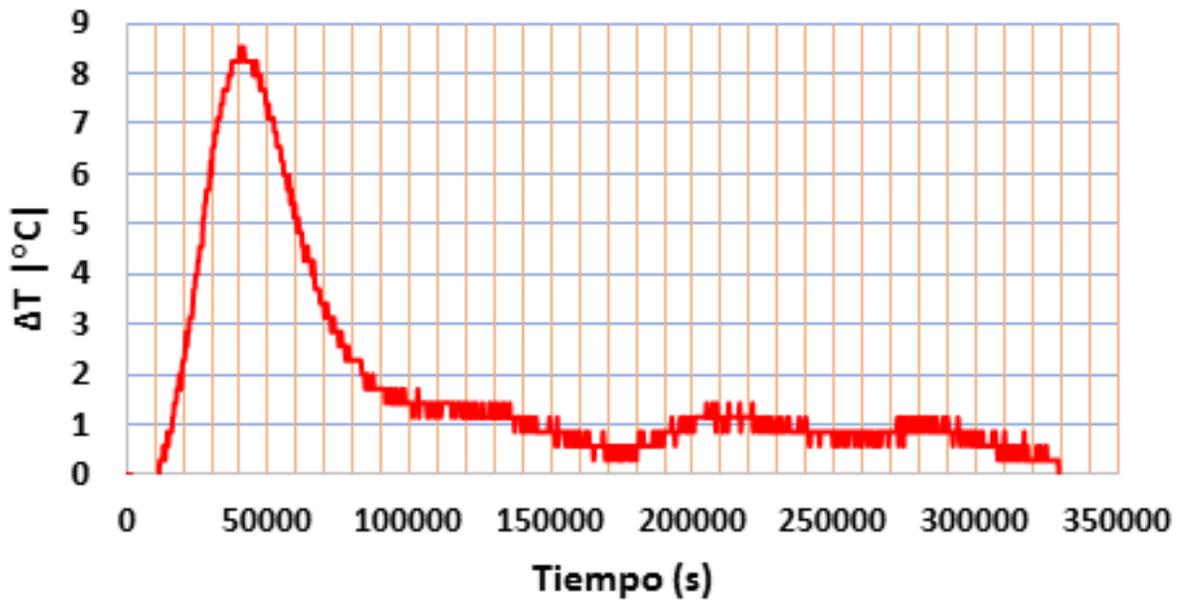
### CALORIMETRÍA (CEMENTO PORTLAND)



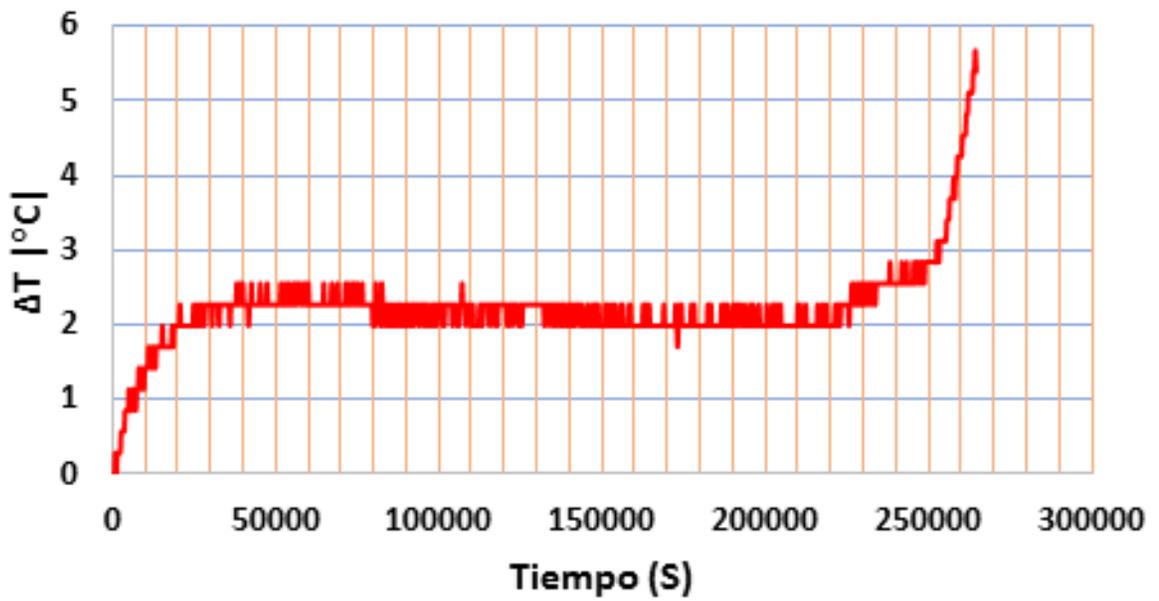
### CALORIMETRÍA (ACTIVACIÓN NaOH)



### CALORIMETRÍA (ACTIVACIÓN $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ )

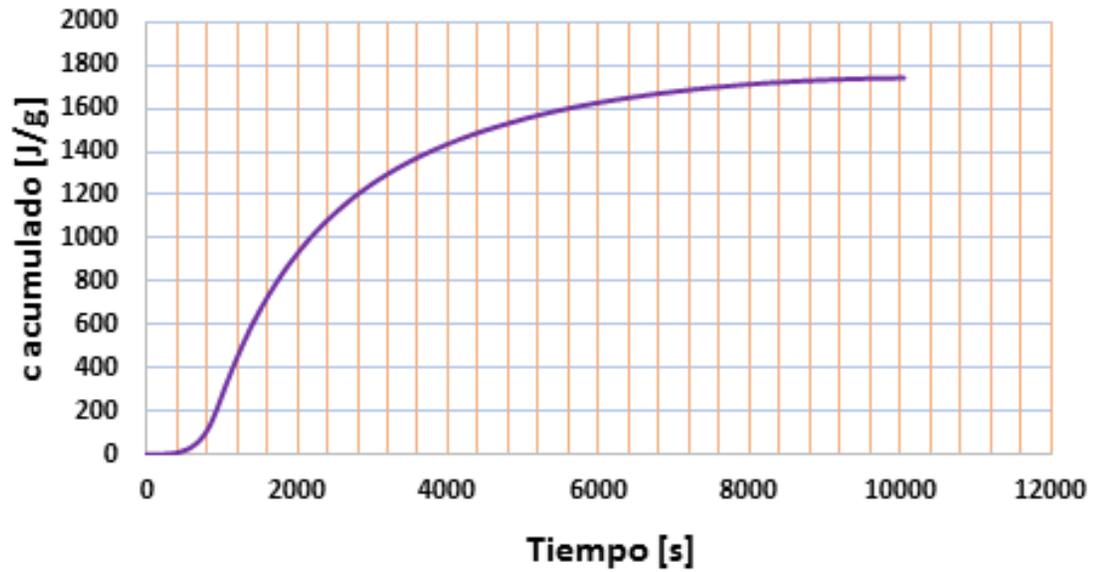


### CALORIMETRÍA (ACTIVACIÓN $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

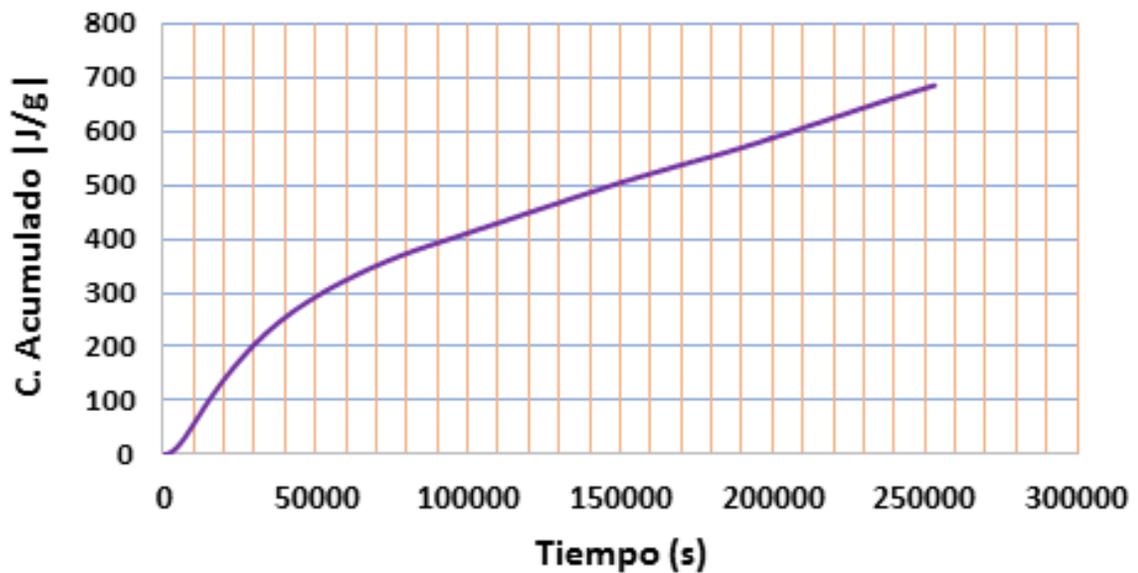


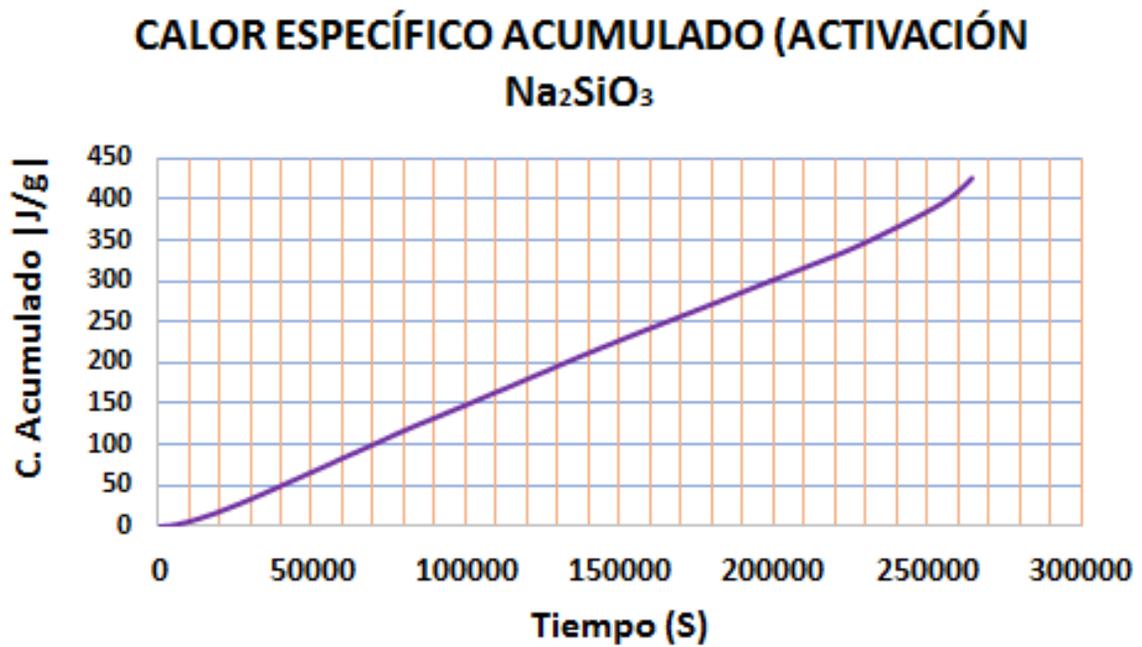
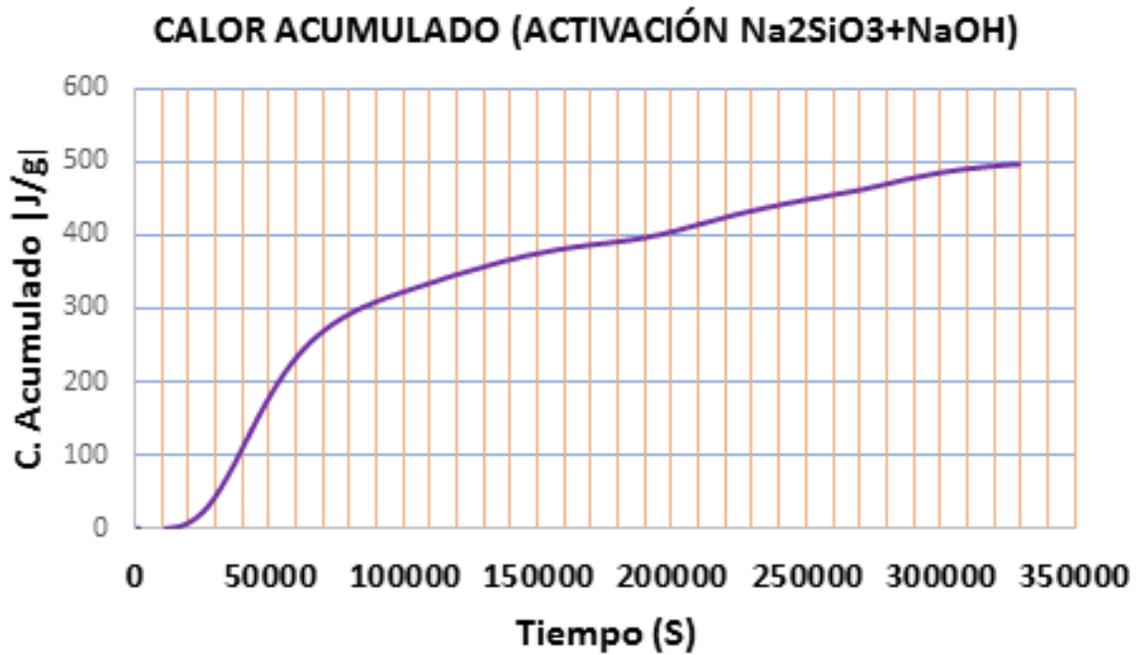
## CALOR ESPECÍFICO ACUMULADO

### CALOR ESPECÍFICO ACUMULADO (CEMENTO PORTLAND)

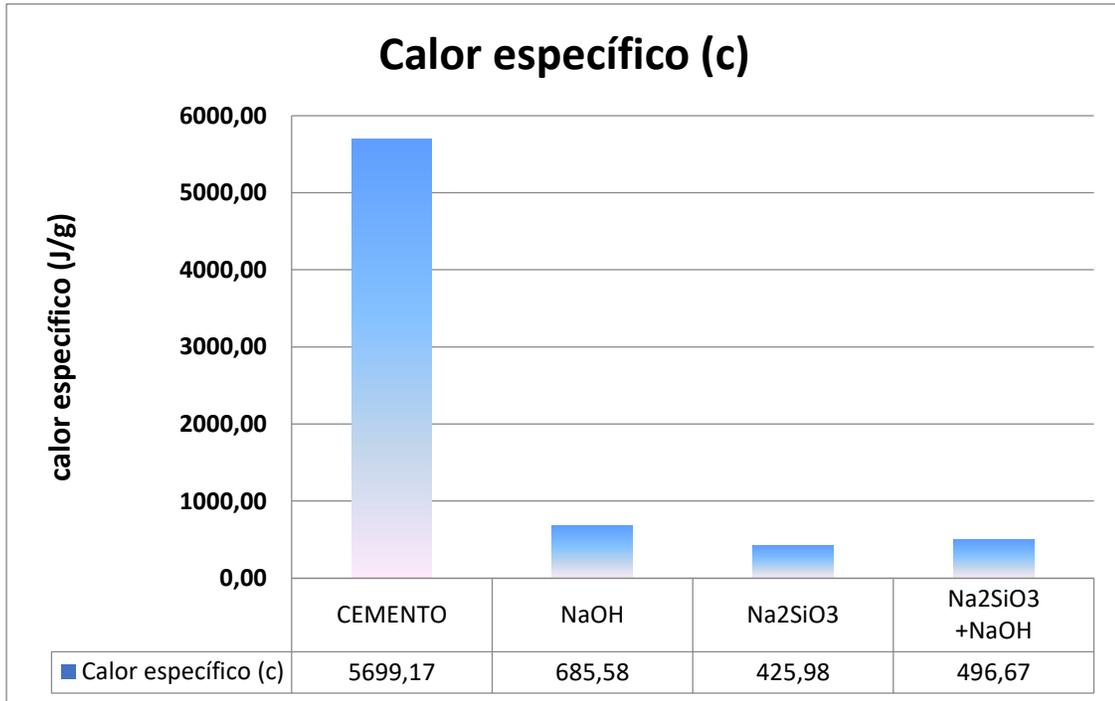


### CALOR ESPECÍFICO ACUMULADO (ACTIVACIÓN NaOH)





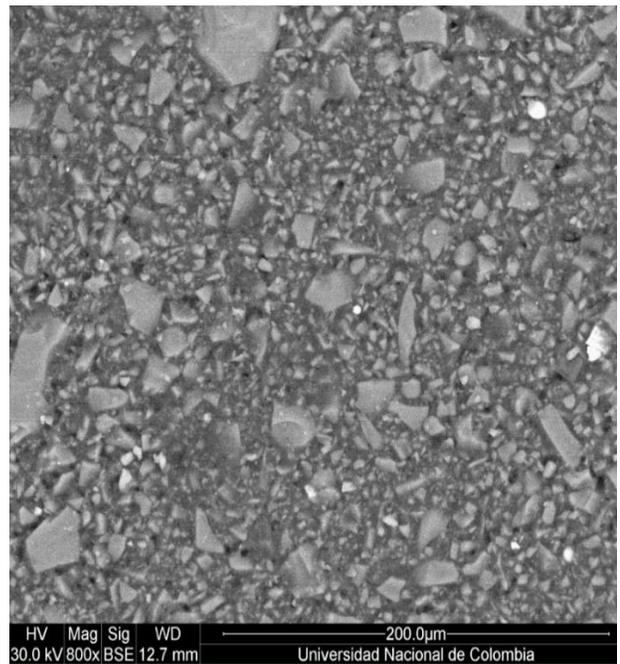
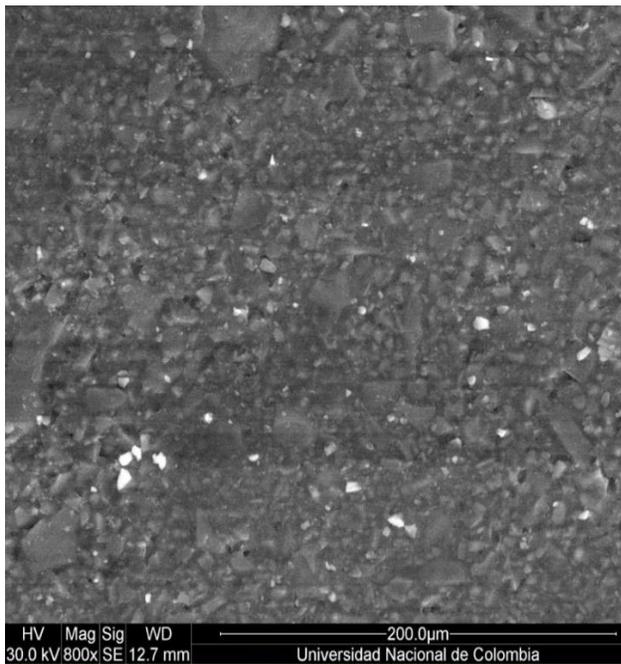
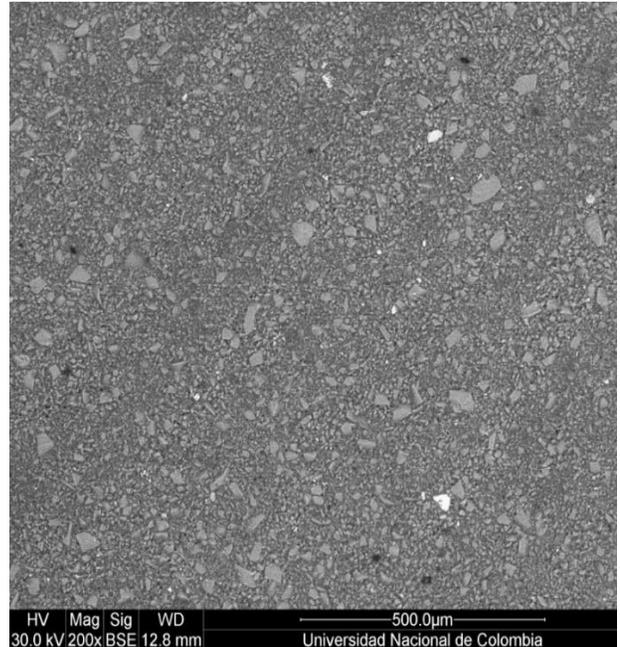
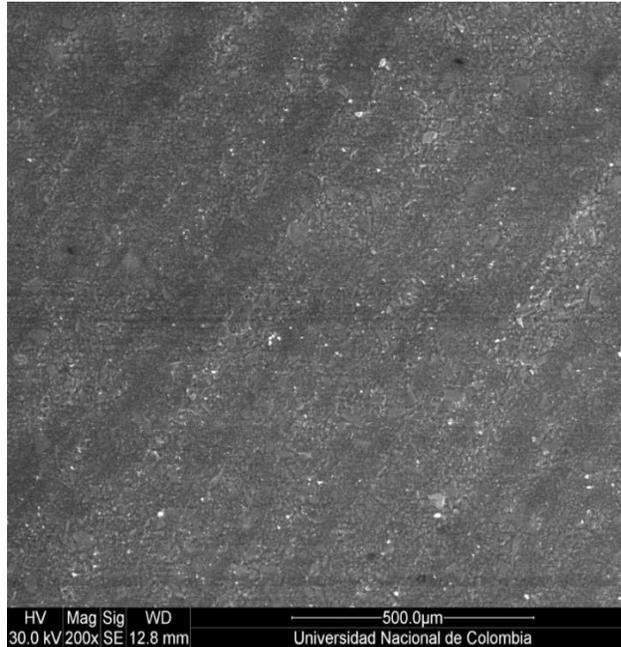
### RESUMEN CALOR ESPECÍFICO



## **ANEXO B: Imágenes microscopia electrónica.**

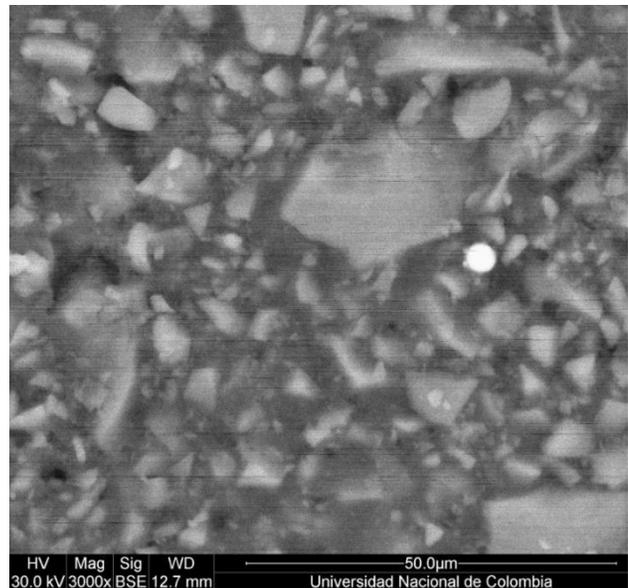
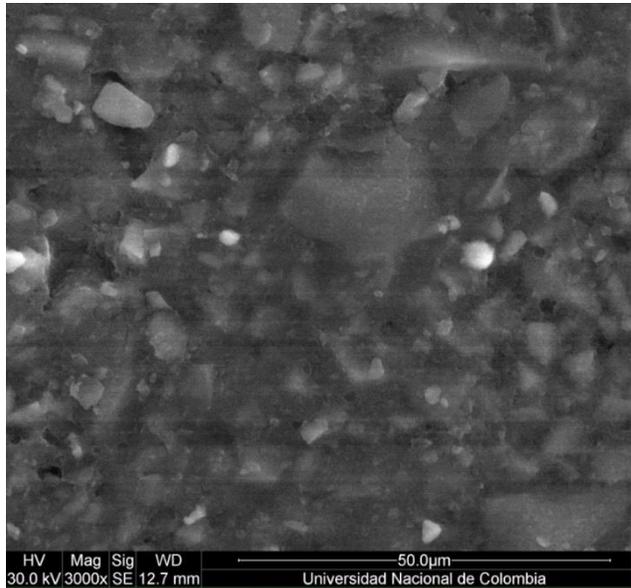
## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

Pasta 3 horas



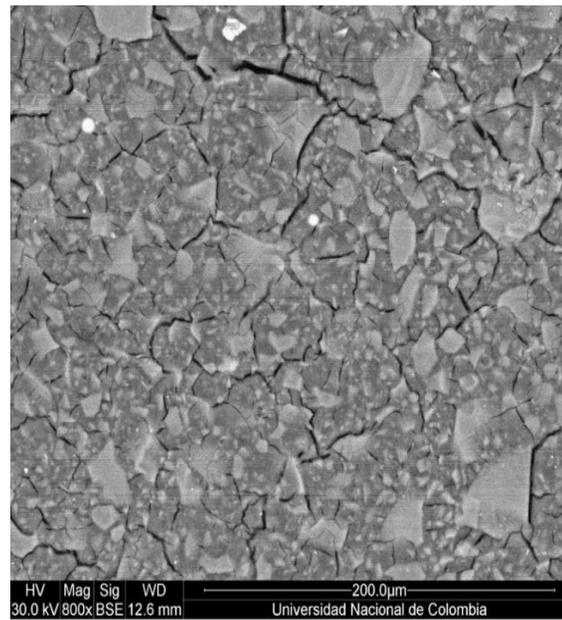
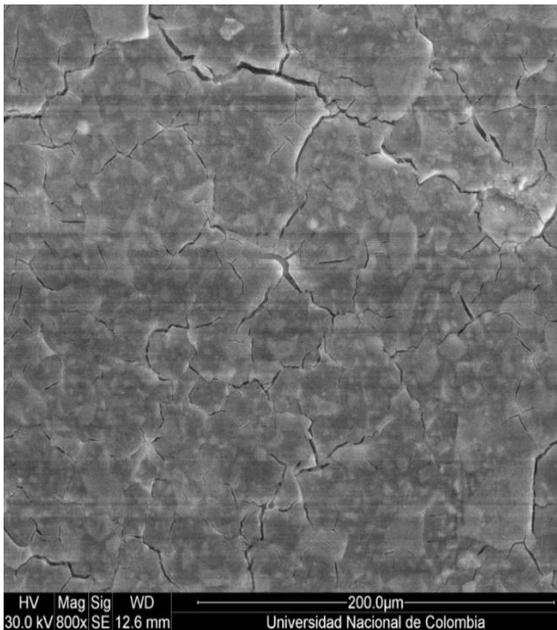
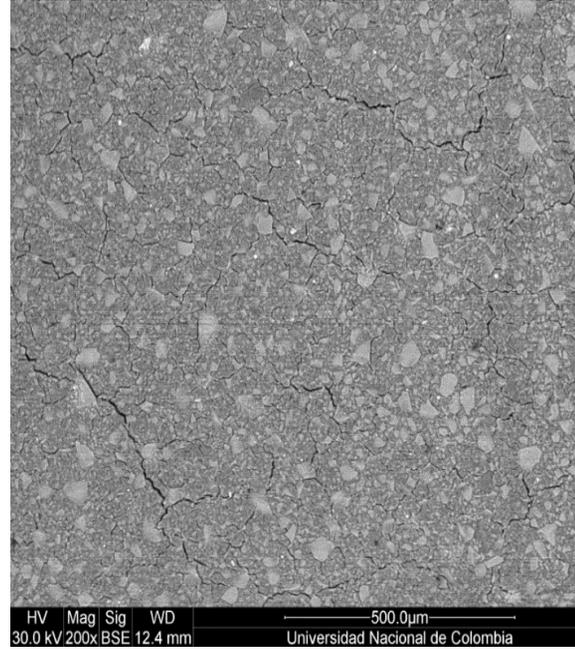
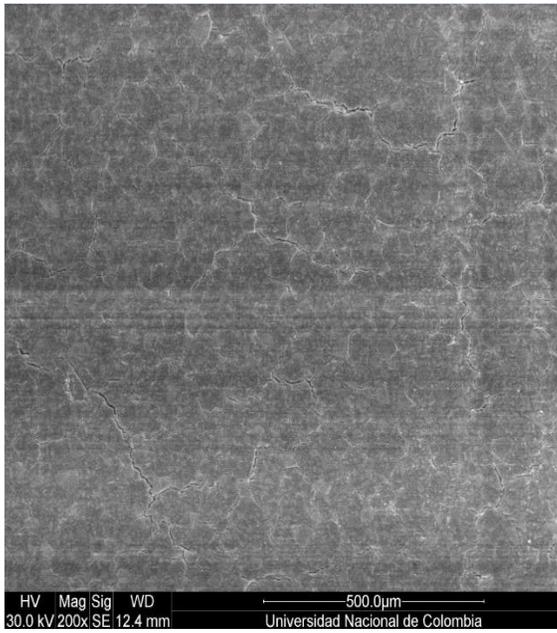
## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

### Pasta 3 horas



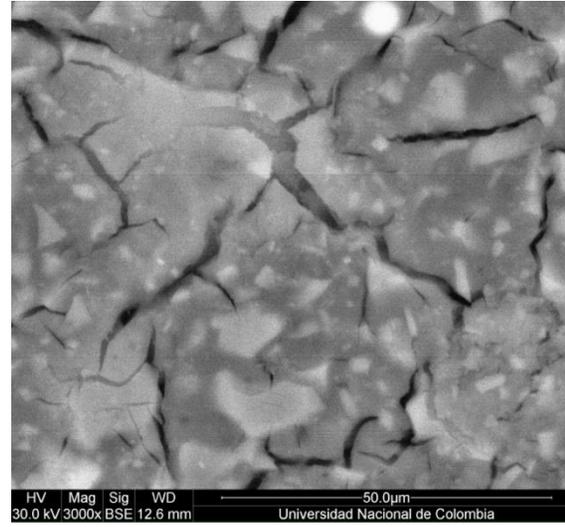
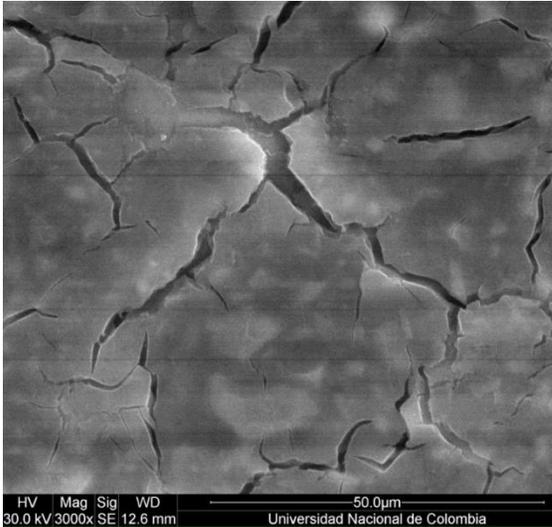
## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

### Pasta 1 día



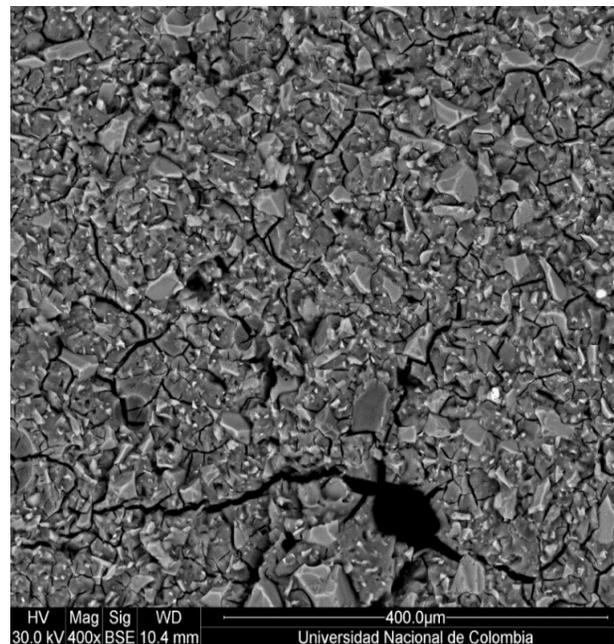
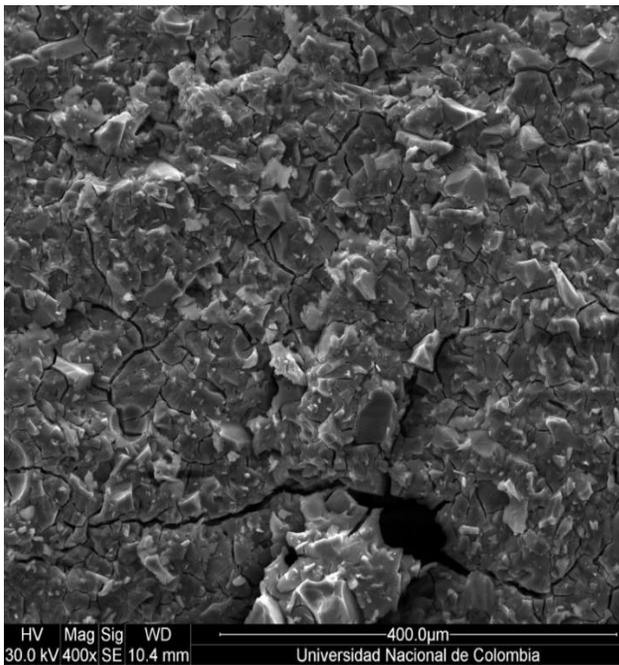
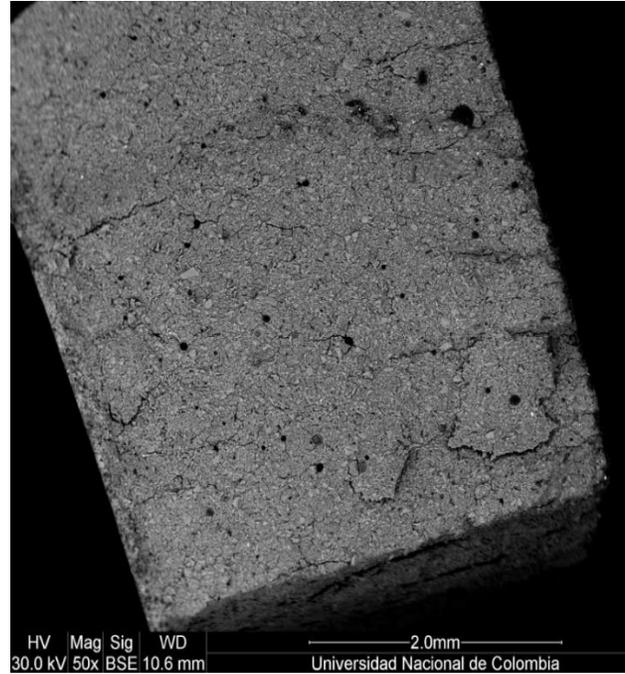
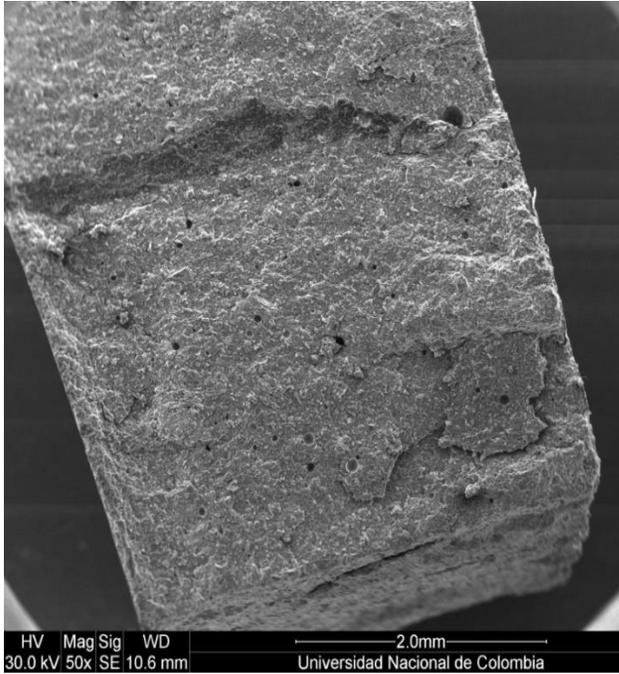
## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

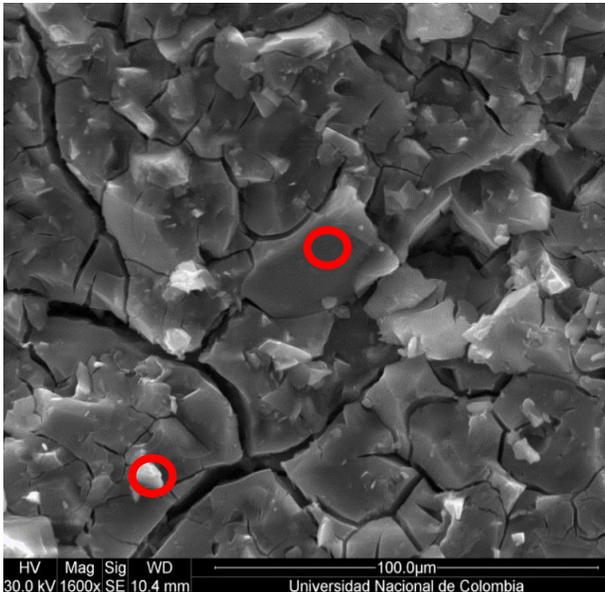
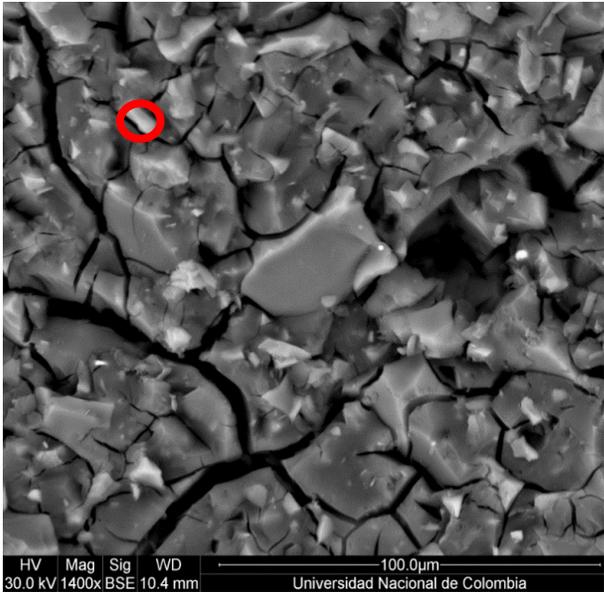
### Pasta 1 día



## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

Pasta 3 días.

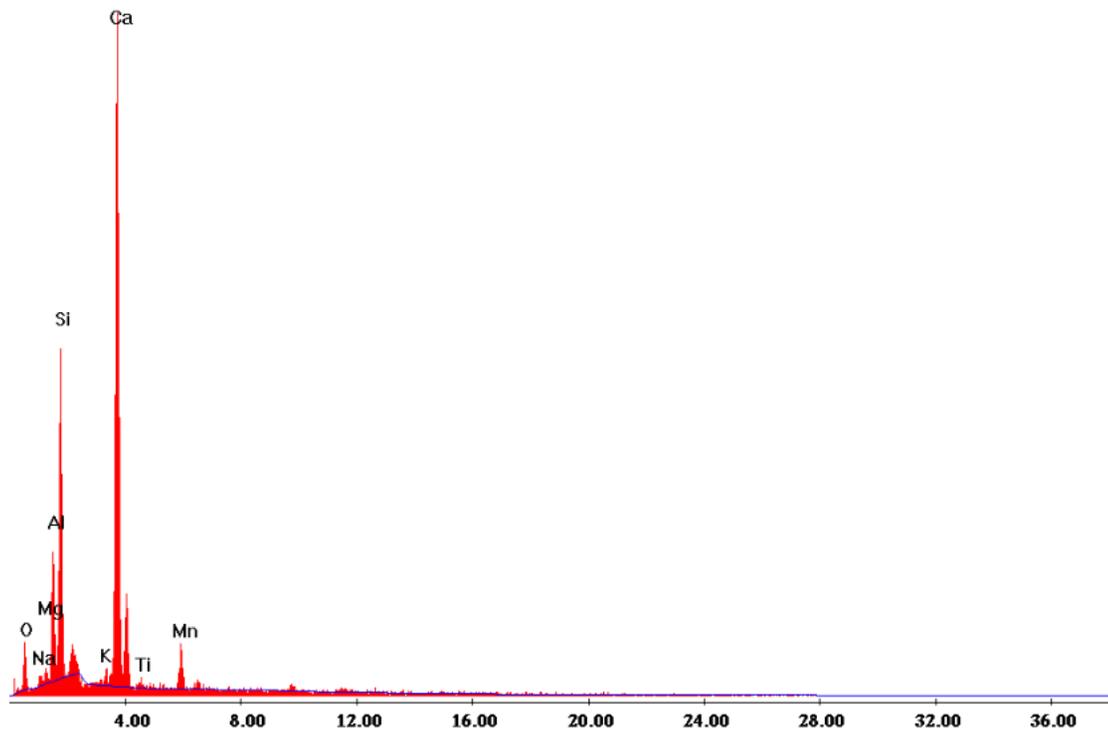




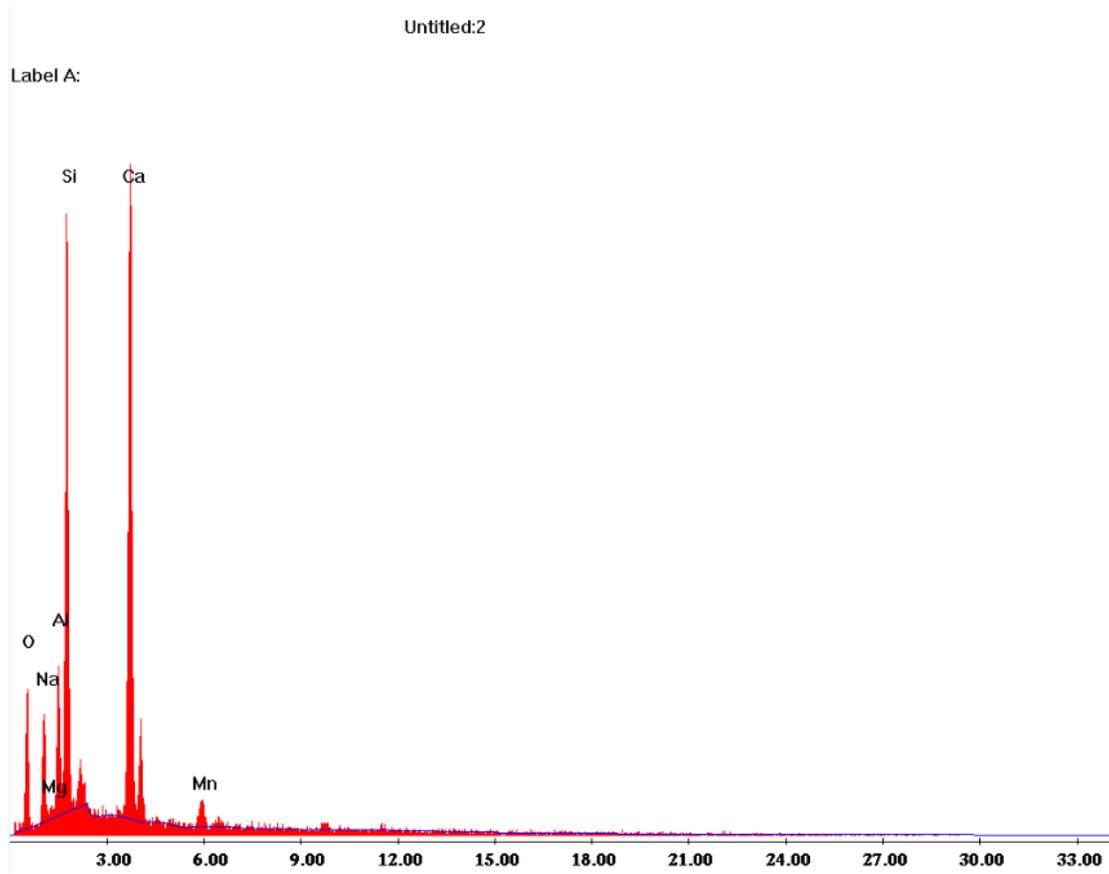
**PUNTO A (CRISTAL BRILLANTE)**

Untitled:2

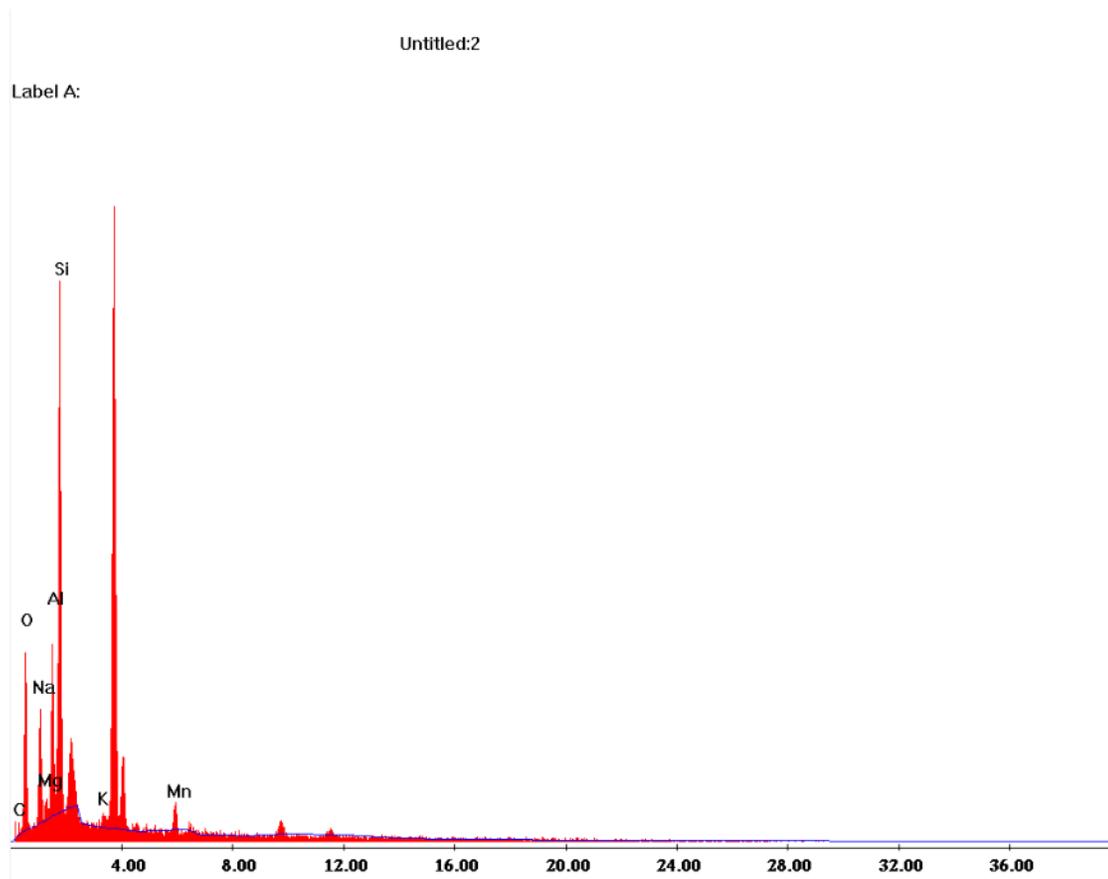
Label A:



**PUNTO B (CRISTAL OSCURO)**

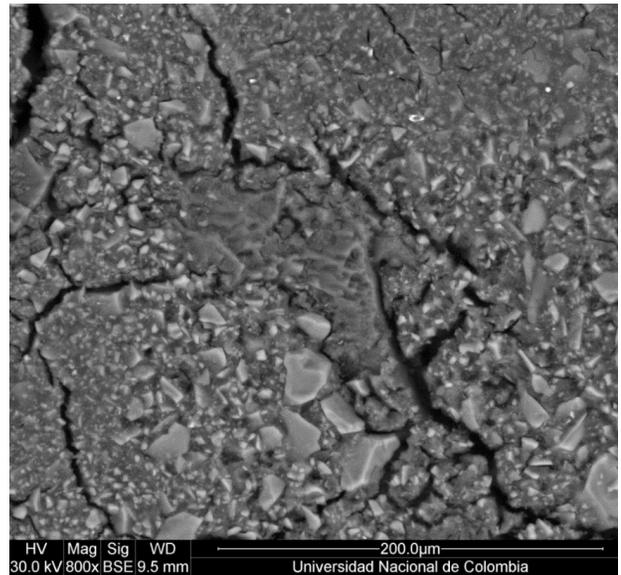
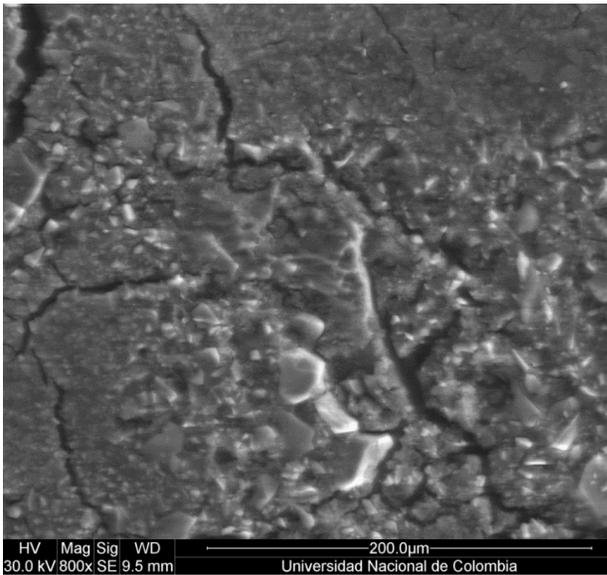
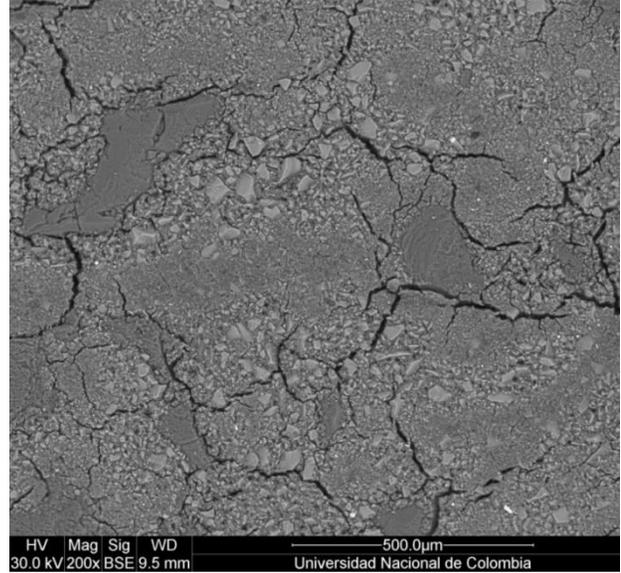
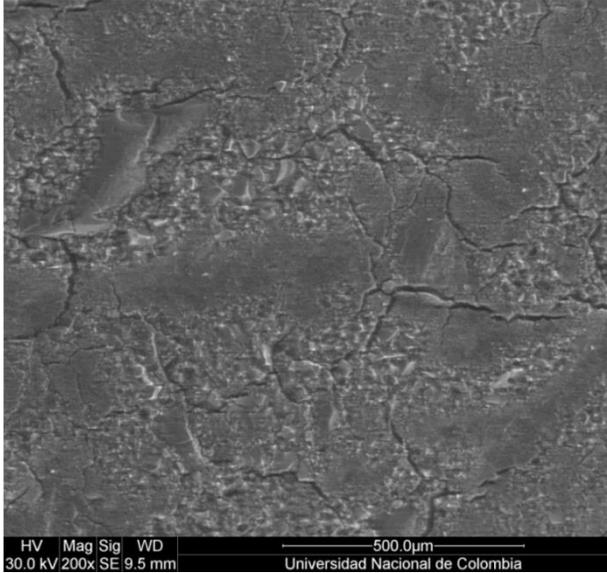


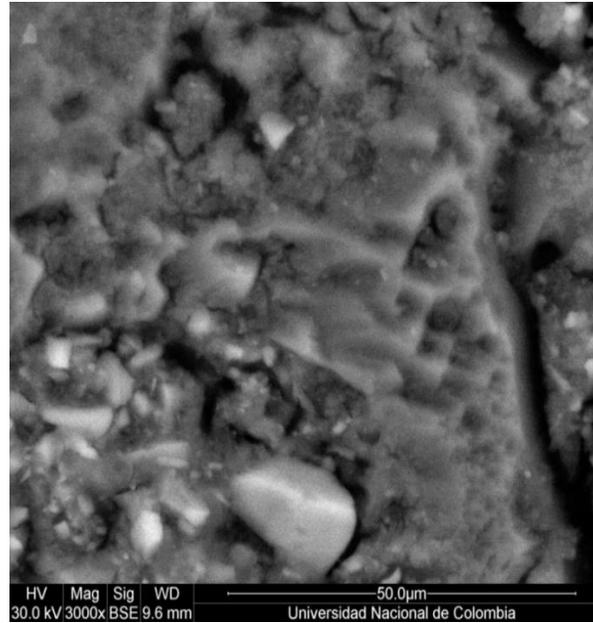
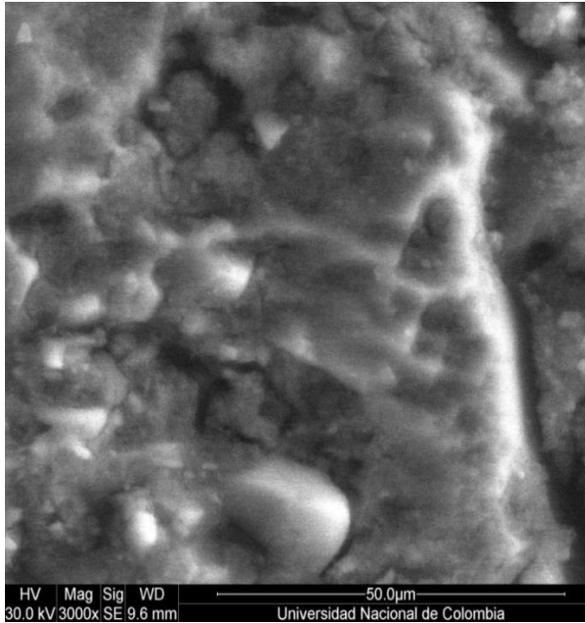
### PUNTO C (CRISTAL PEQUEÑO)



## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

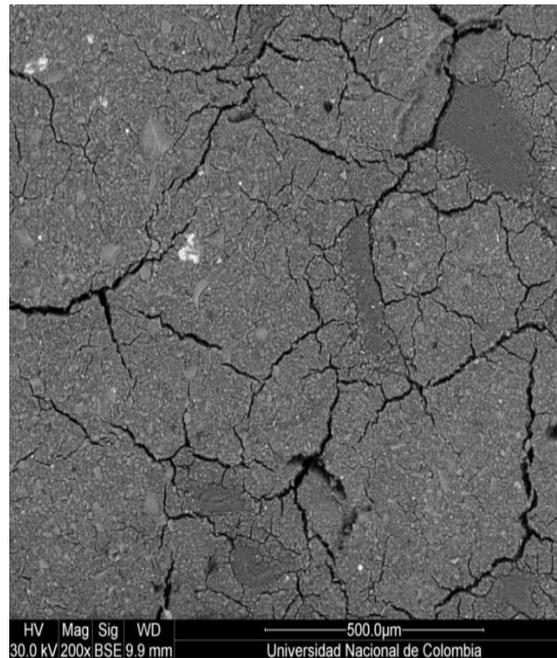
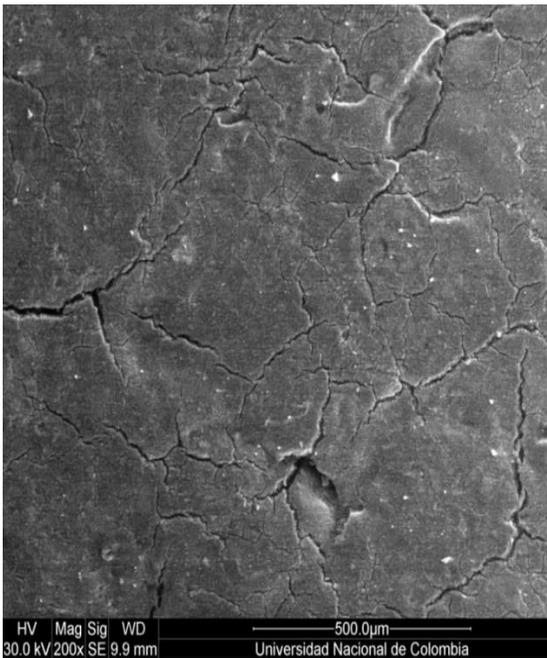
### Morteros 3 horas

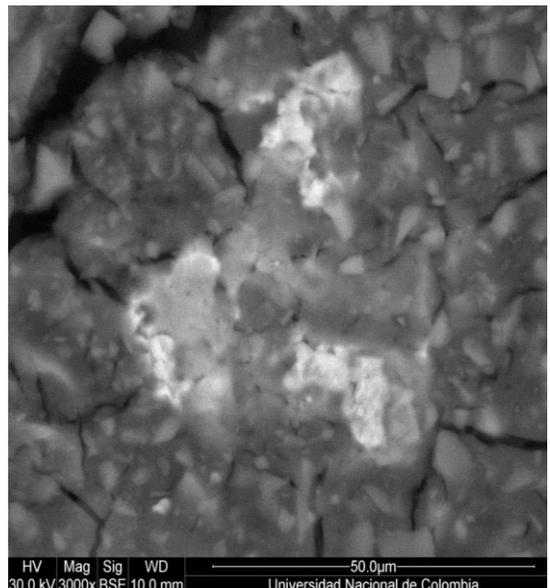
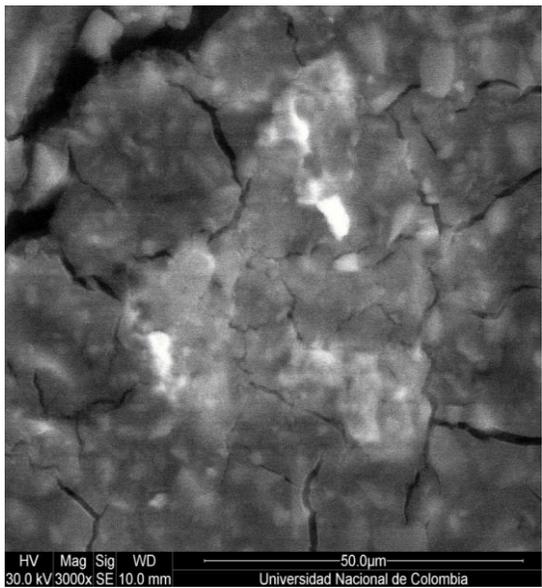
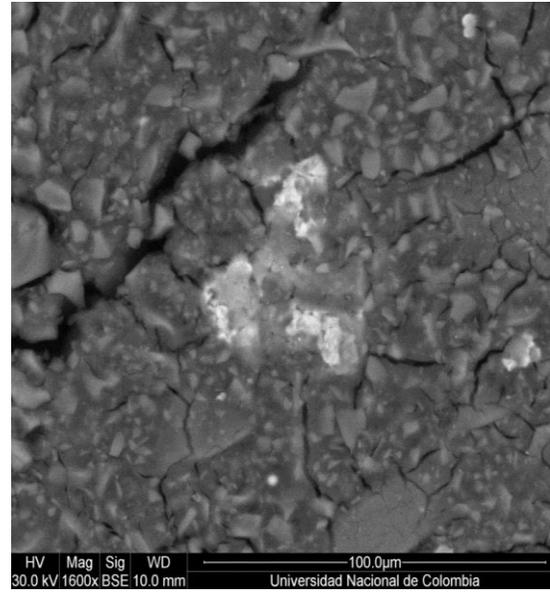
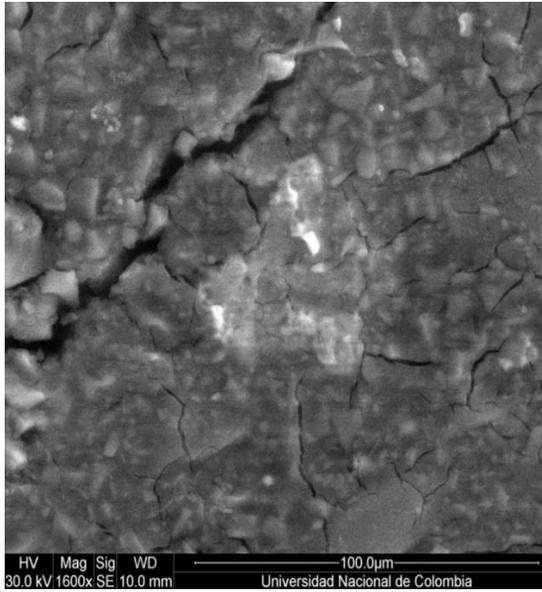




### ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

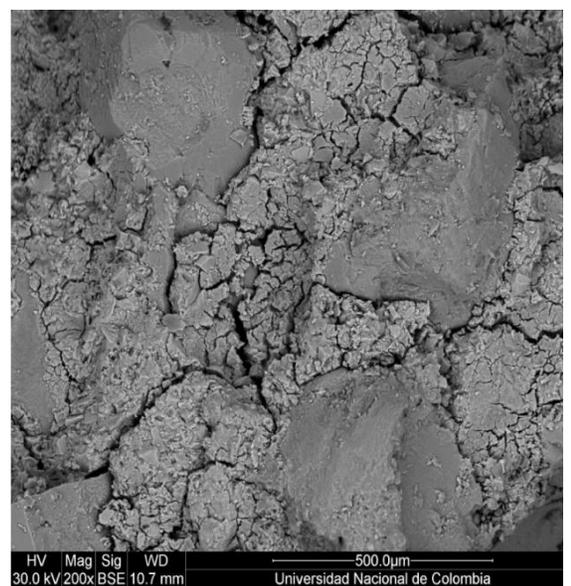
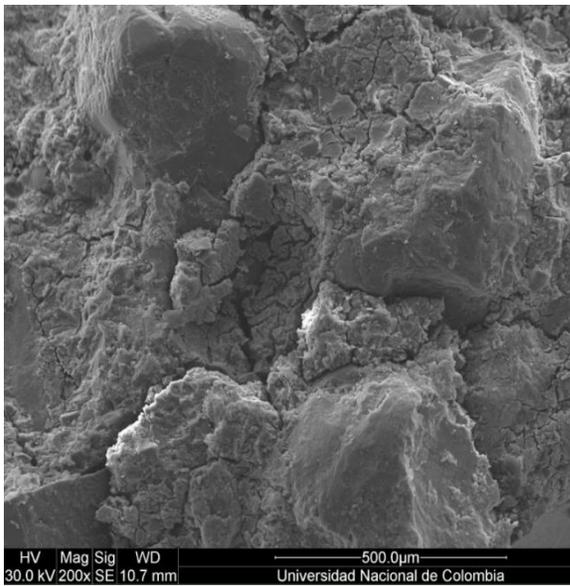
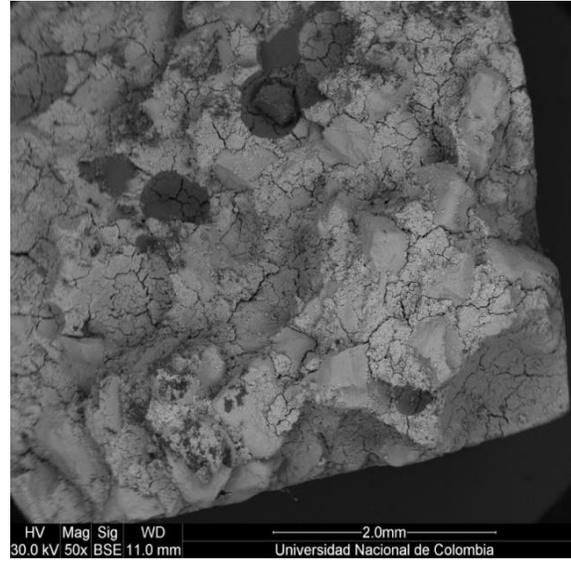
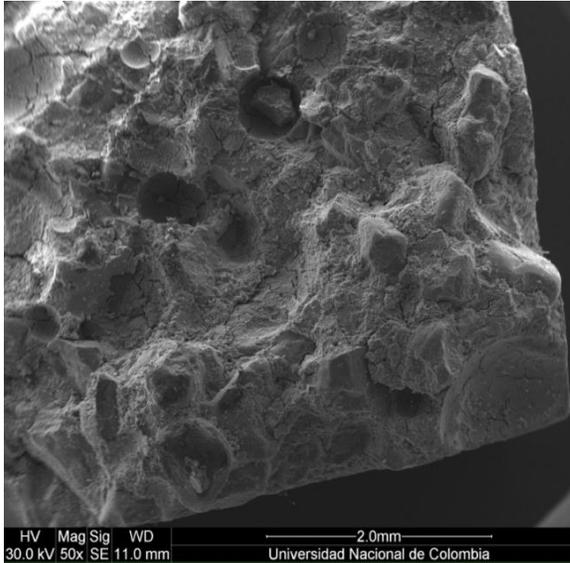
#### Mortero 1 día





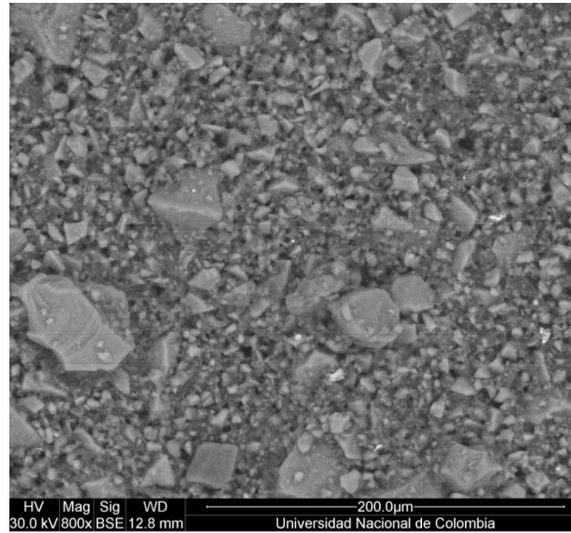
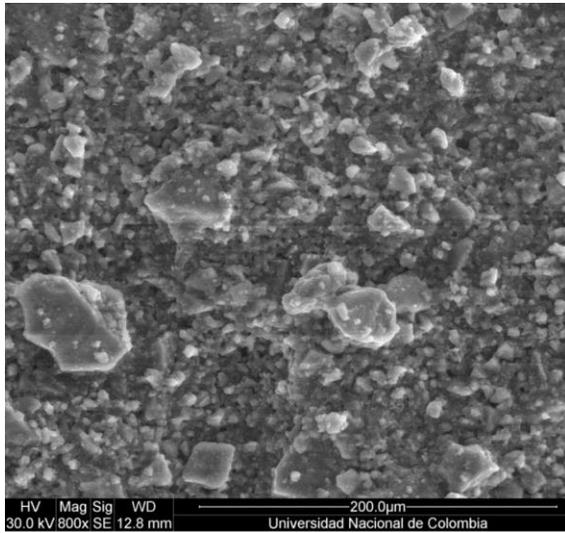
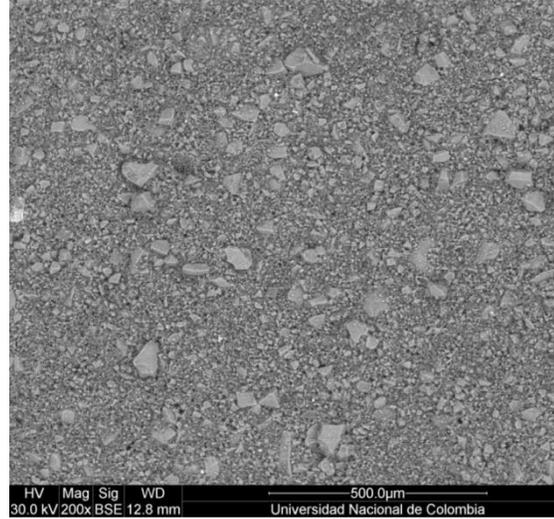
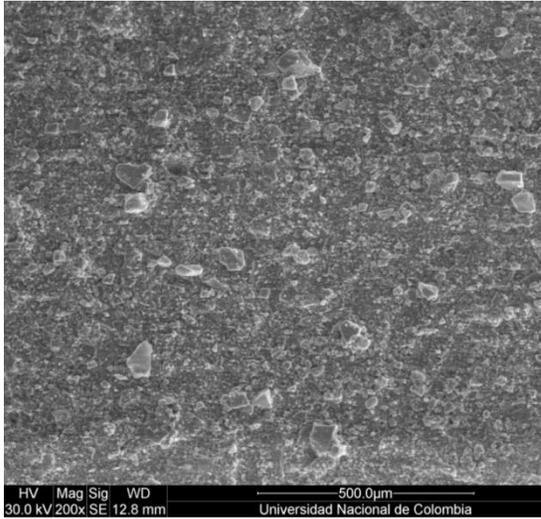
## ACTIVACIÓN SILICATO MÓDULO 1.5

### Mortero 3 días



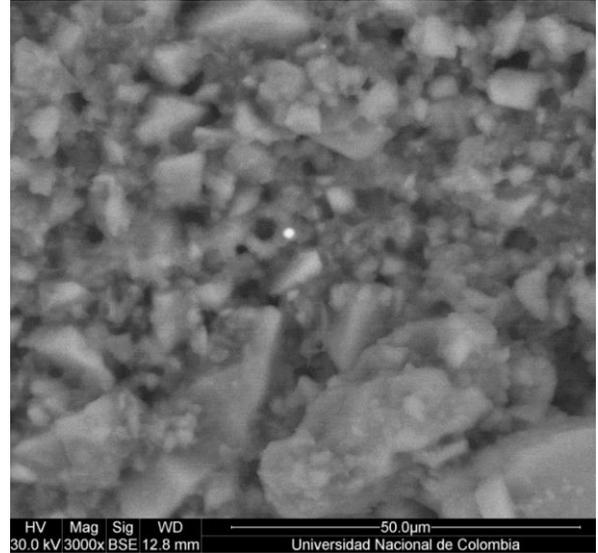
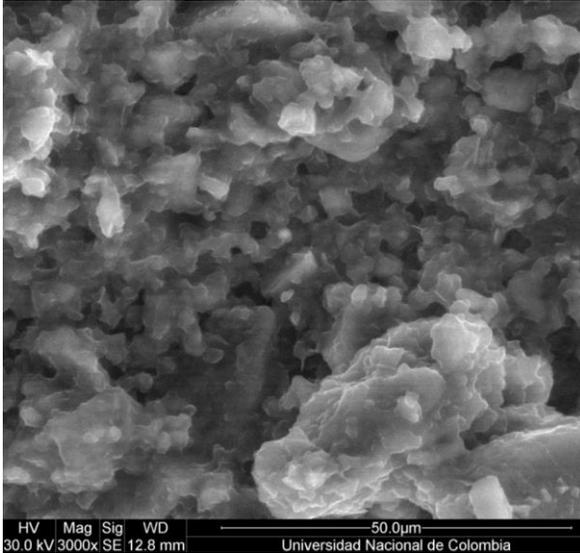
## ACTIVACIÓN NAOH 6%

### Pasta 3 horas



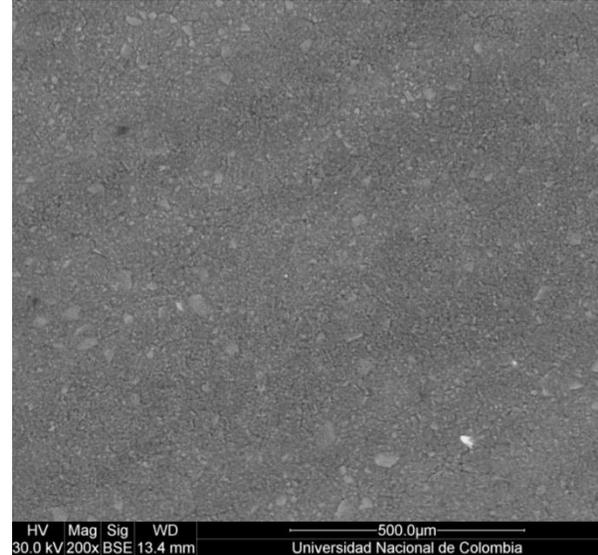
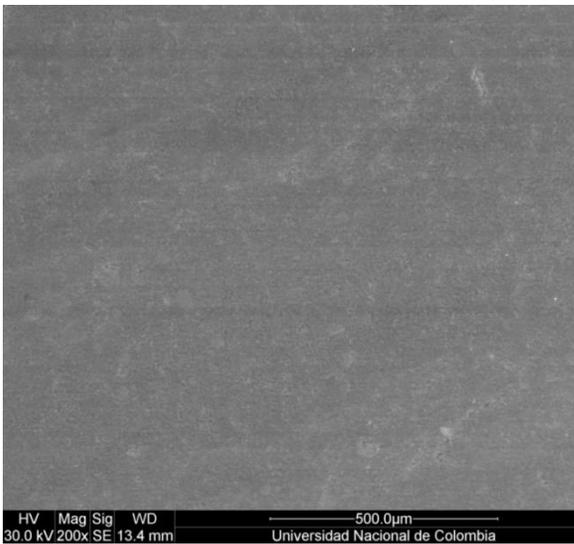
## ACTIVACIÓN NAOH 6%

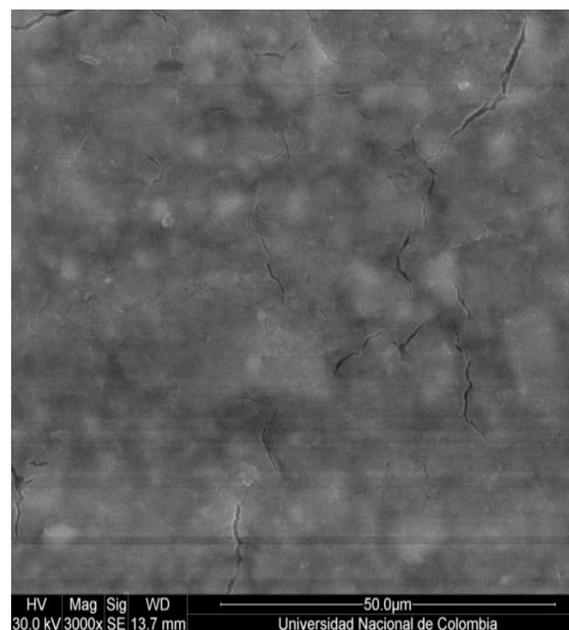
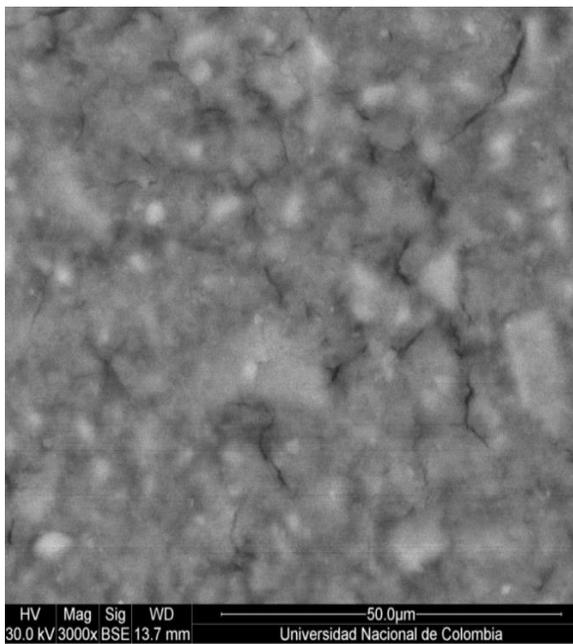
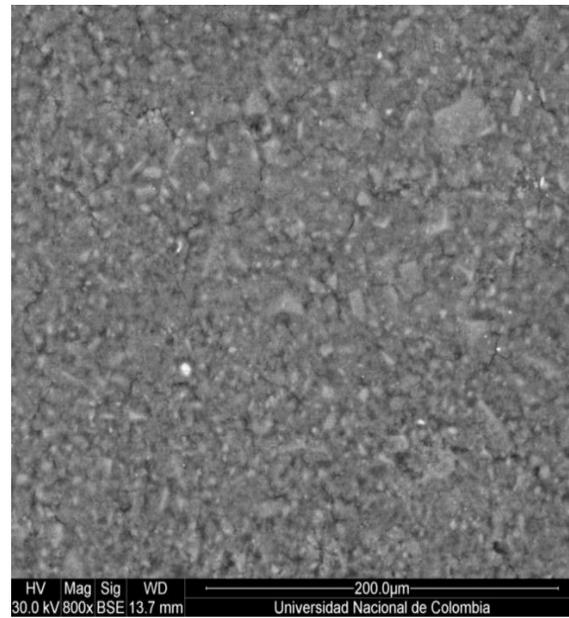
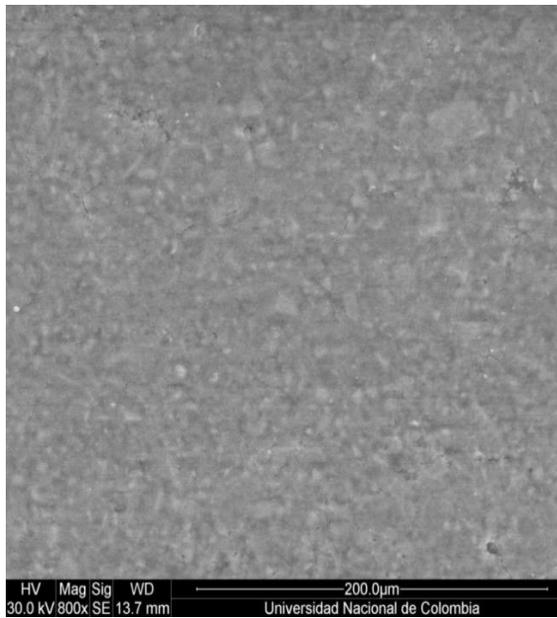
### Pasta 3 horas



## ACTIVACIÓN NAOH 6%

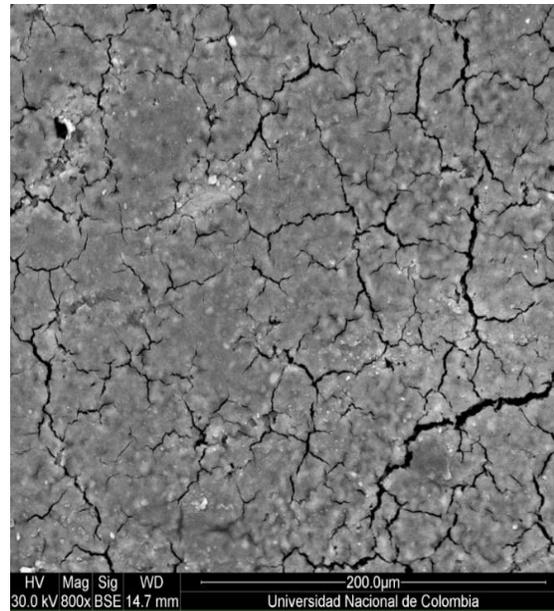
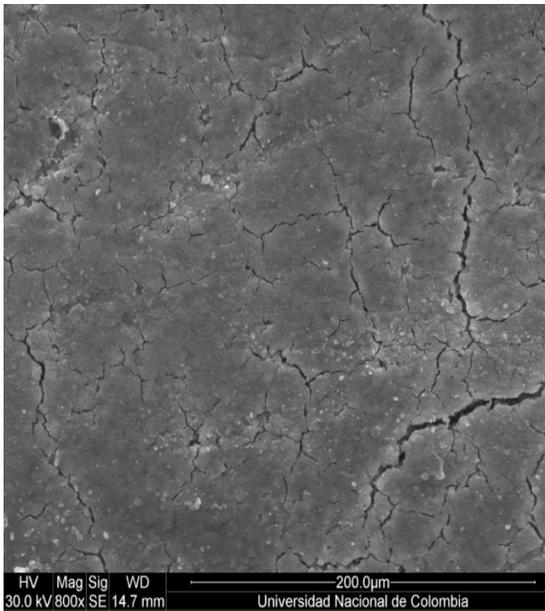
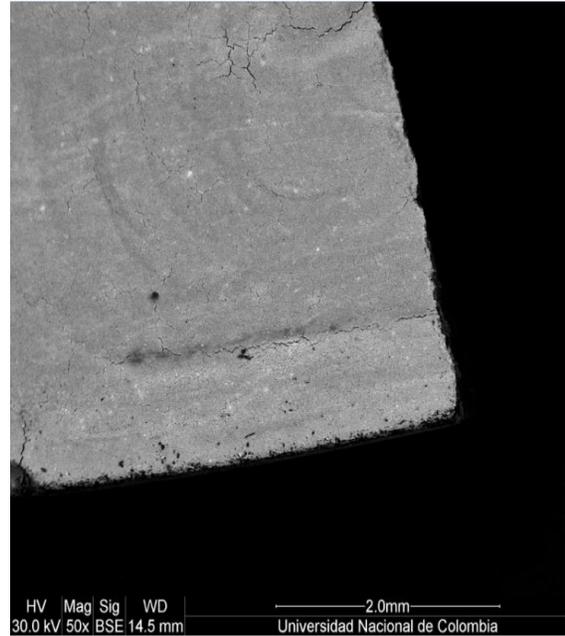
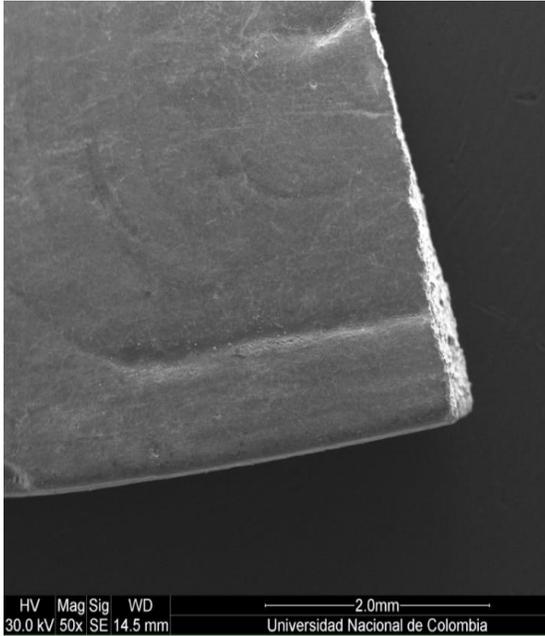
### Pasta 1 día

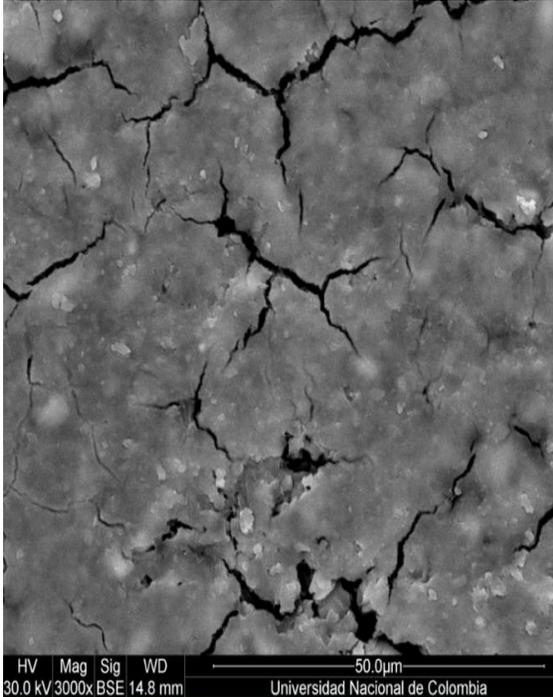
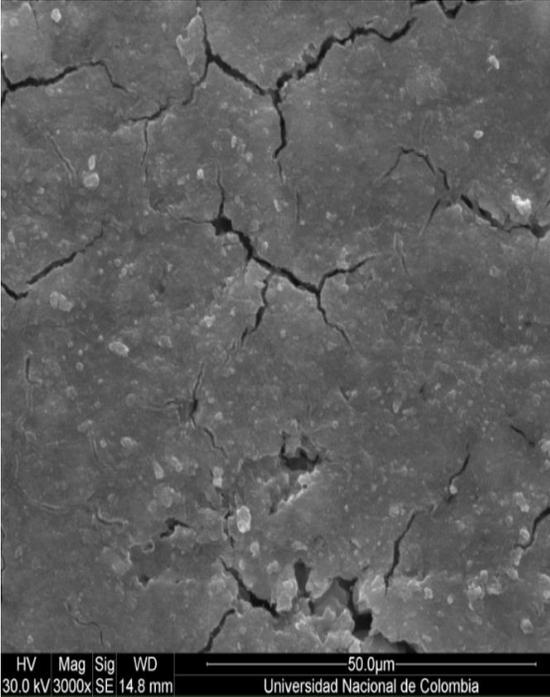


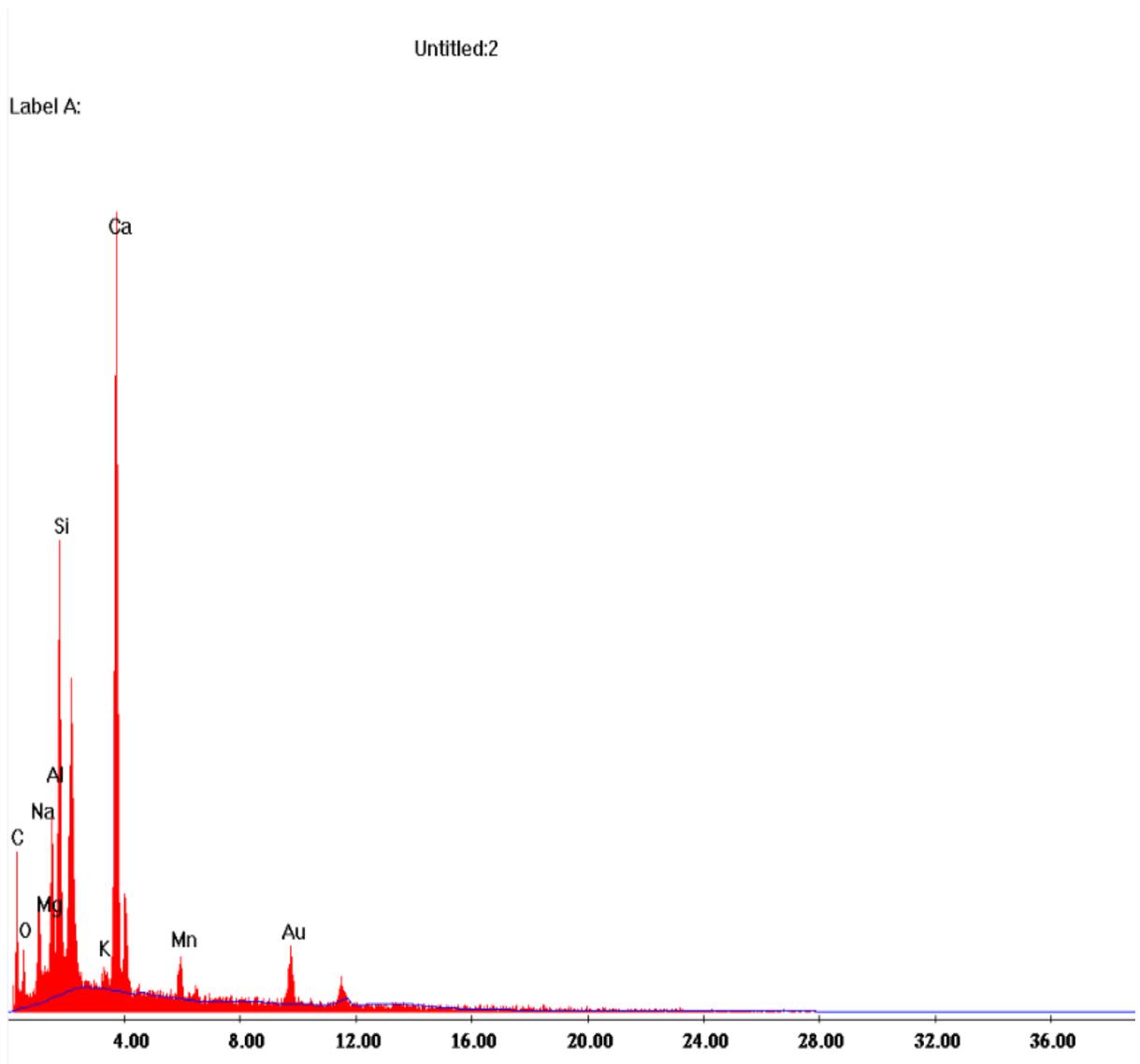


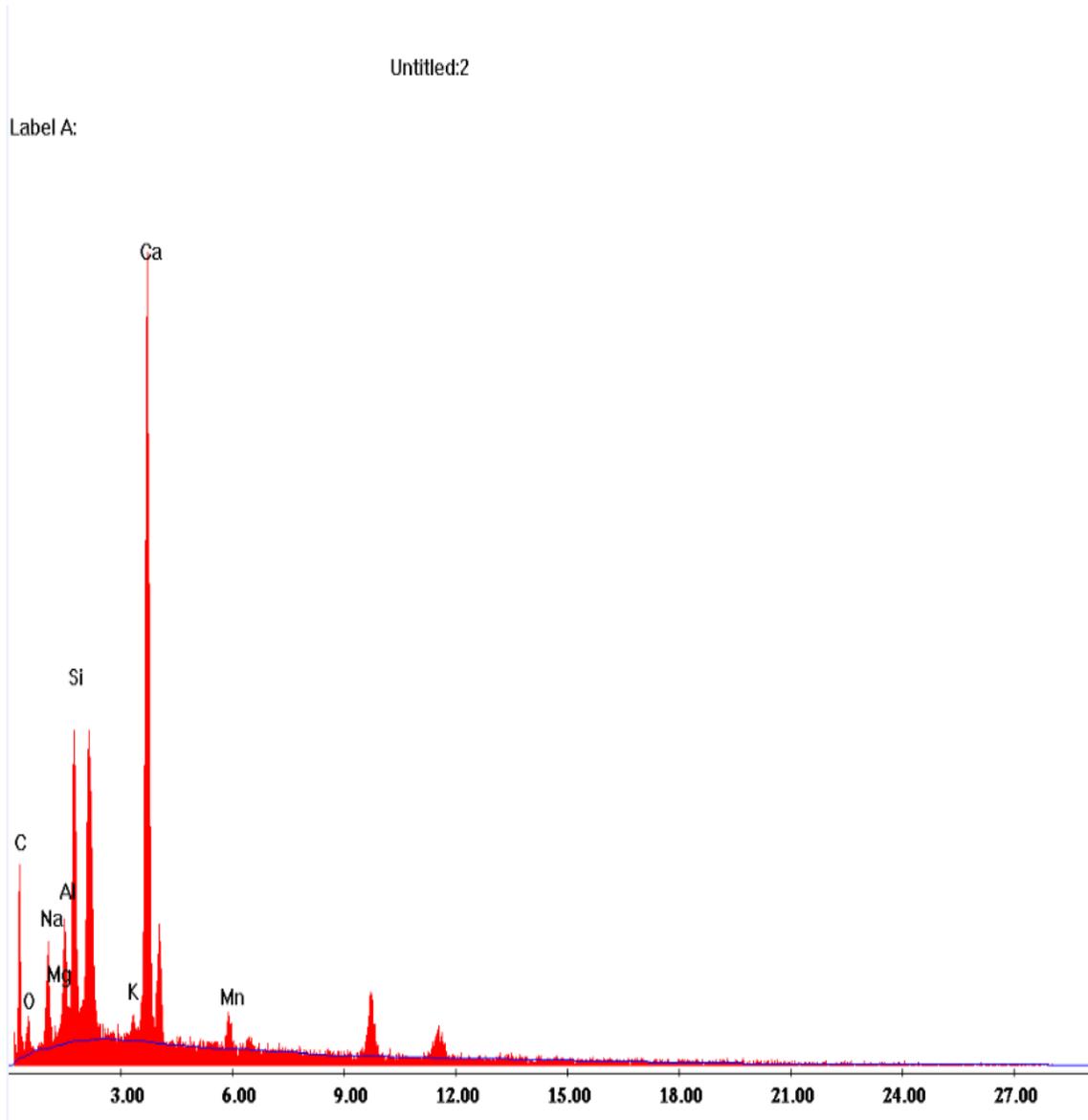
**ACTIVACIÓN NAOH 6% (ANÁLISIS DE PUNTOS)**

**Pasta 3 días**



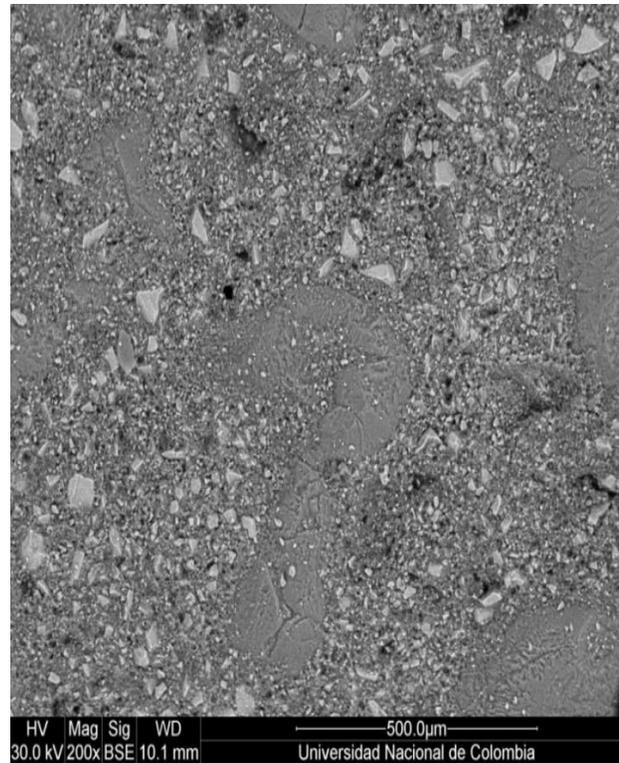


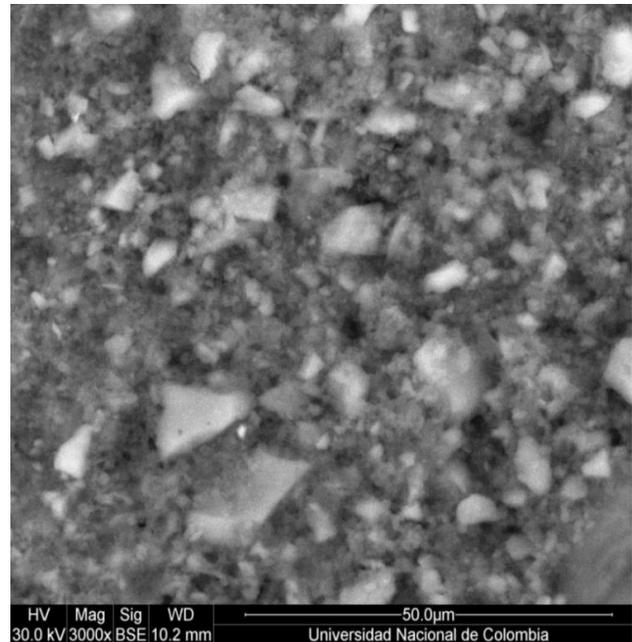
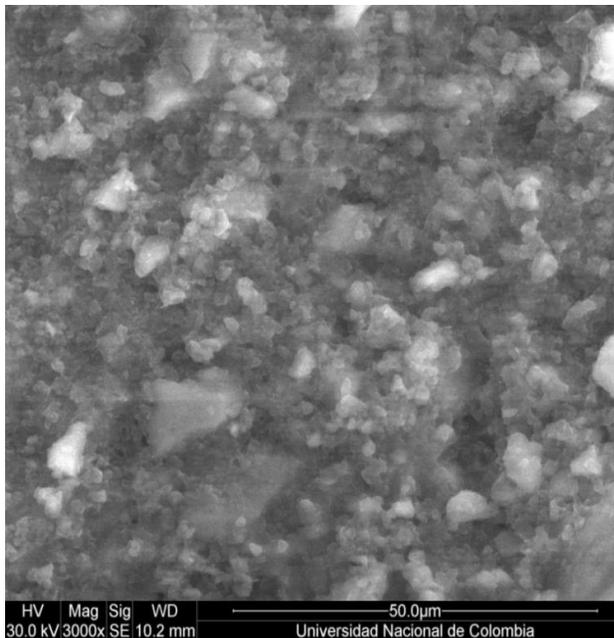
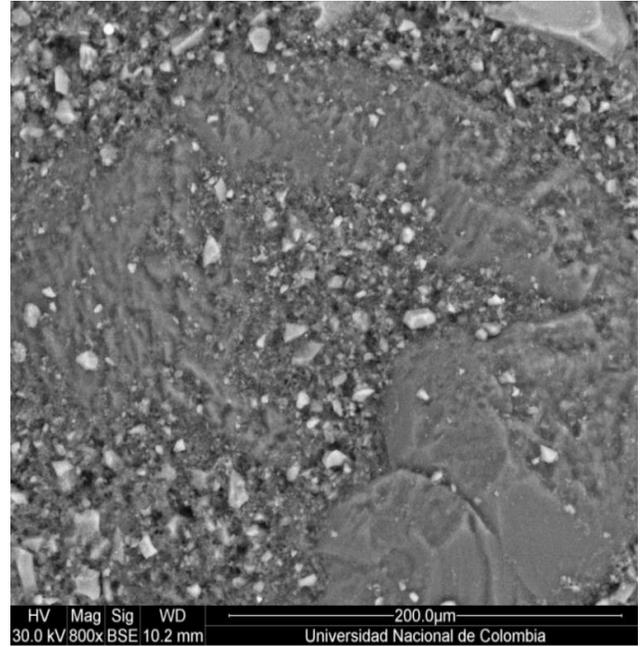
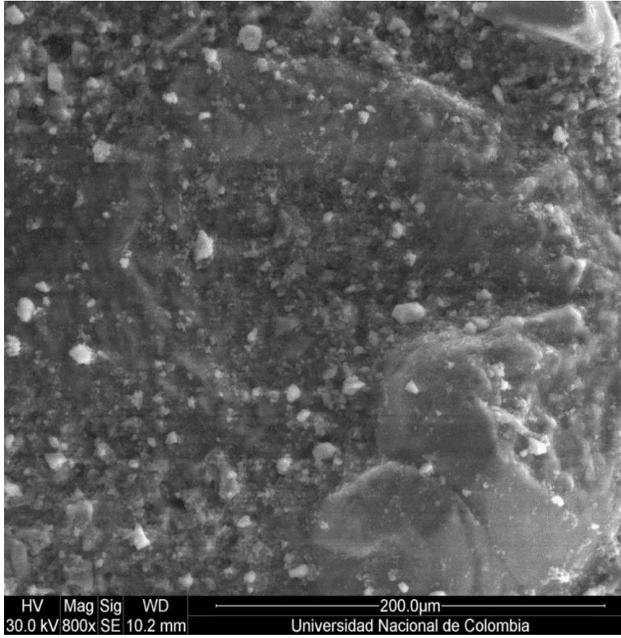




## ACTIVACIÓN NAOH 6%

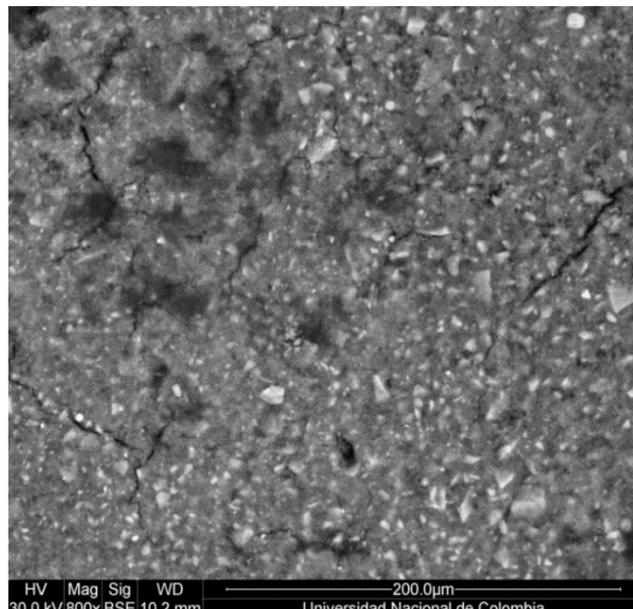
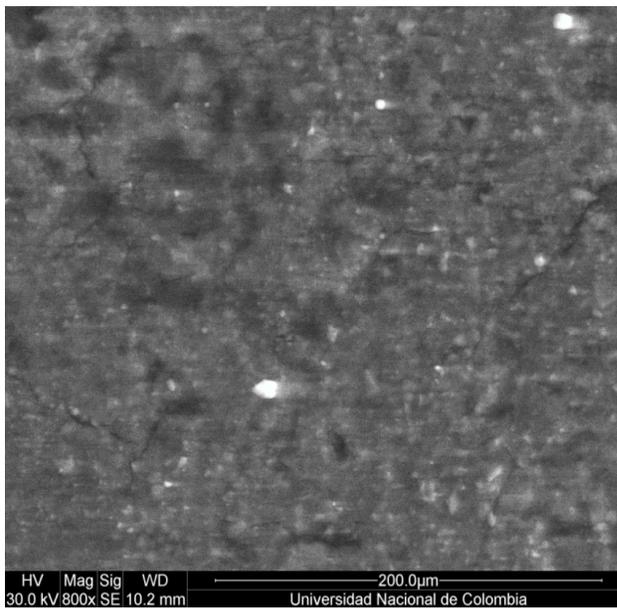
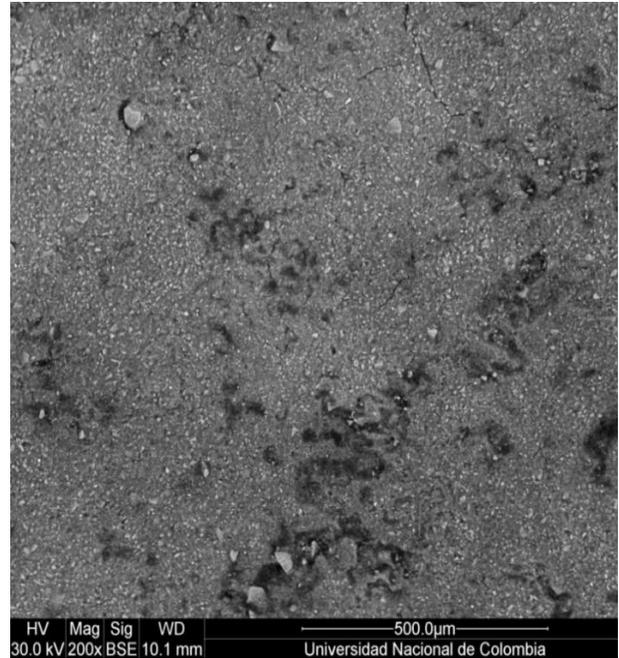
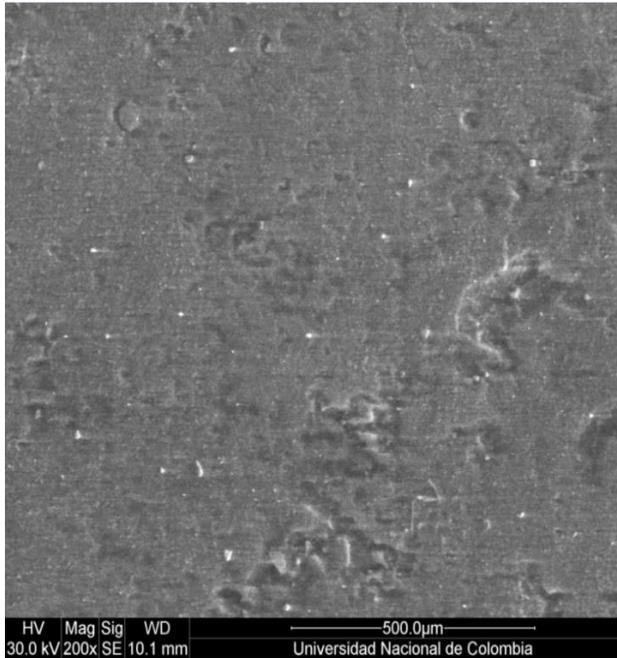
### Mortero 3 horas

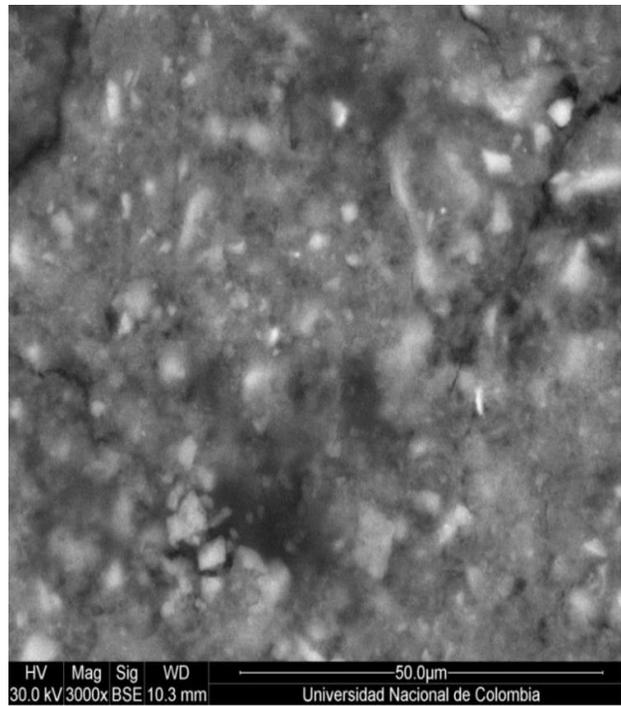
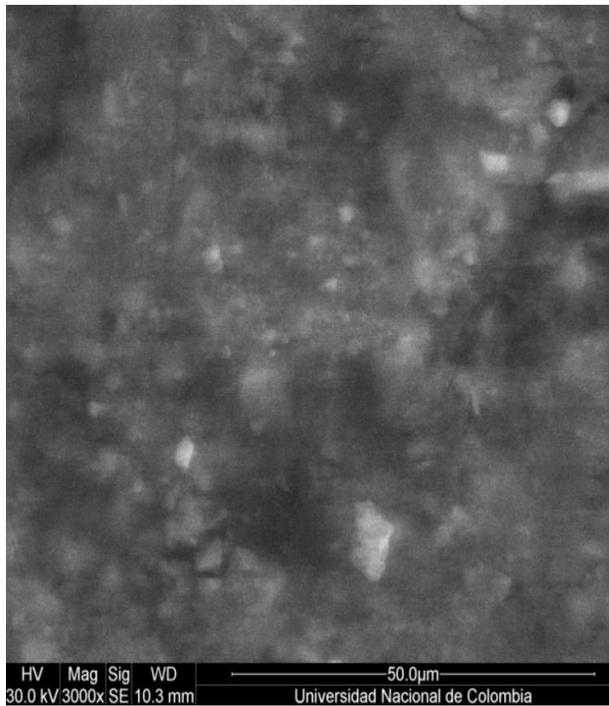




## ACTIVACIÓN NAOH 6%

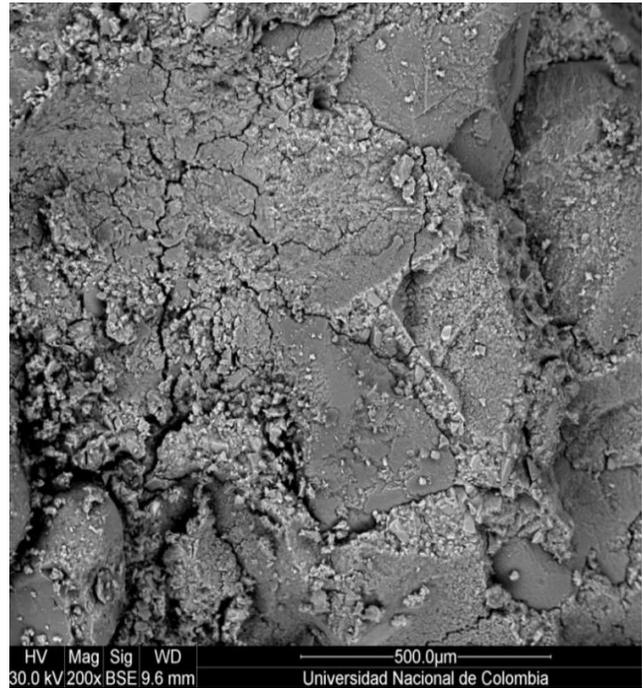
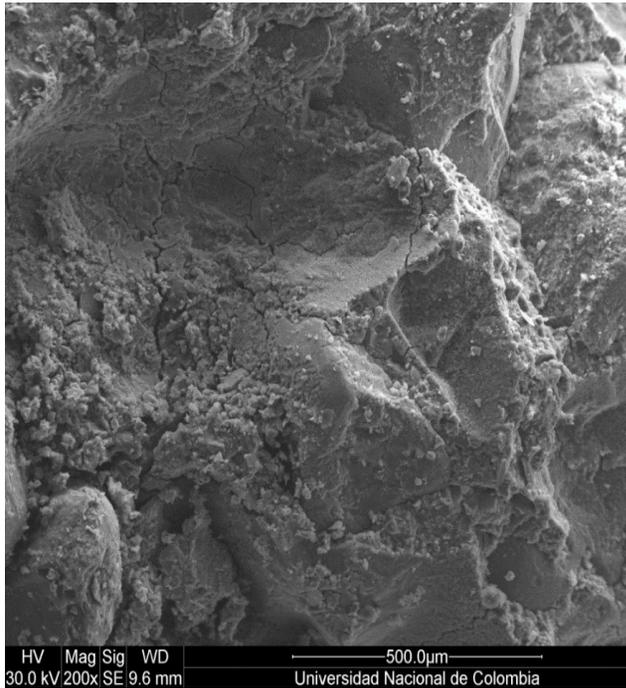
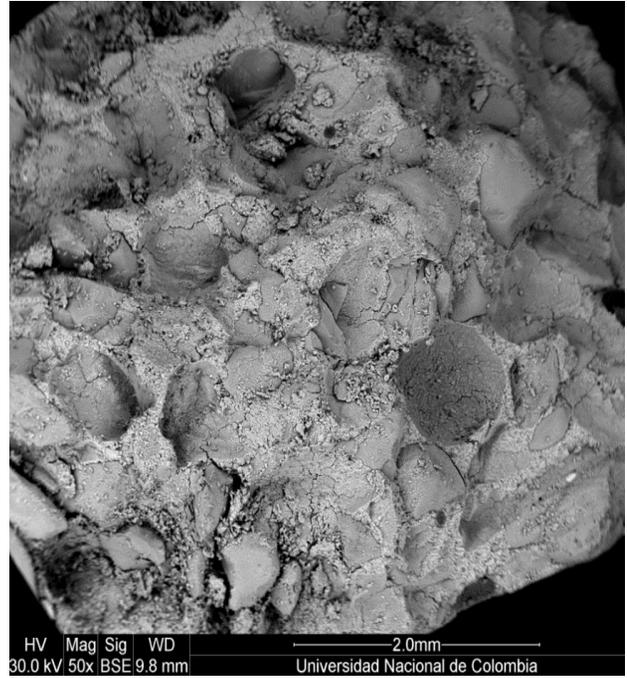
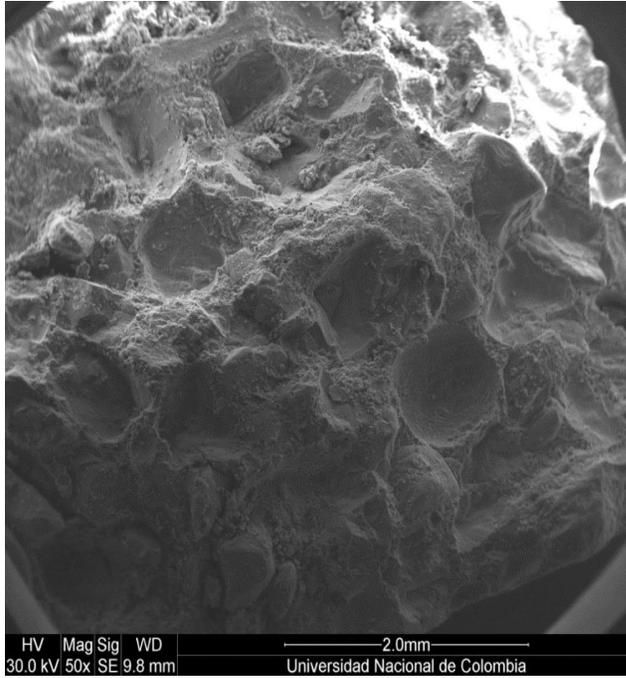
### Mortero 1 día

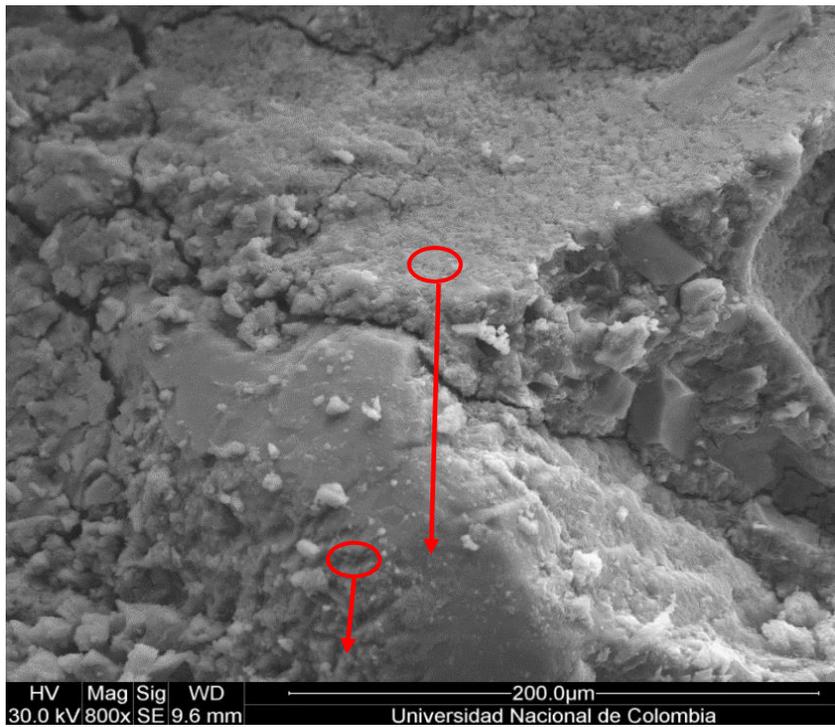
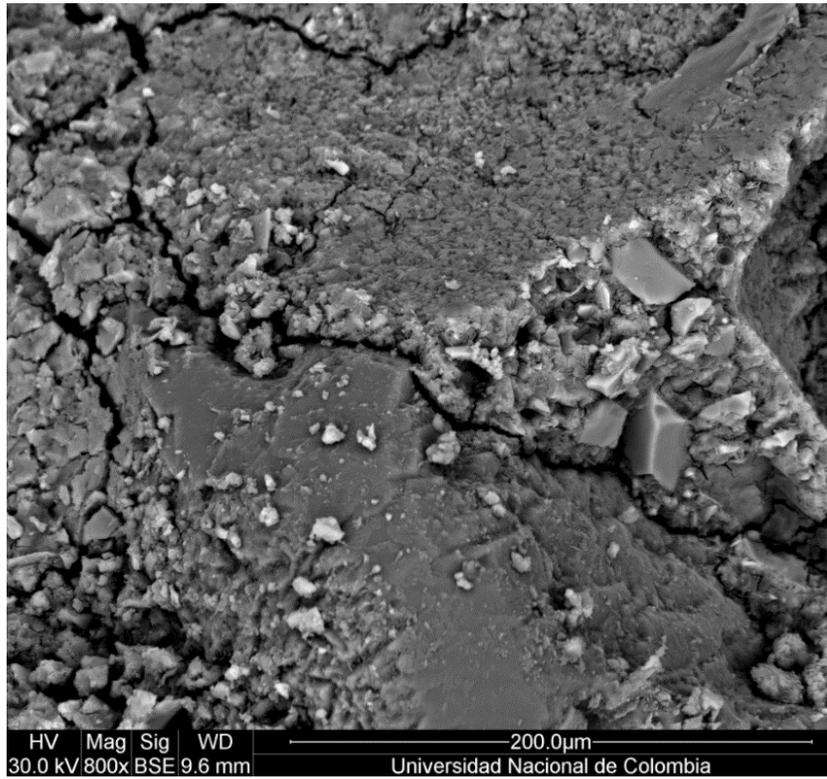




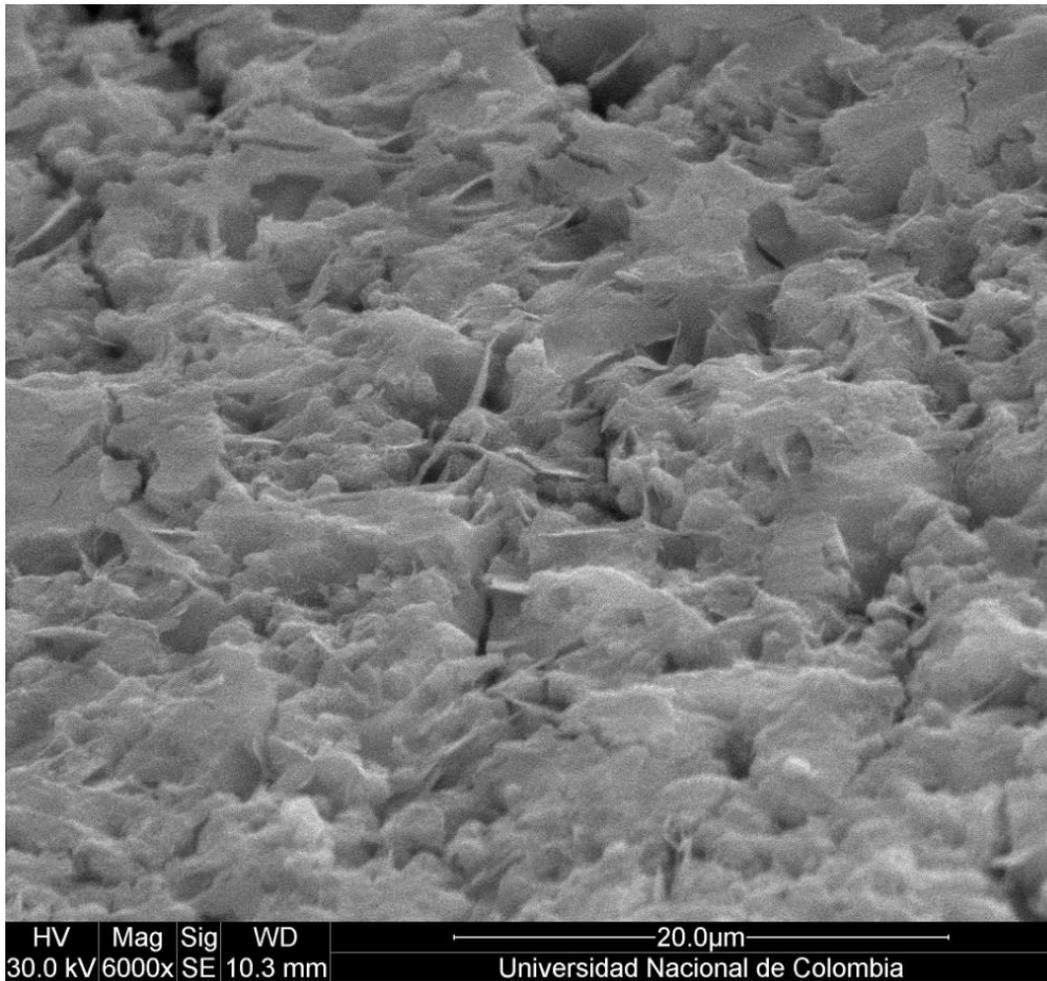
## ACTIVACIÓN NAOH 6%

### Mortero 3 días



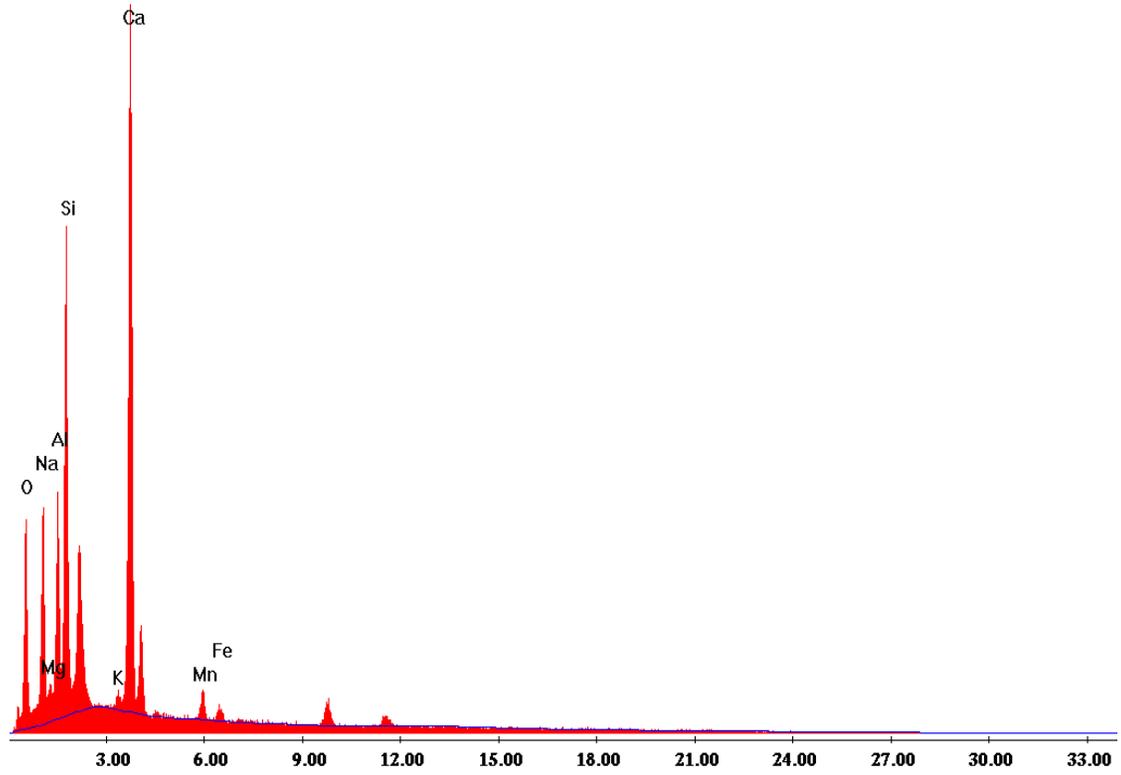


**Punto A**

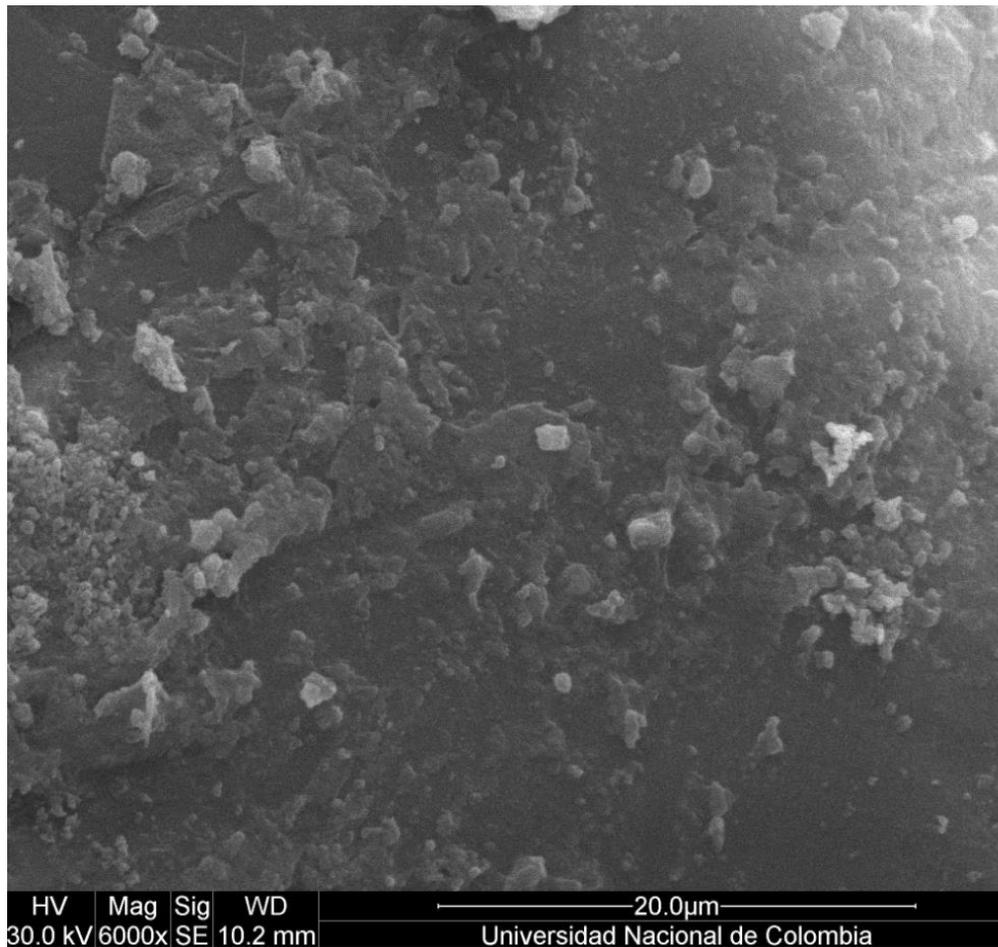


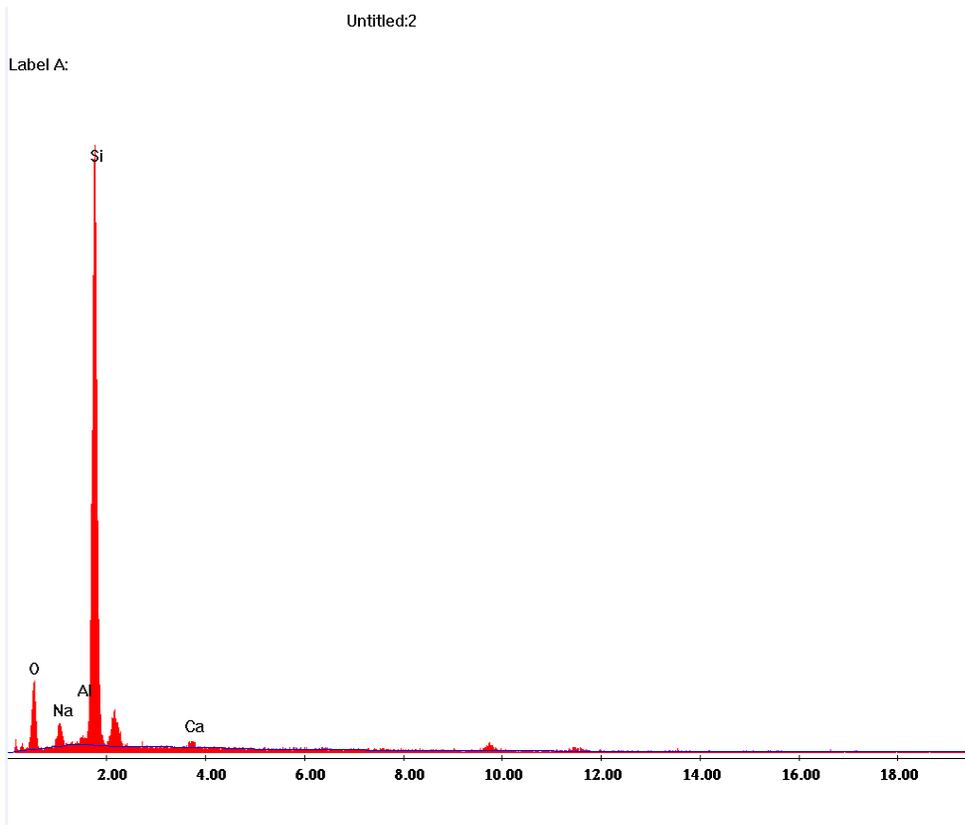
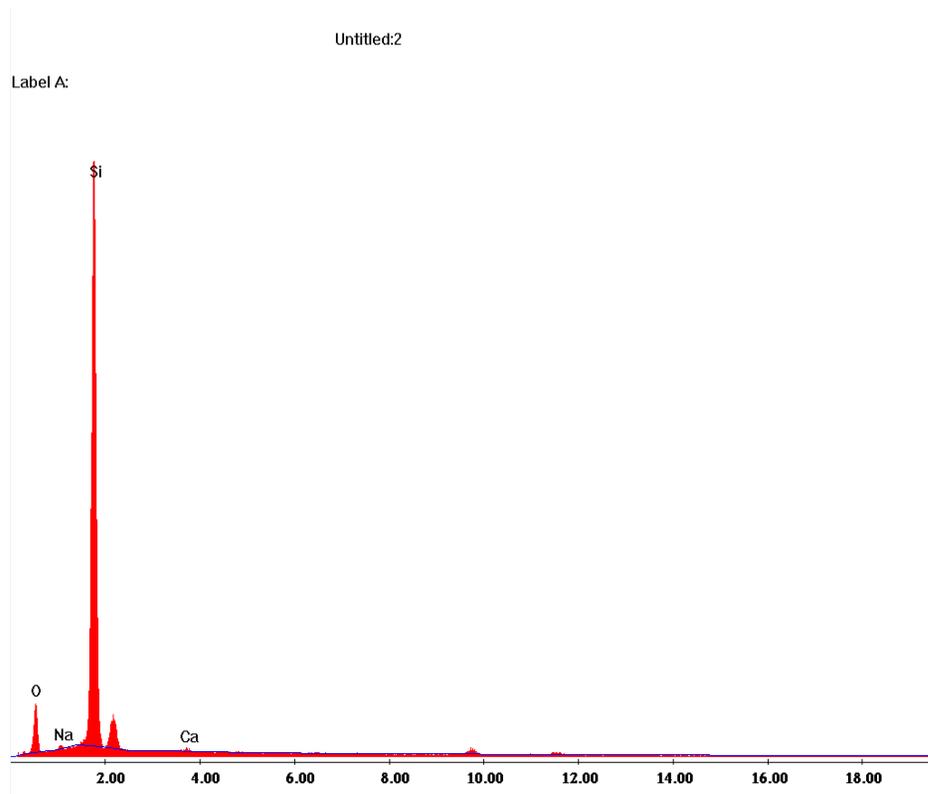
Untitled:2

Label A:



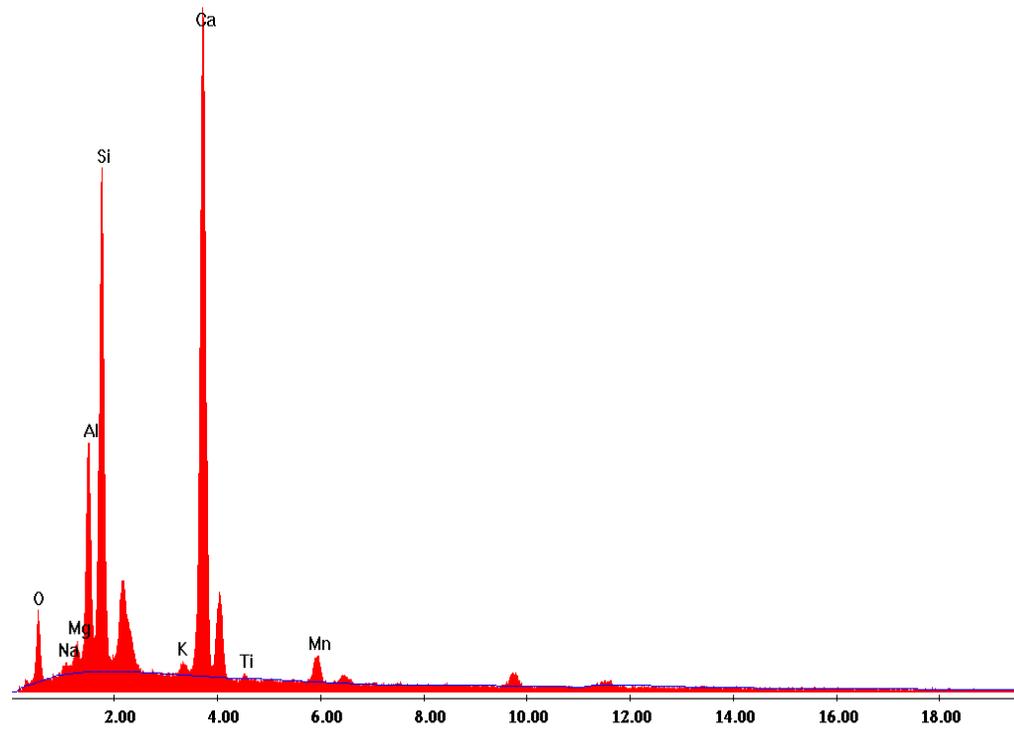
**PUNTO B**



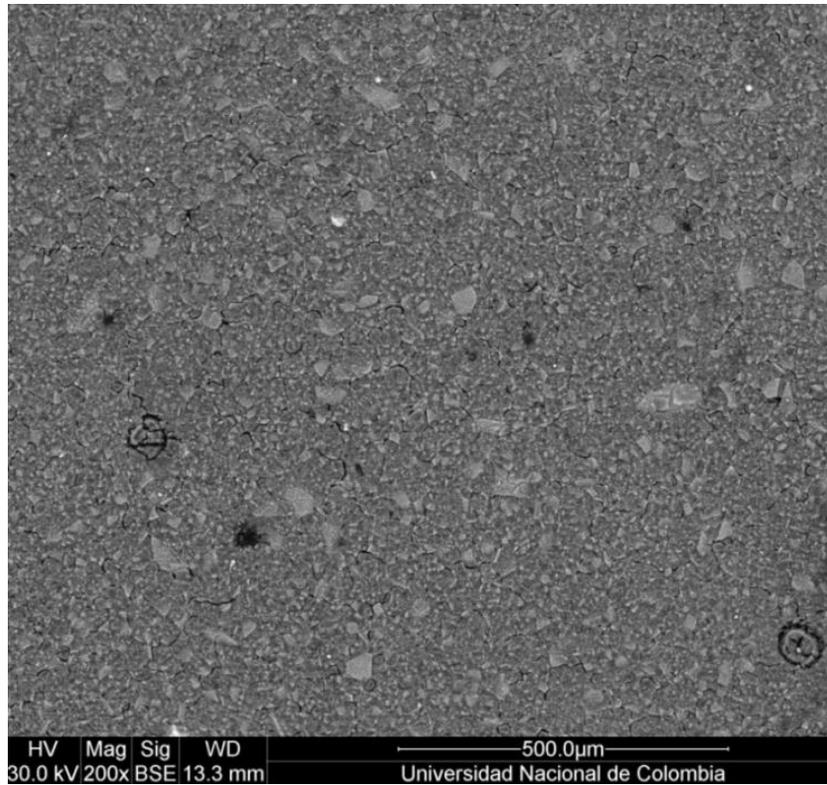


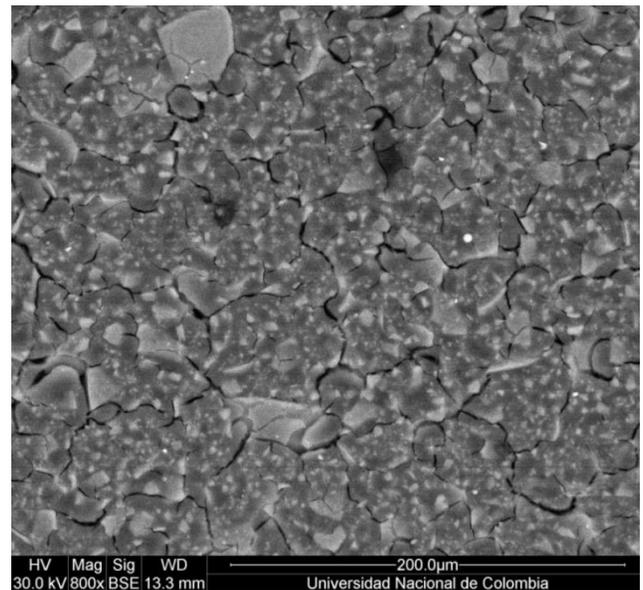
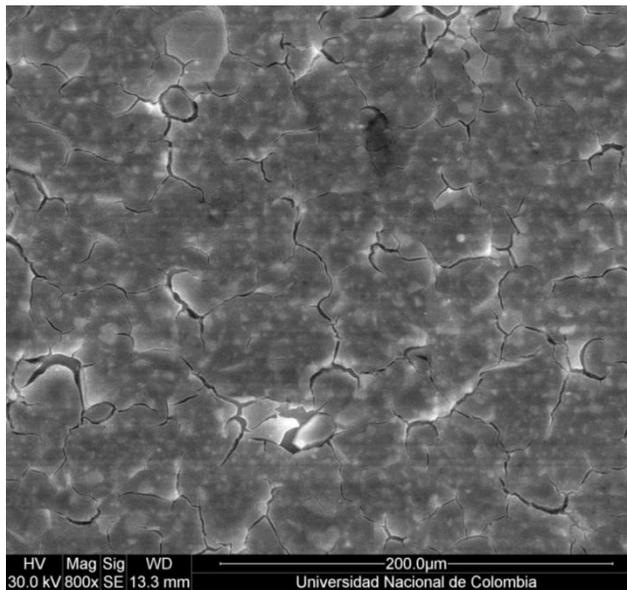
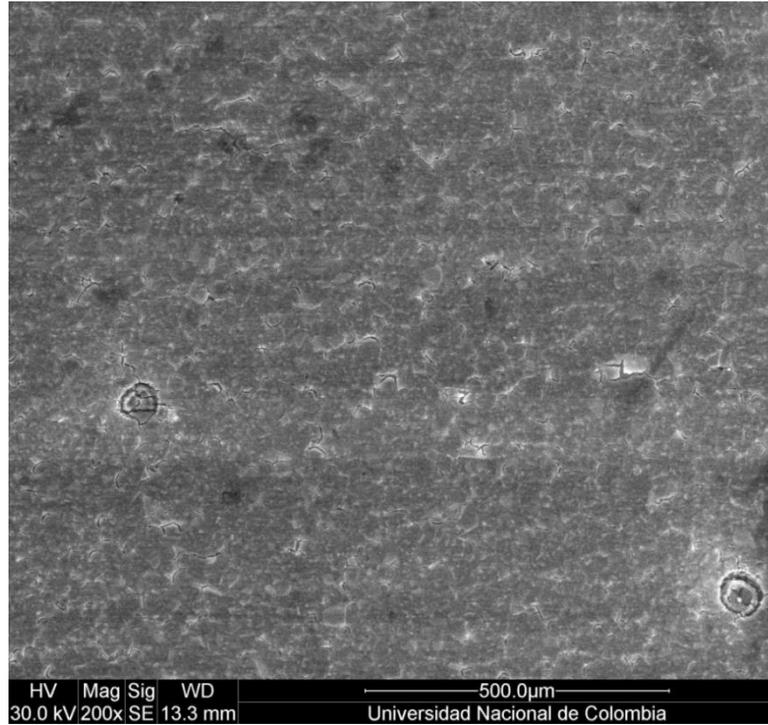
Untitled:2

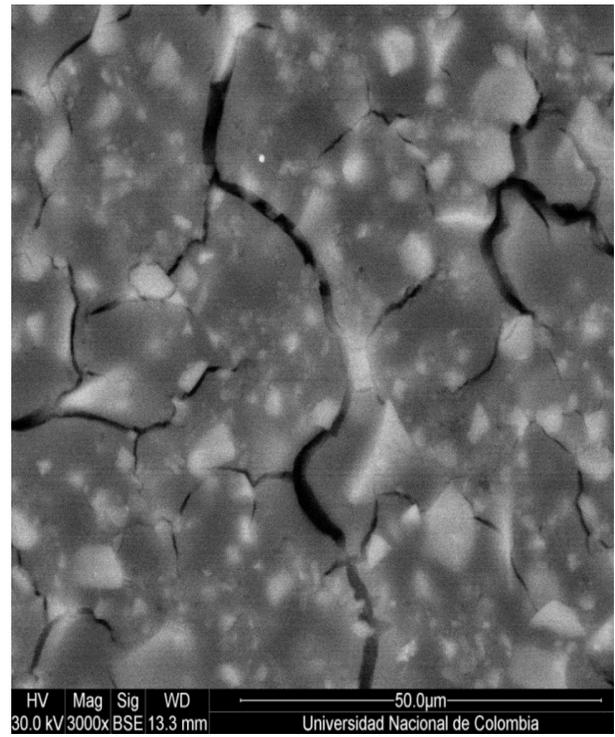
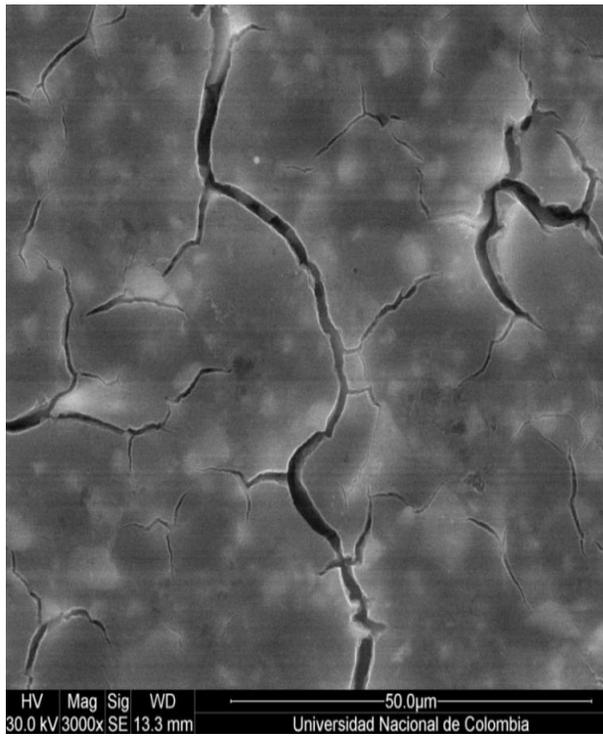
Label A:



**Pastas 3 horas**

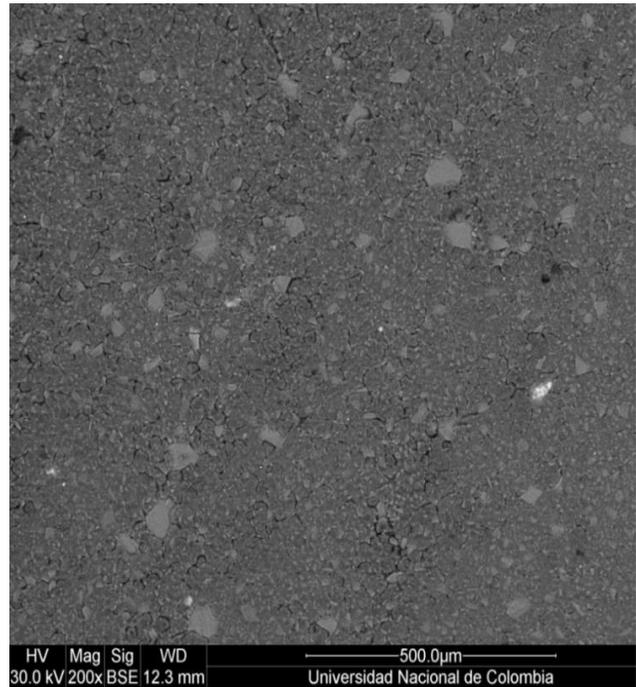
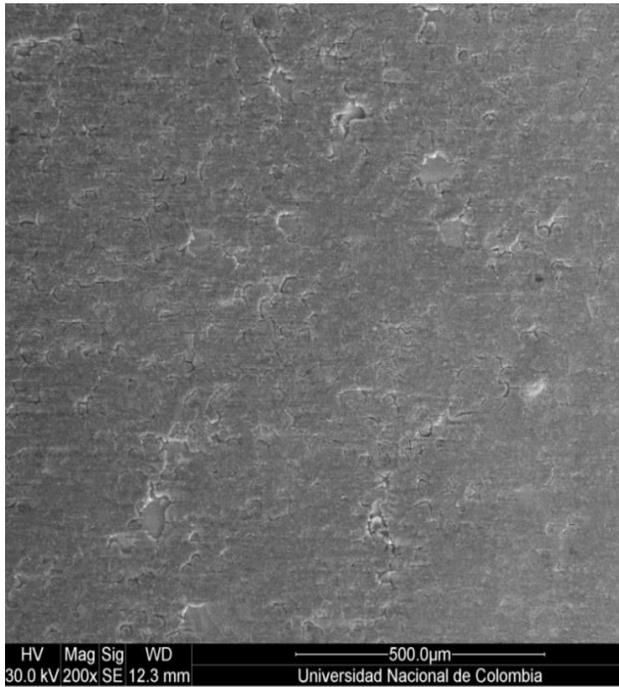


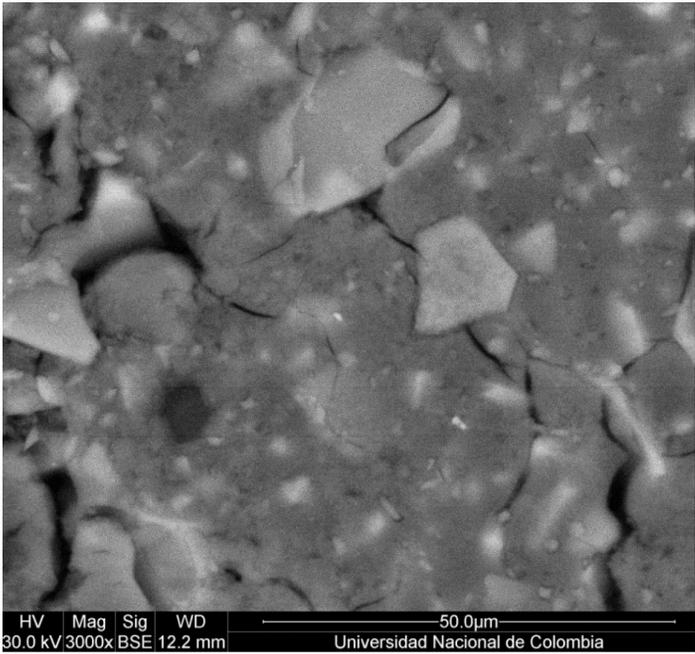
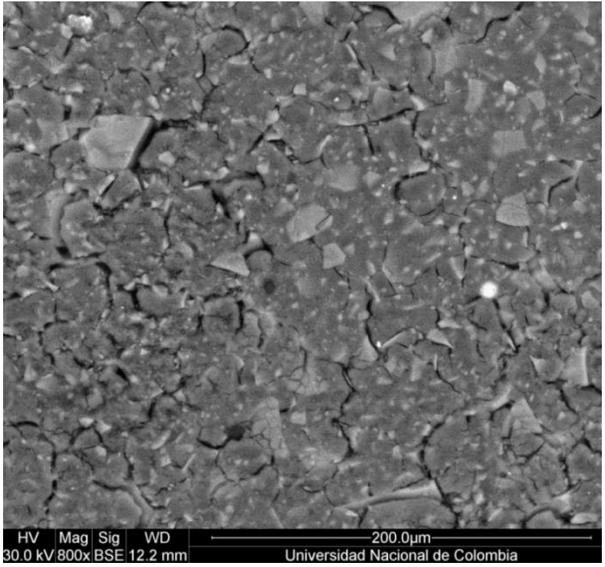
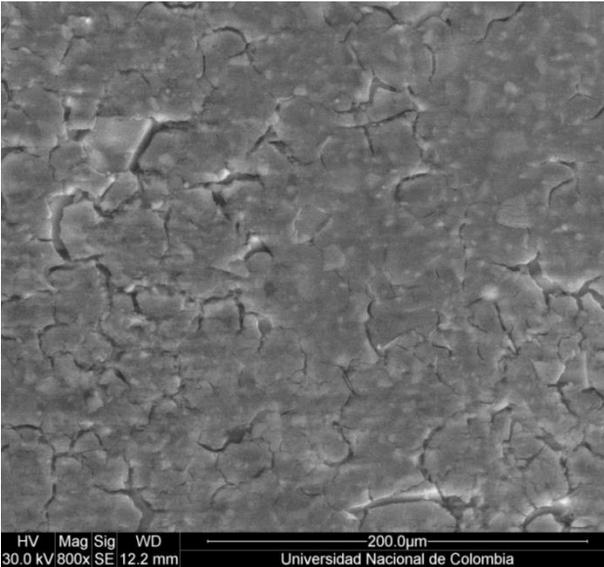




**ACTIVACIÓN  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  T=50°**

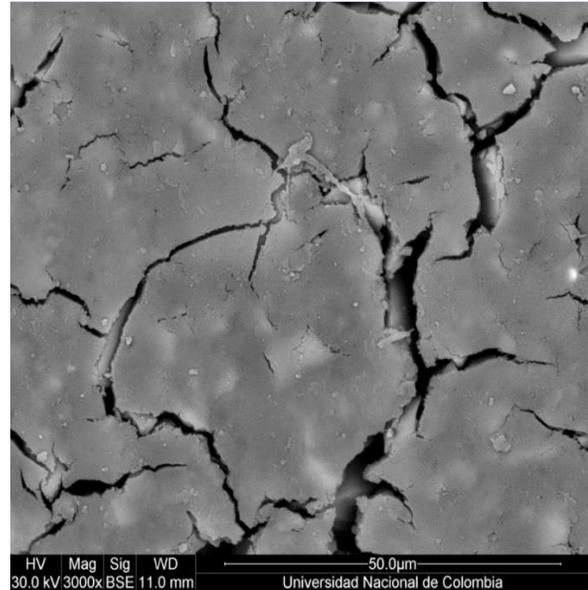
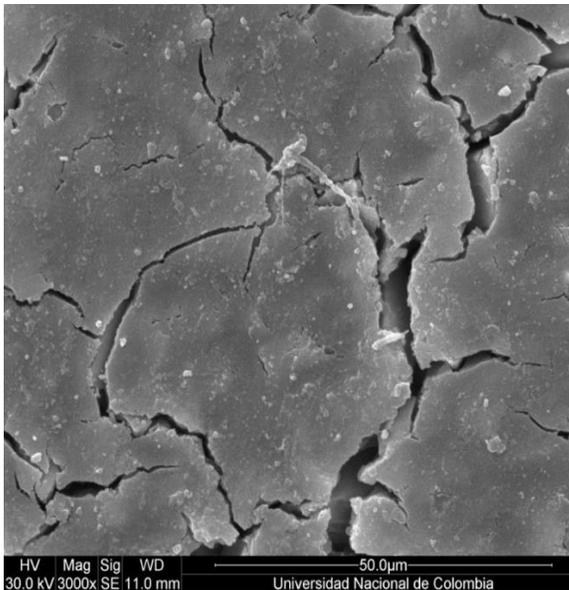
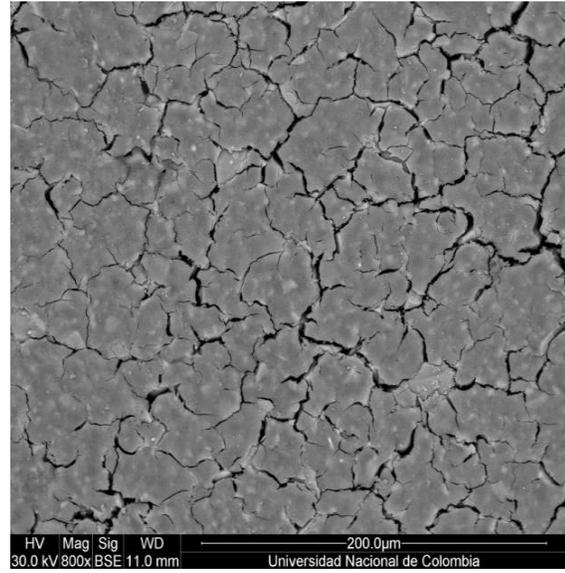
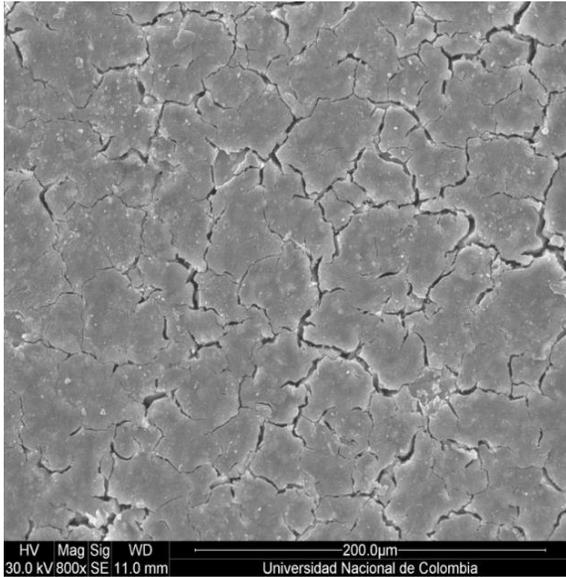
**Pastas 1 día**

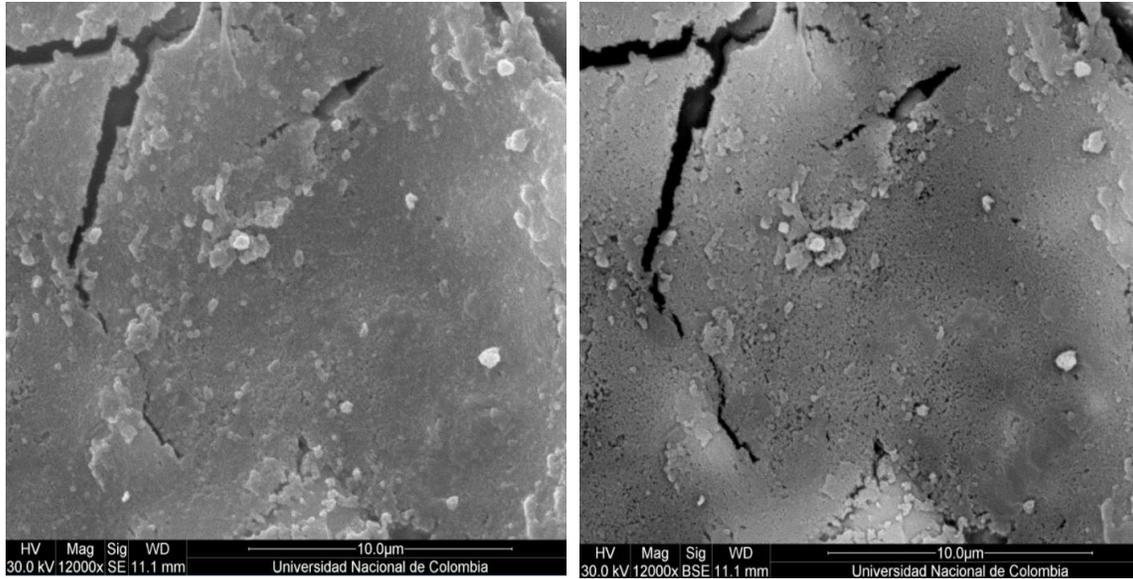




**ACTIVACIÓN  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  T=50°**

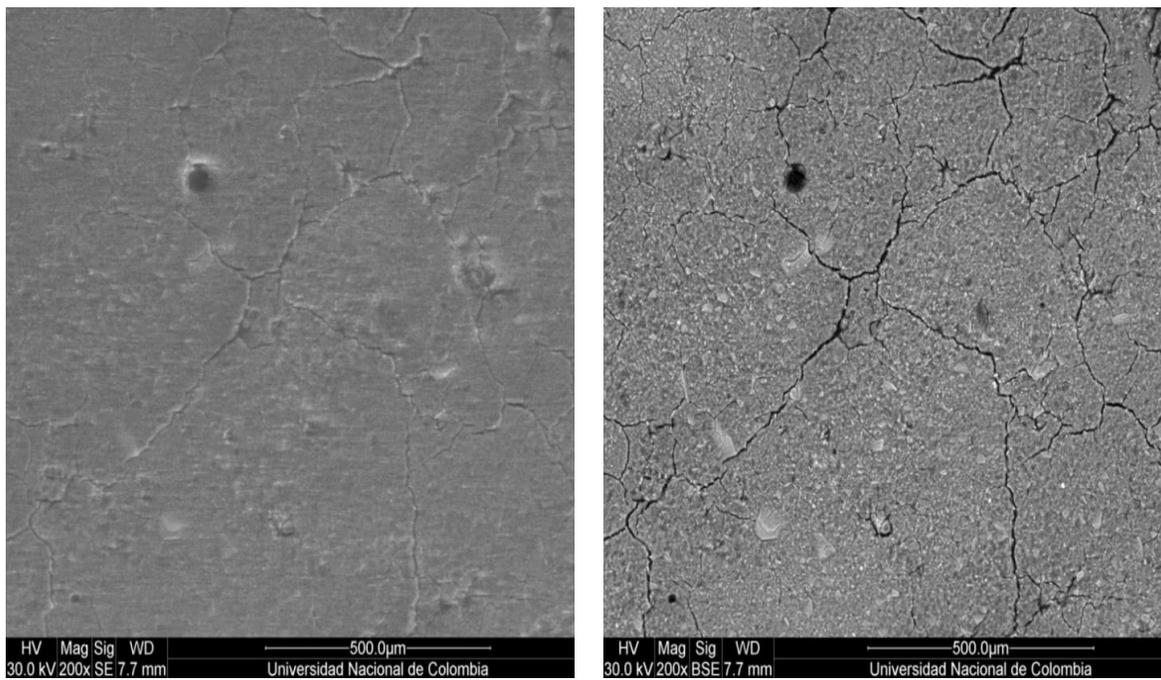
**Pastas 3 días**

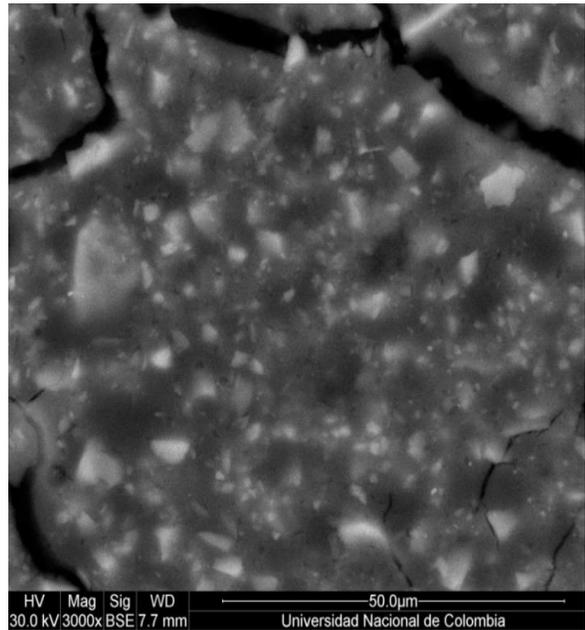
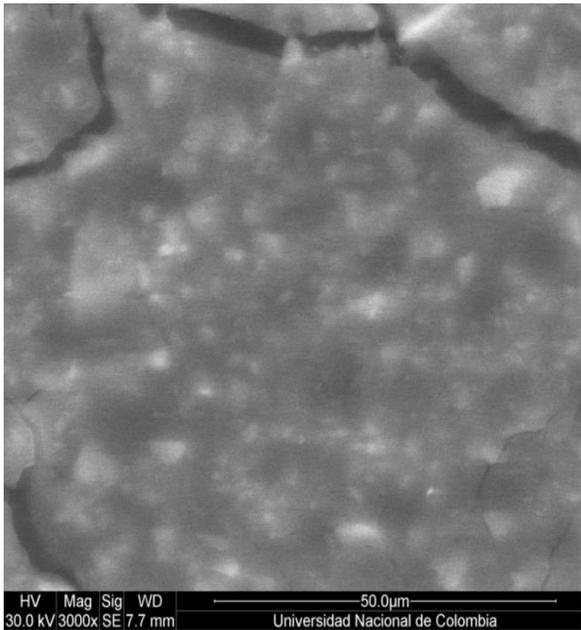
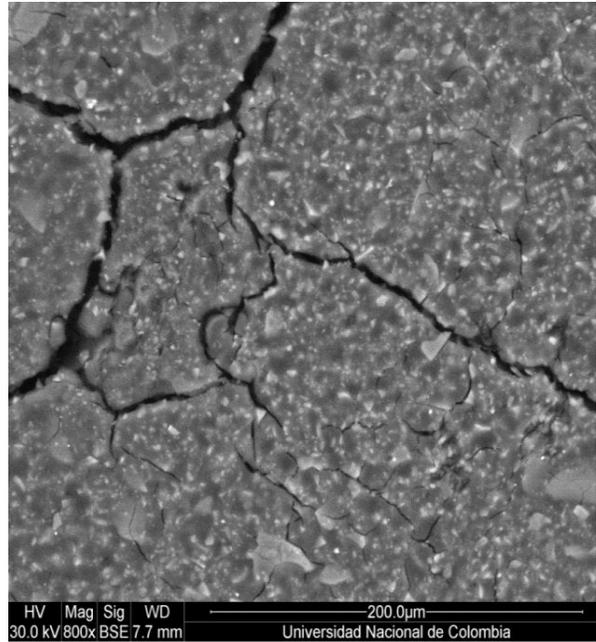
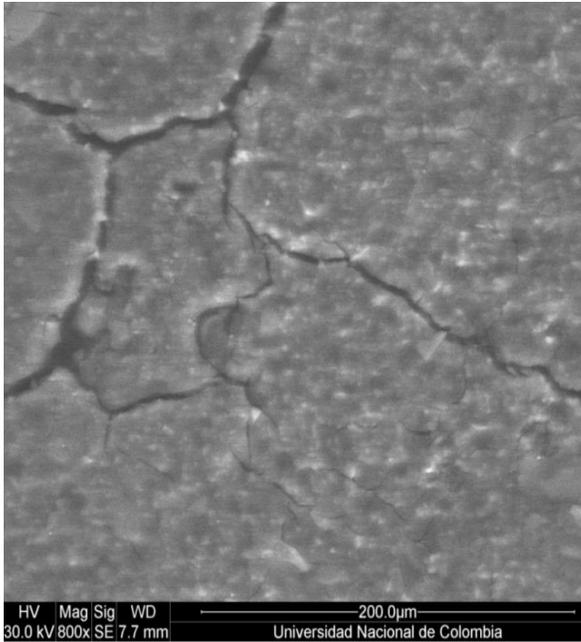




### ACTIVACIÓN $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ T=50°

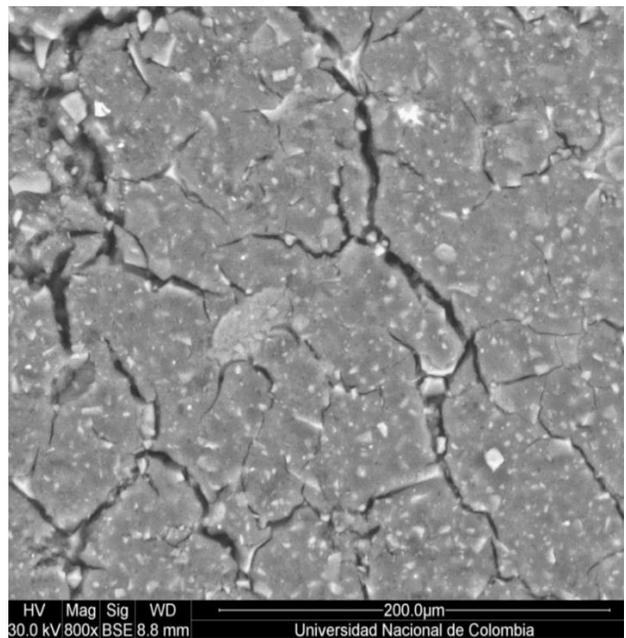
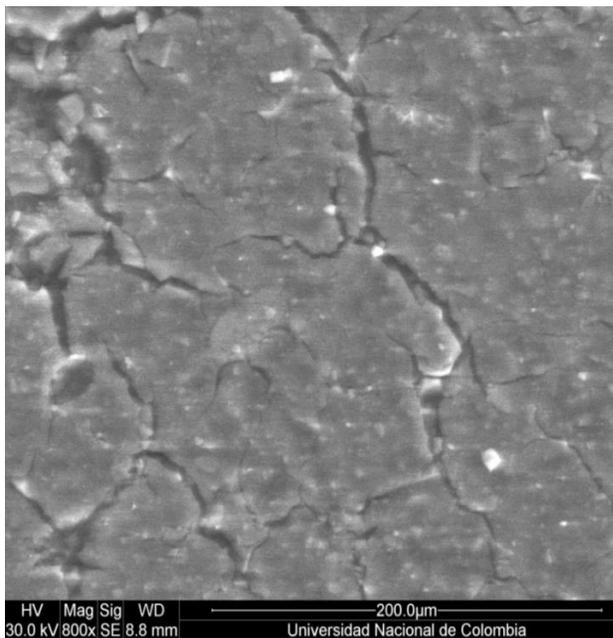
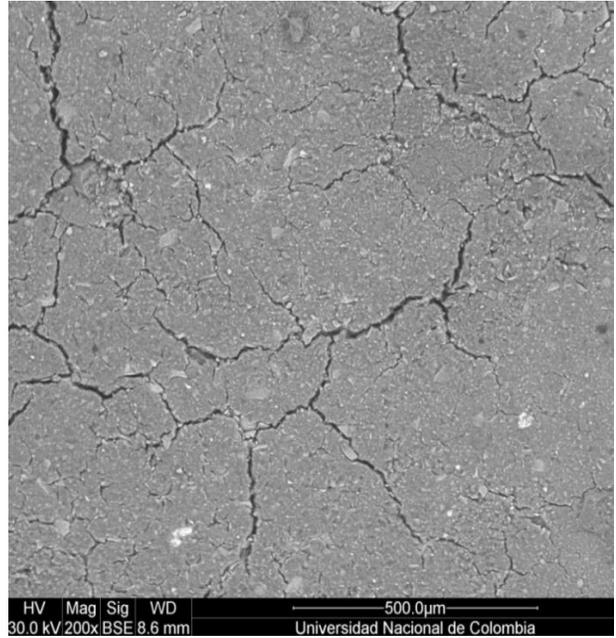
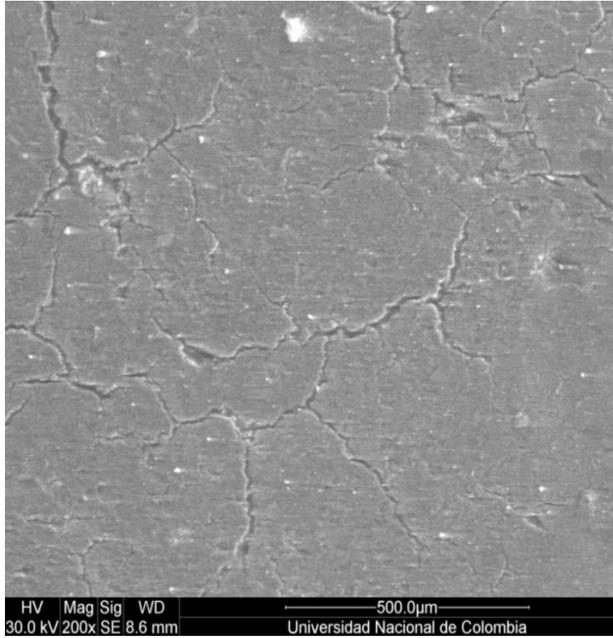
#### Morteros 3 horas

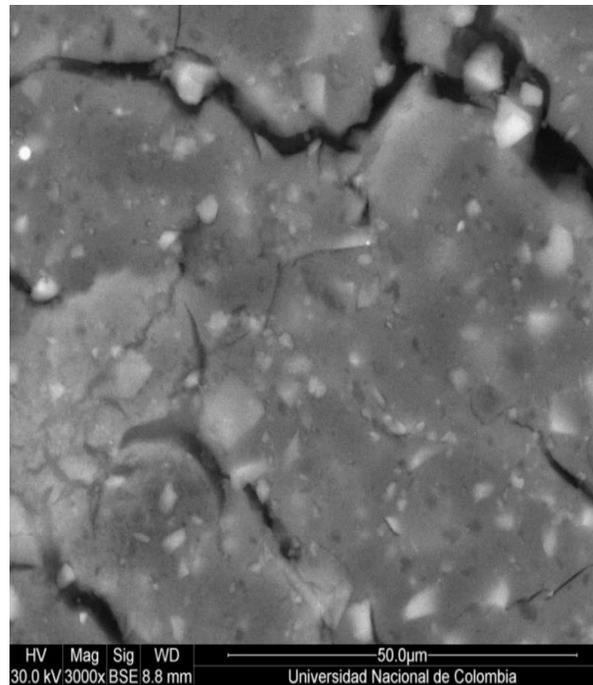
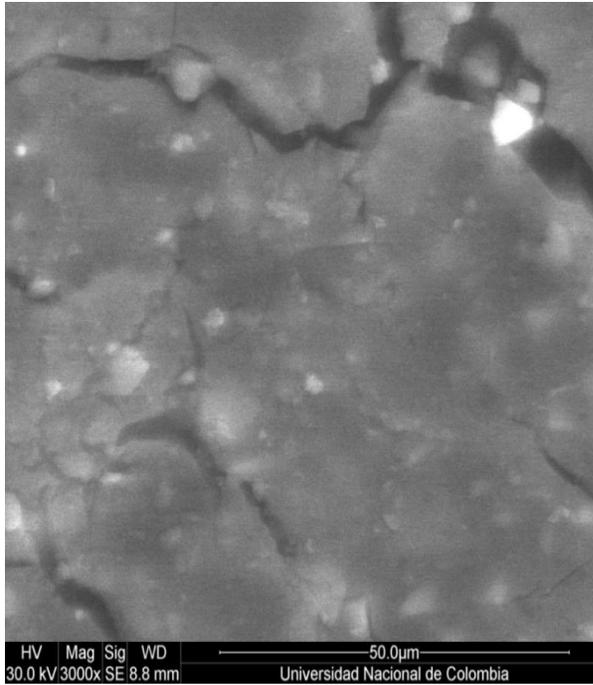




**ACTIVACIÓN  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  T=50°**

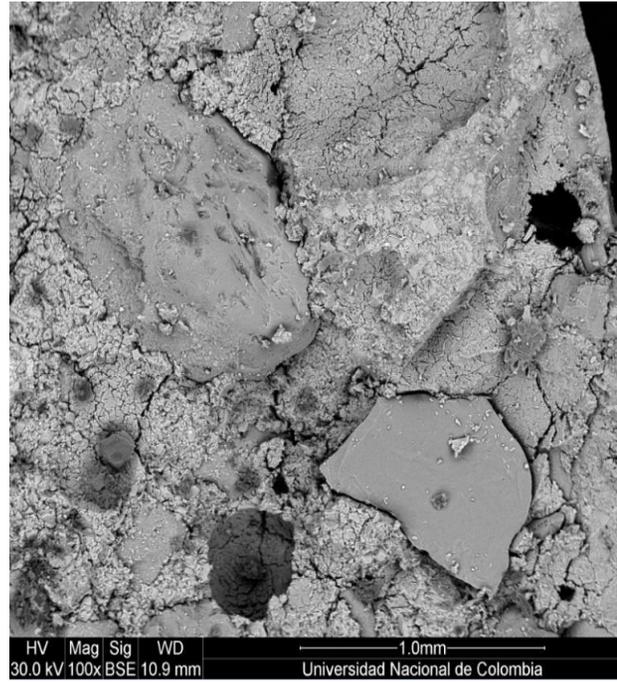
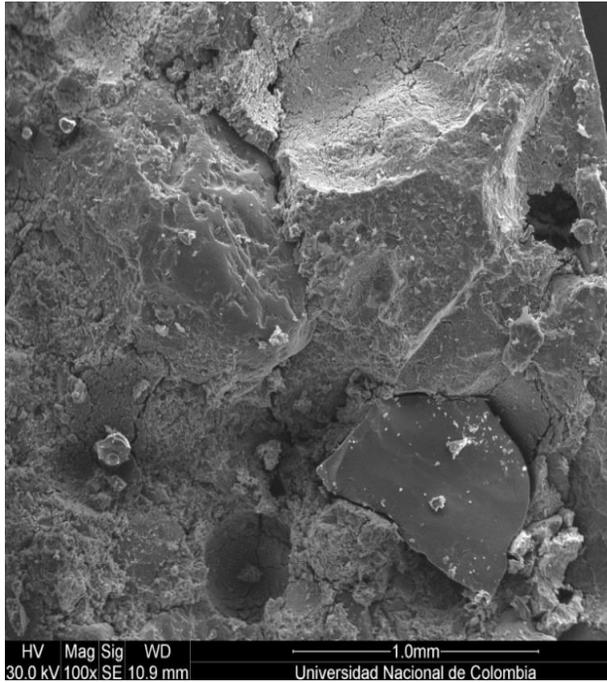
**Mortero 1 día**

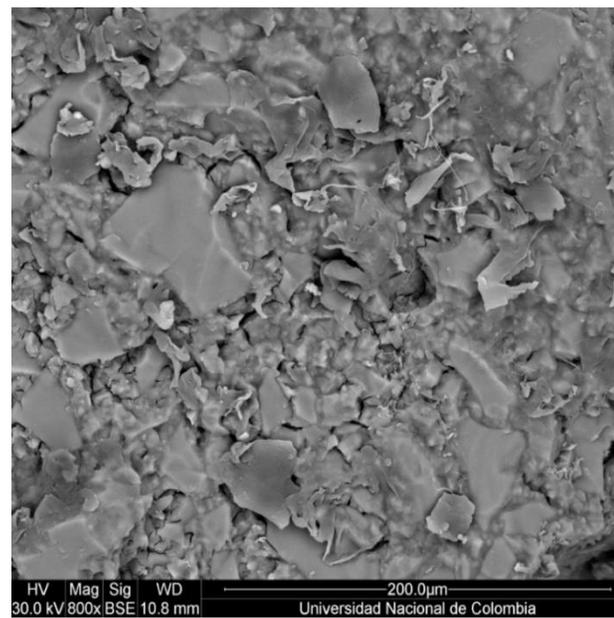
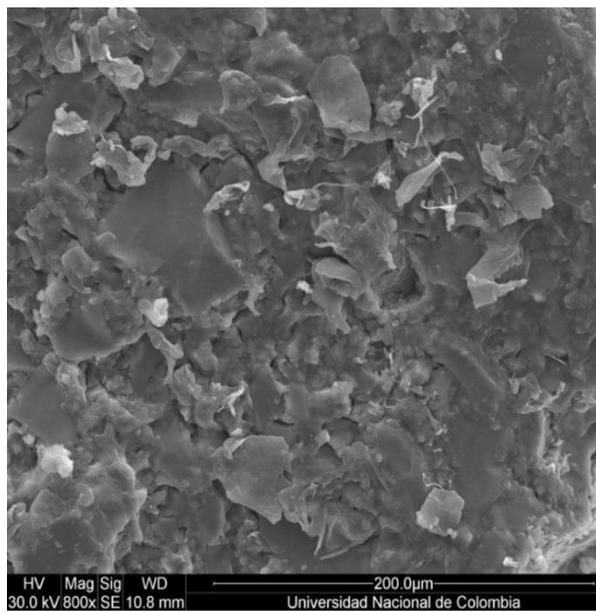
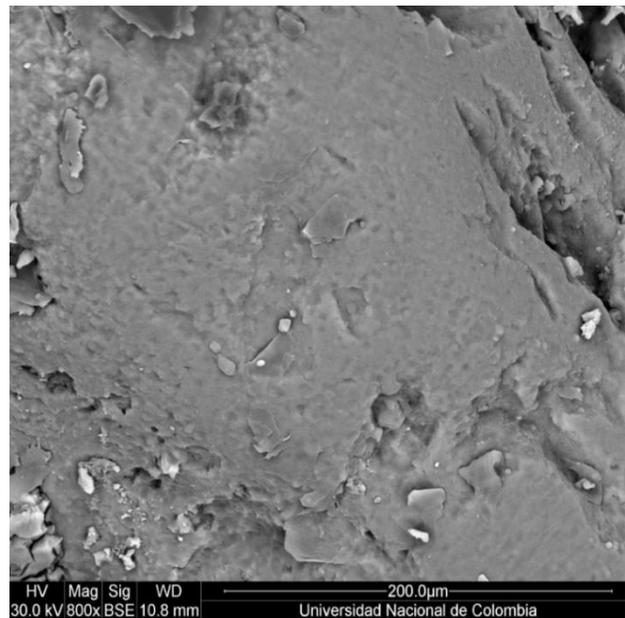
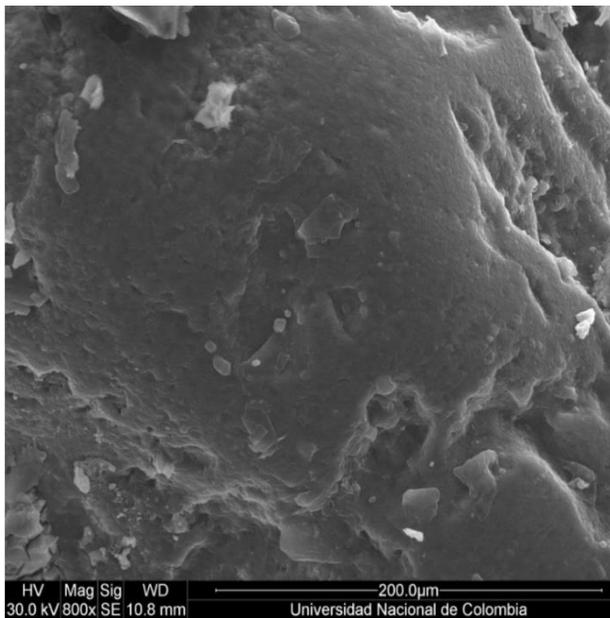


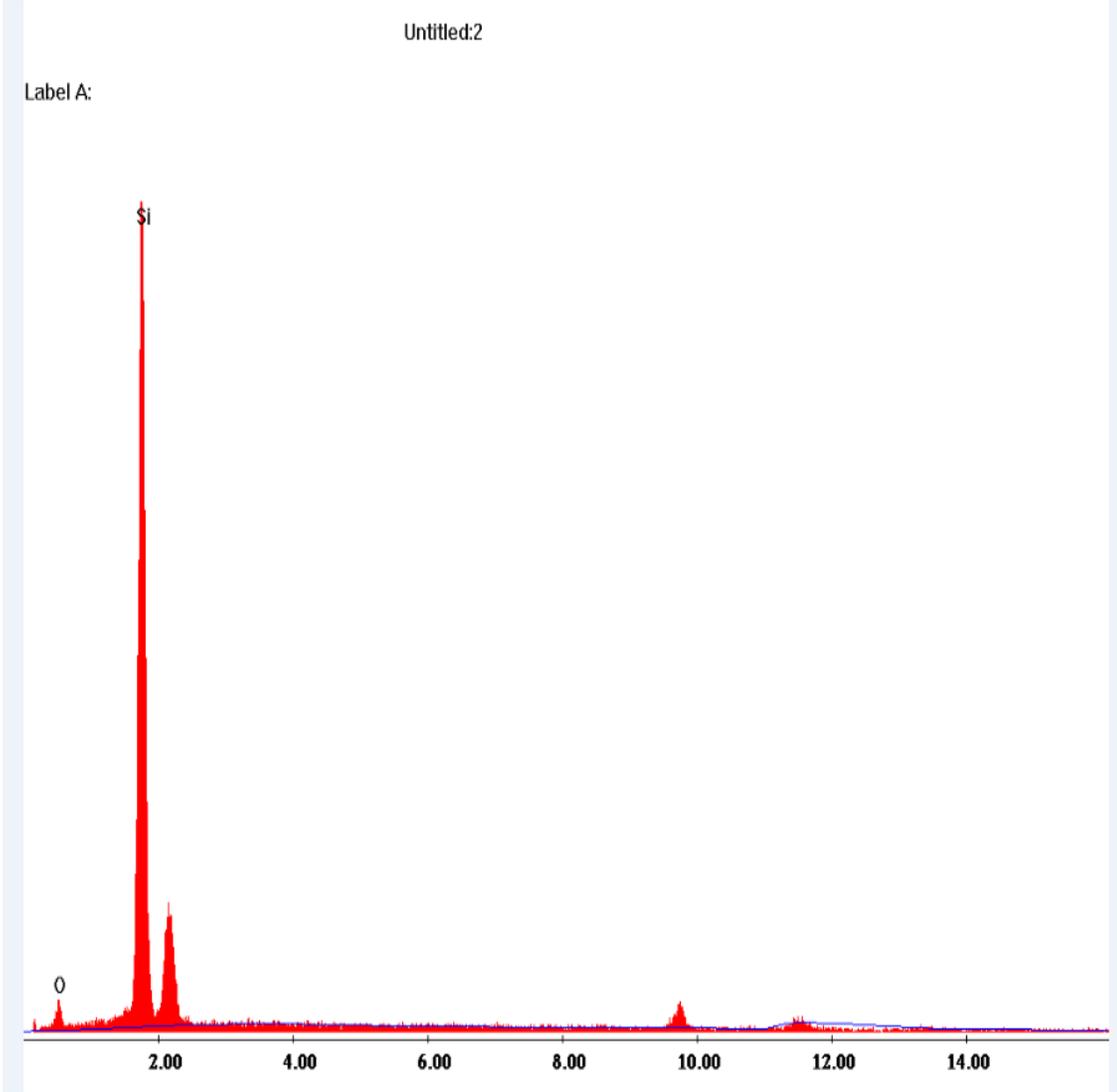


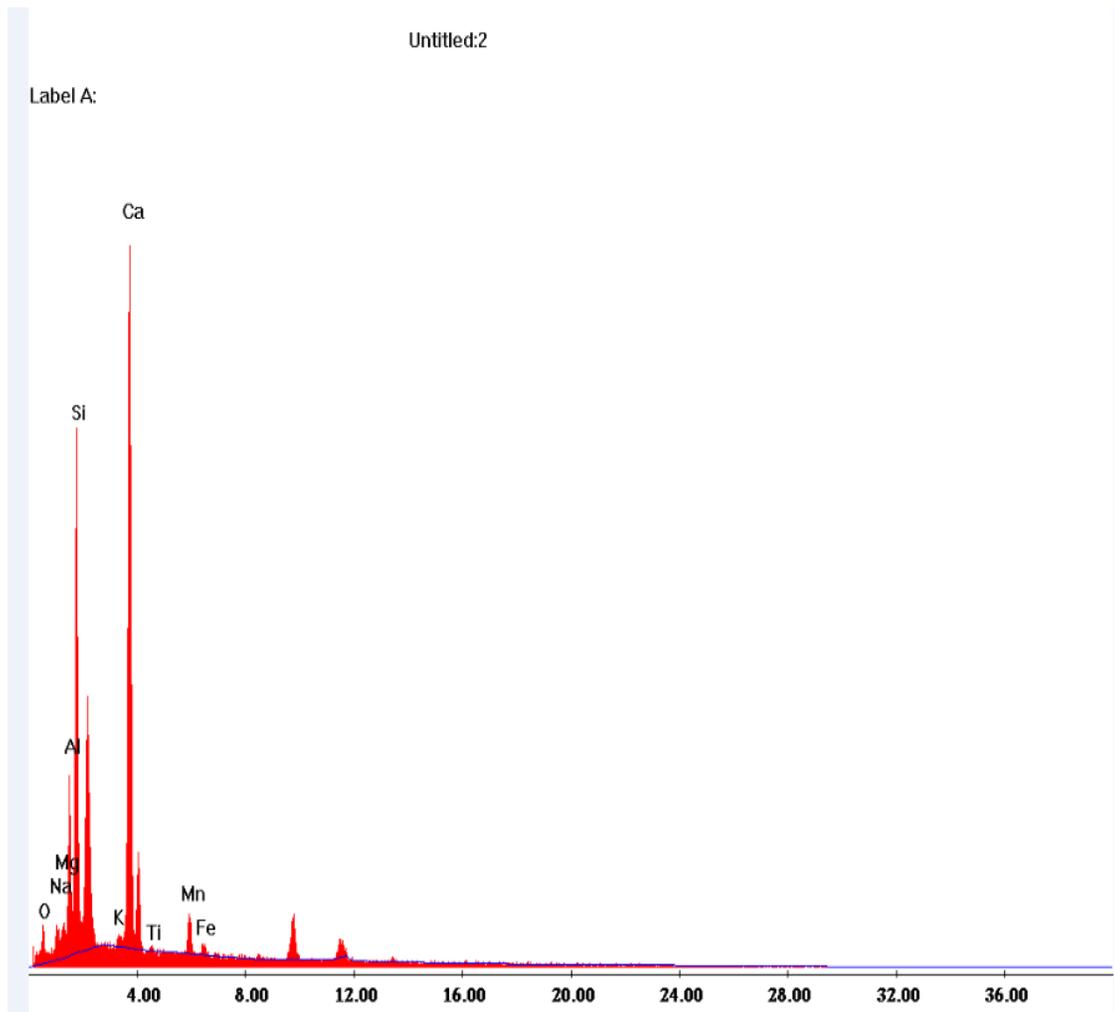
### ACTIVACIÓN $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ T=50°

#### Mortero 3 días





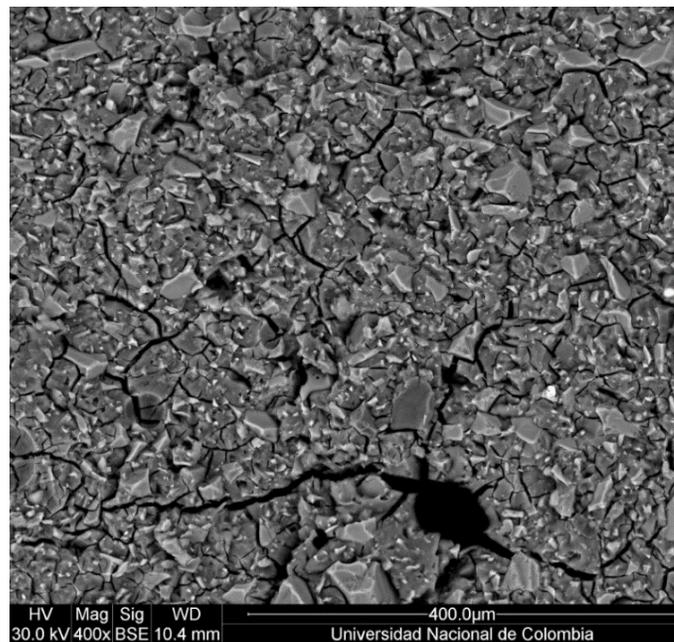
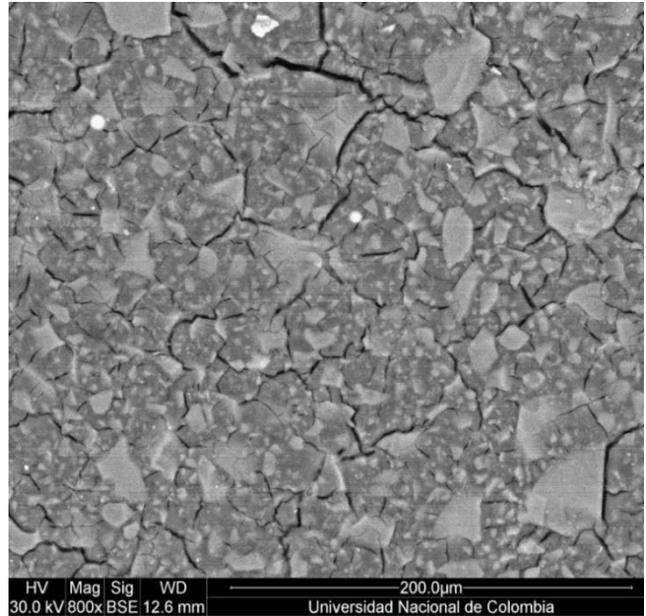
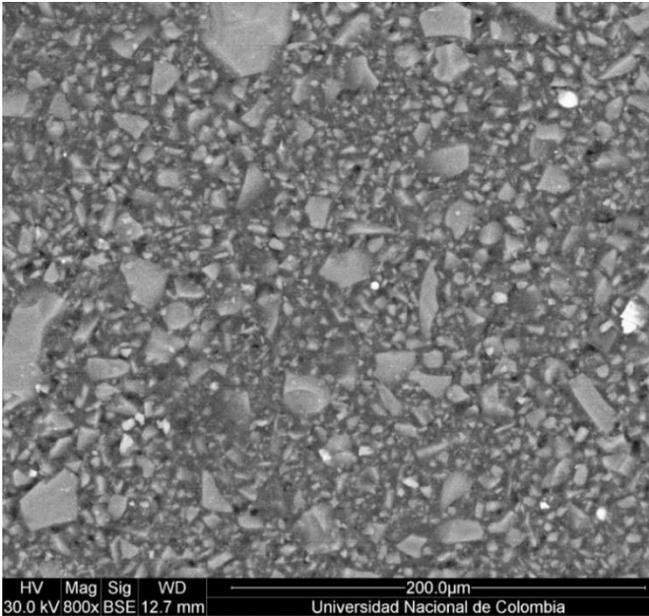




## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR TIEMPO

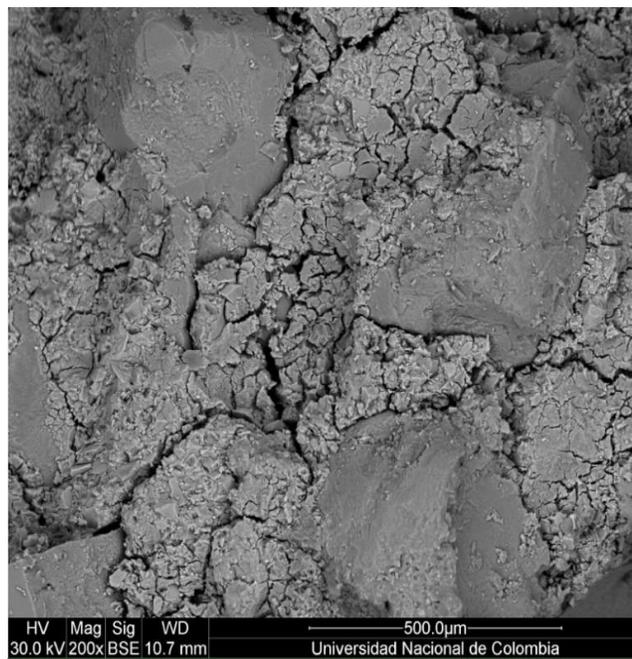
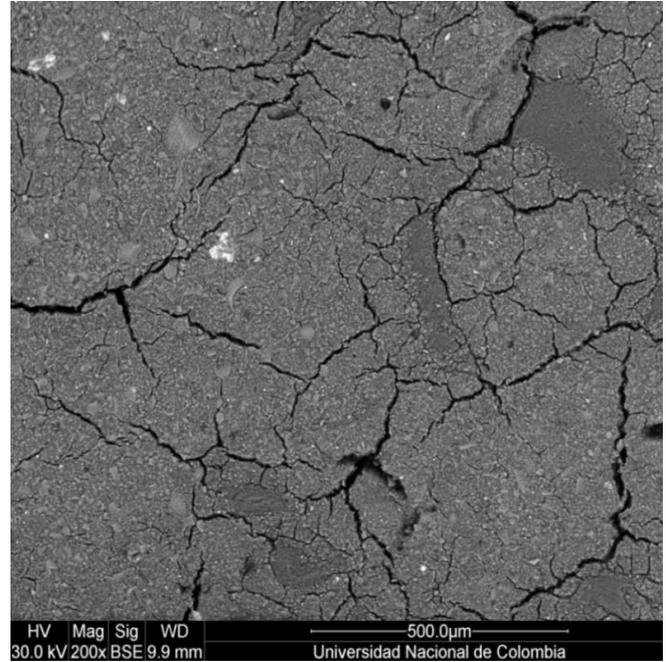
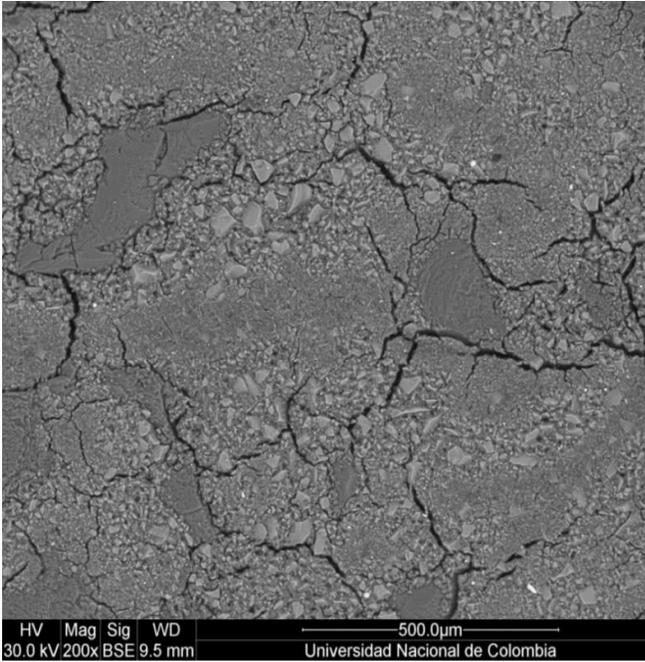
### SILICATO MÓDULO 1.5

Pastas 3H, 1D, 3D



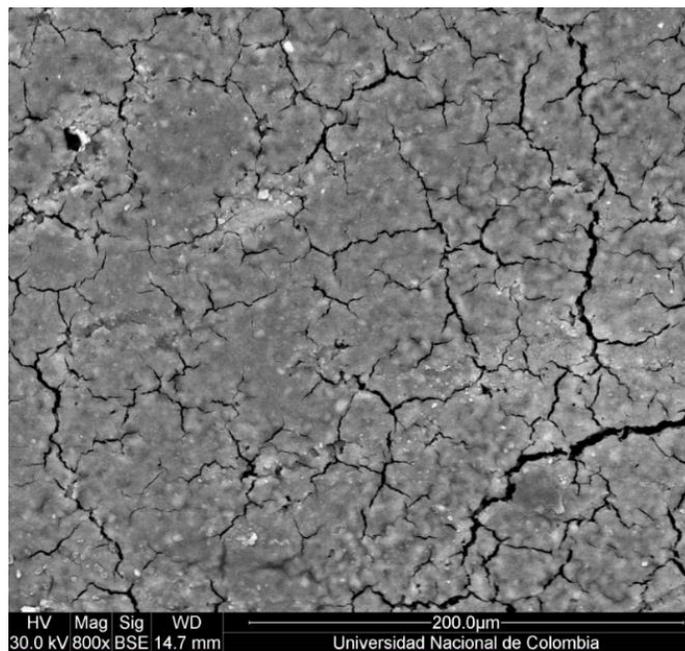
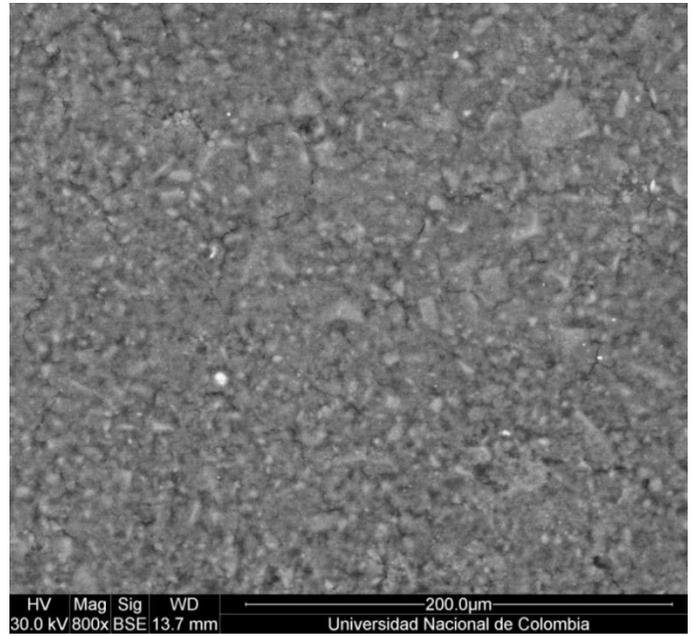
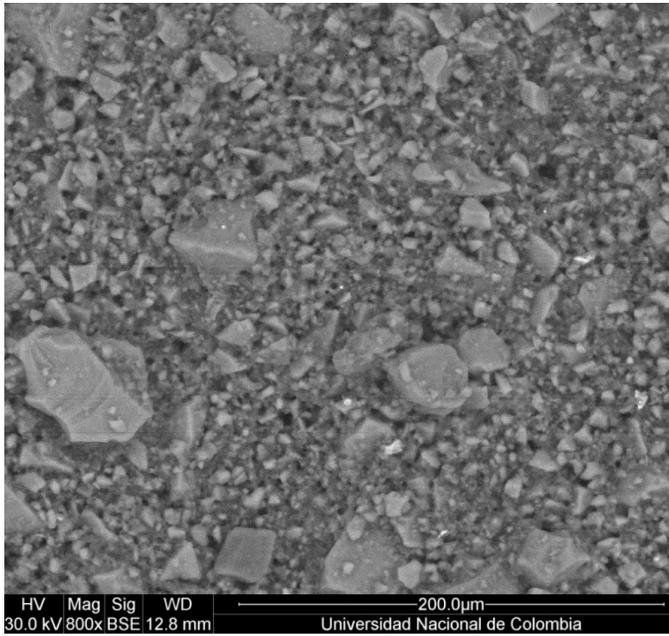
## SILICATO MÓDULO 1.5

### Morteros pastas 3H, 1D, 3D



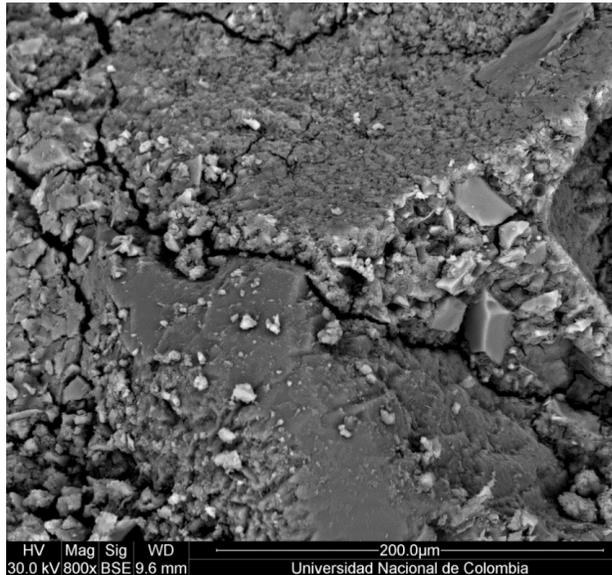
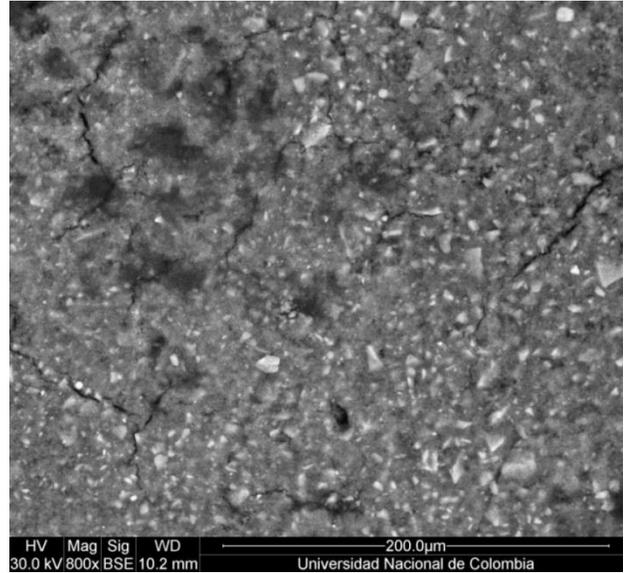
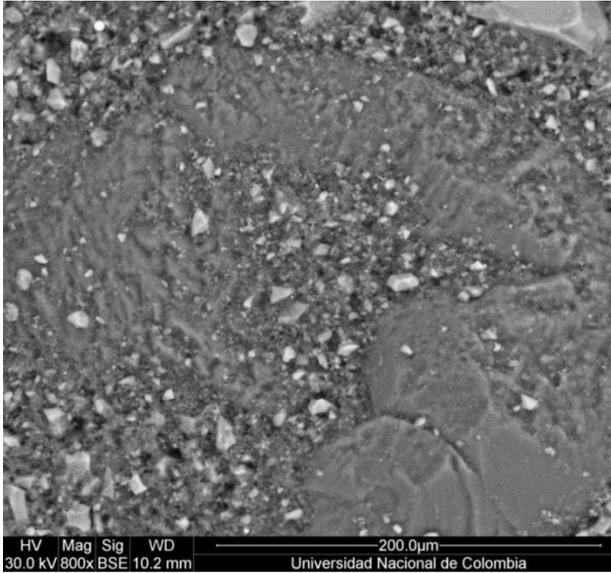
## ACTIVACIÓN NAOH 6%

### Pastas 3H, 1D, 3D



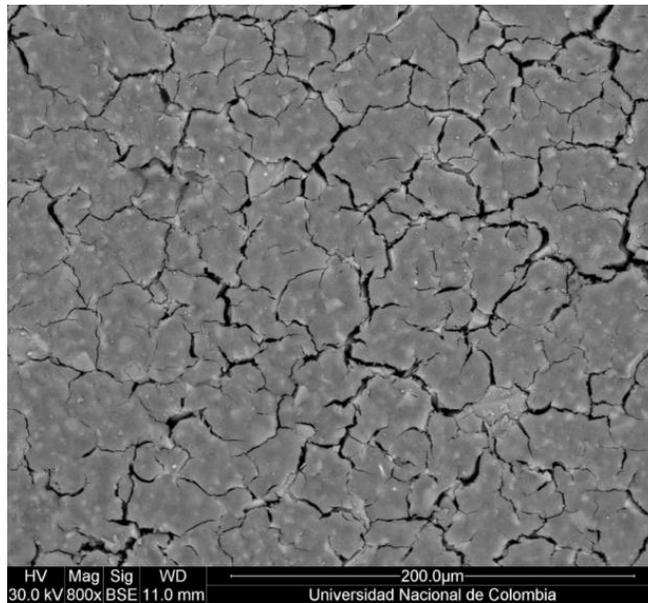
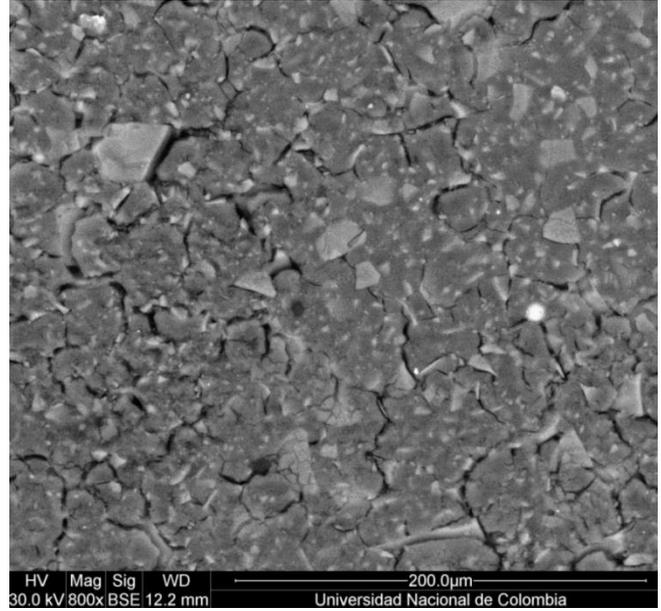
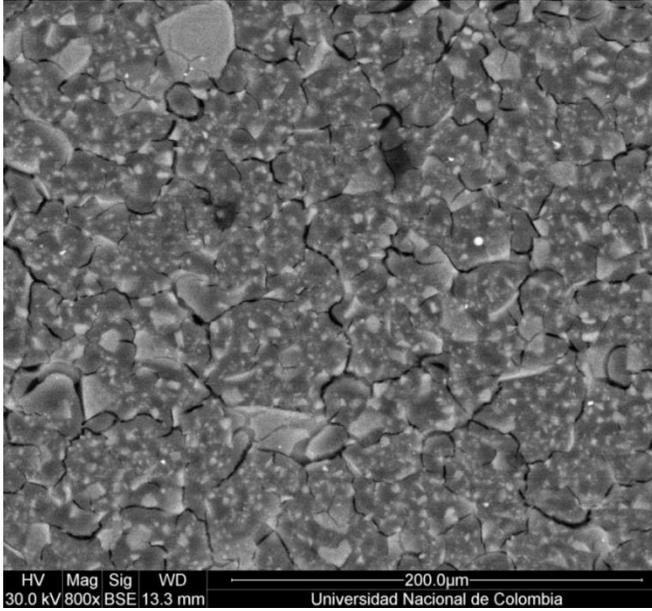
**ACTIVACIÓN NAOH 6%**

**Morteros 3H, 1D, 3D**



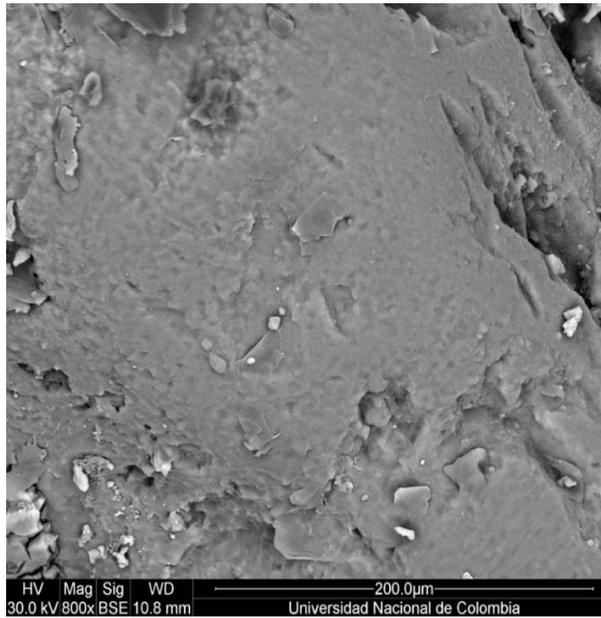
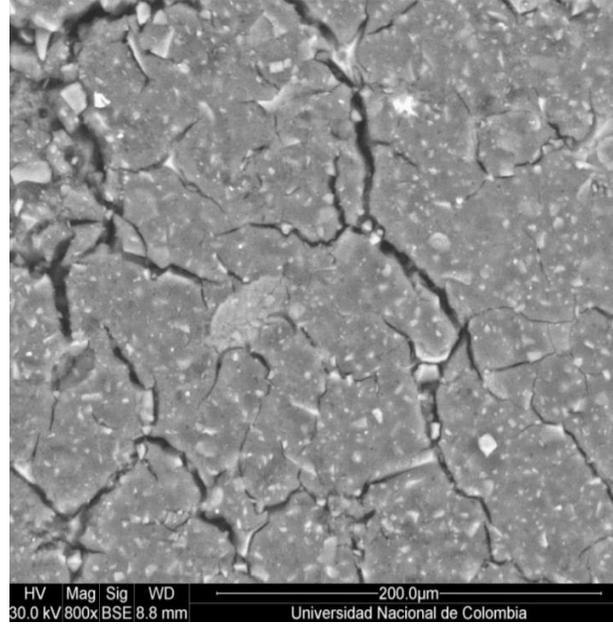
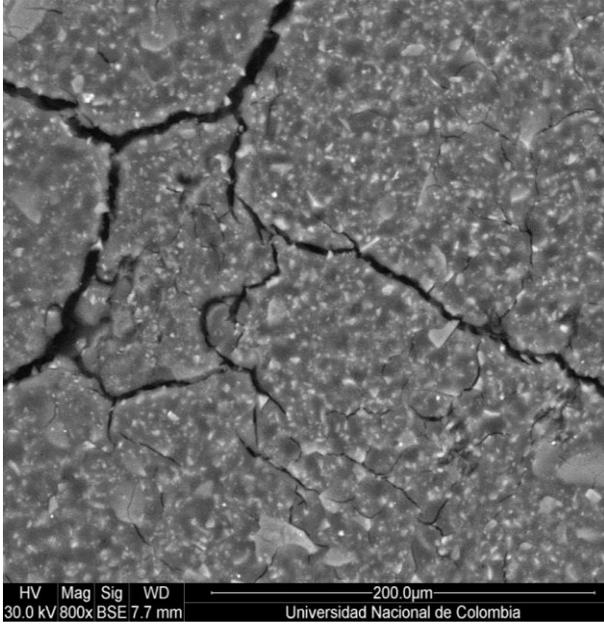
**ACTIVACIÓN  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  T=50°**

**PASTAS 3H, 1D, 3D**



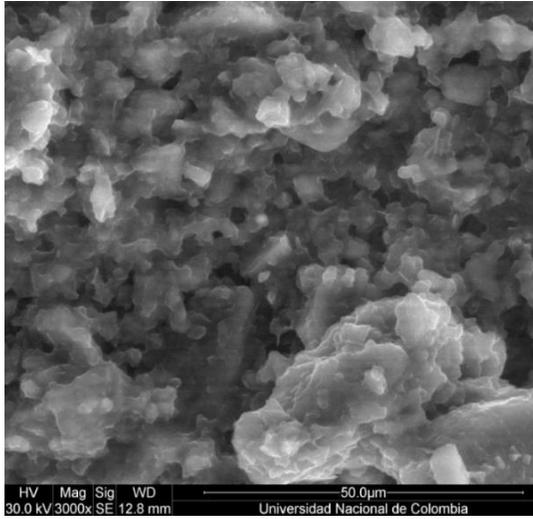
**ACTIVACIÓN  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  T=50°**

**Morteros 3H, 1D, 3D**

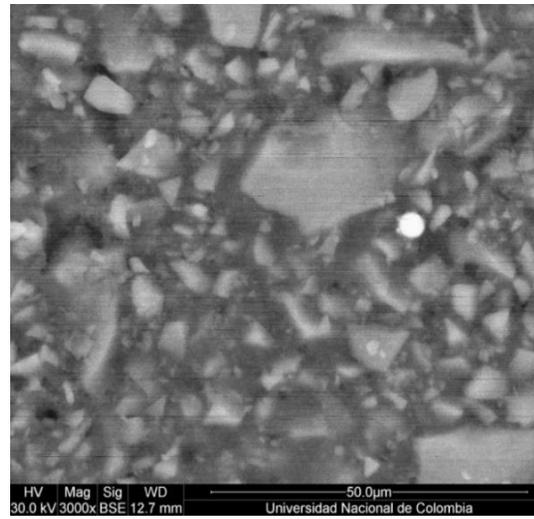


## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR

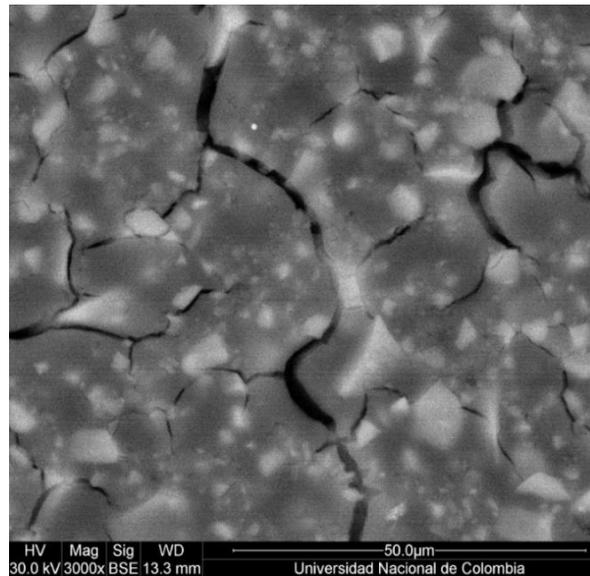
**Pastas NaOH 3 Horas**



**Ms = 1.5 3 horas**

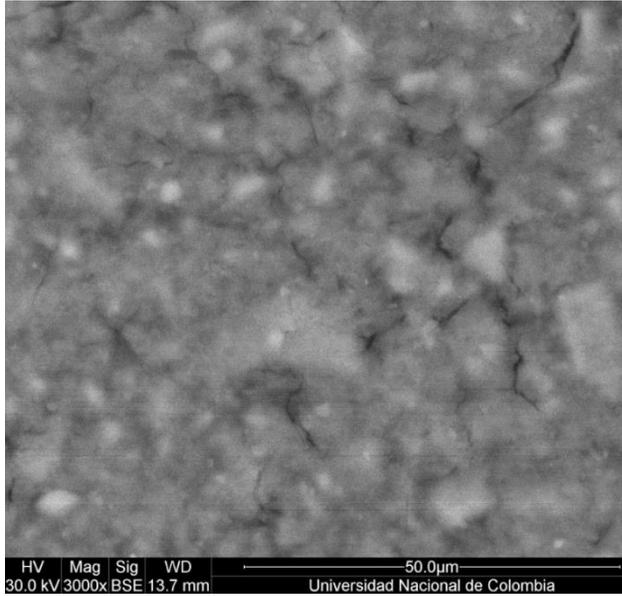


**Pastas Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> T 3 horas**

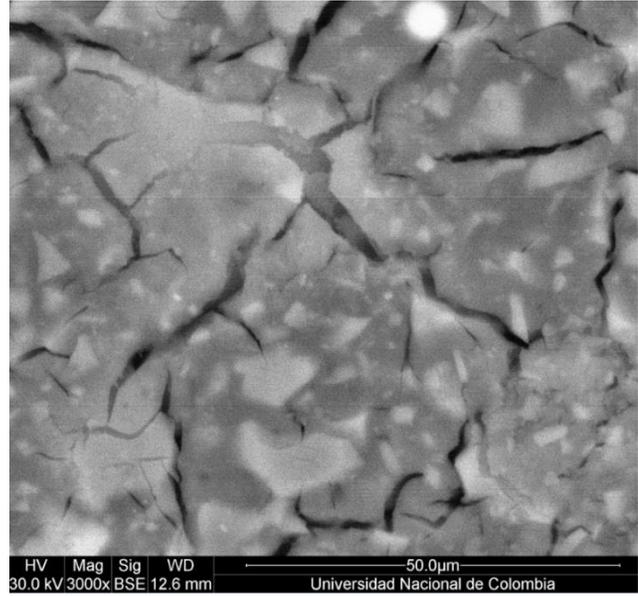


## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR

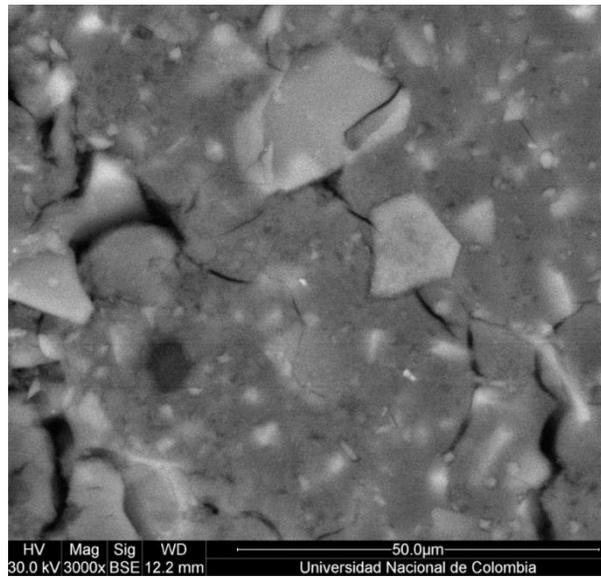
**Pastas NaOH 1 día**



**Ms = 1.5 3 1 día**

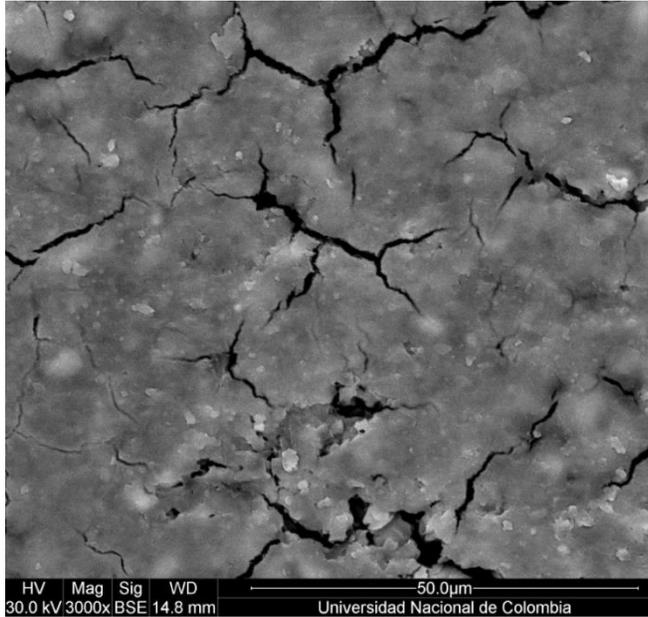


**Pastas Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> T 1 día**

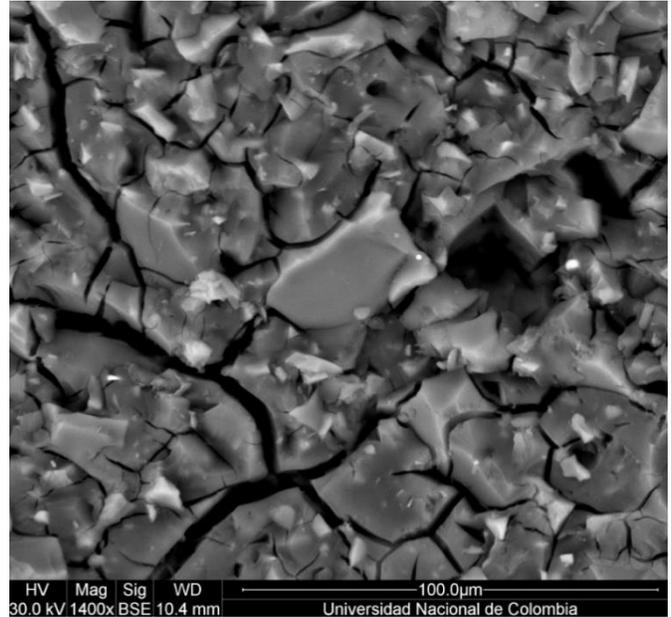


## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR

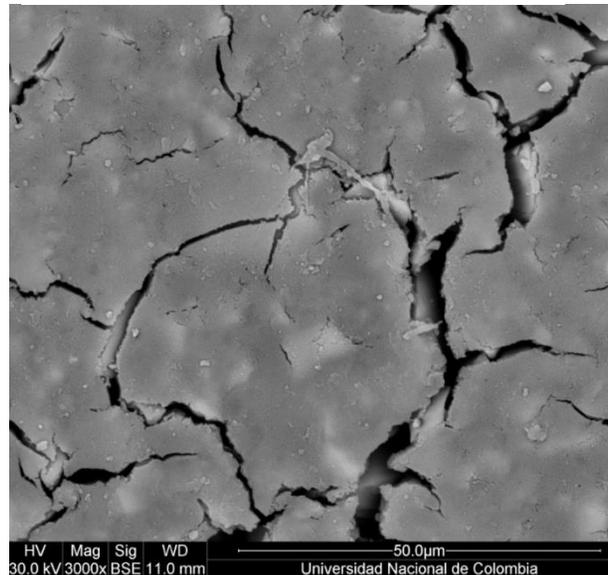
**Pastas NaOH 3 día**



**Ms = 1.5 3 día**

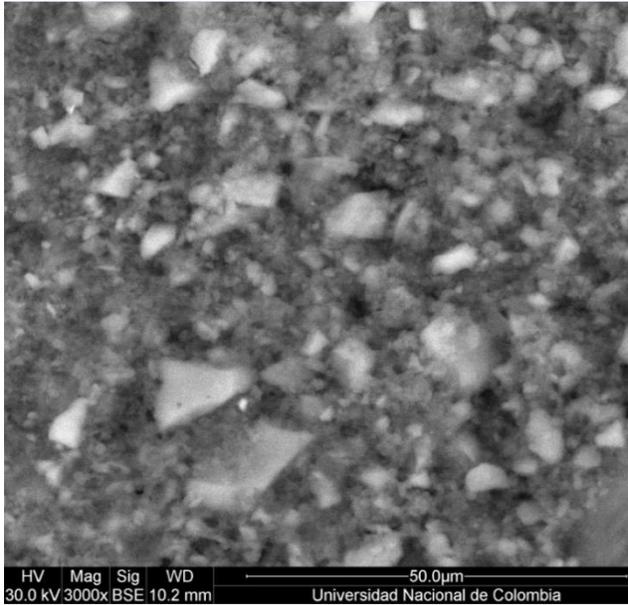


**PASTAS Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> T 3 días**

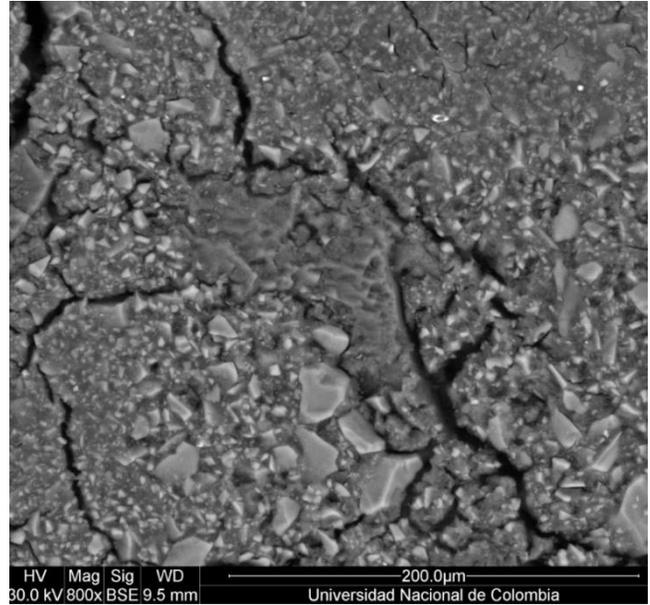


## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR

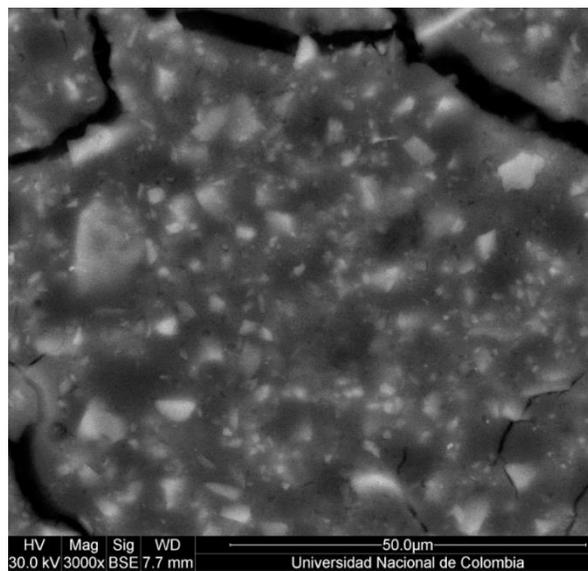
**Morteros NaOH 3 horas**



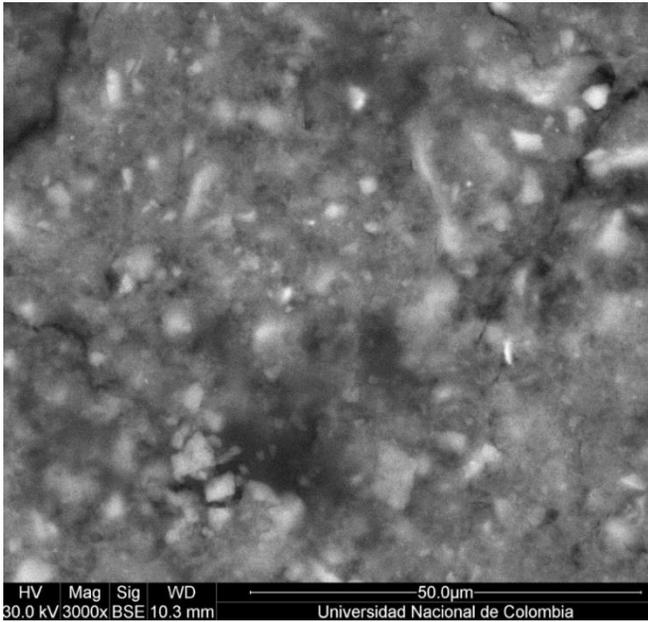
**Ms = 1.5 3 horas**



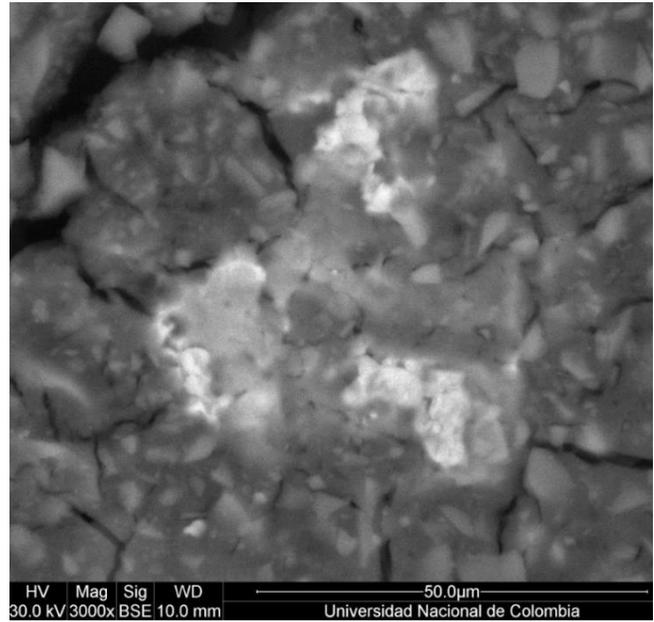
**Mortero Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> T 3 horas**



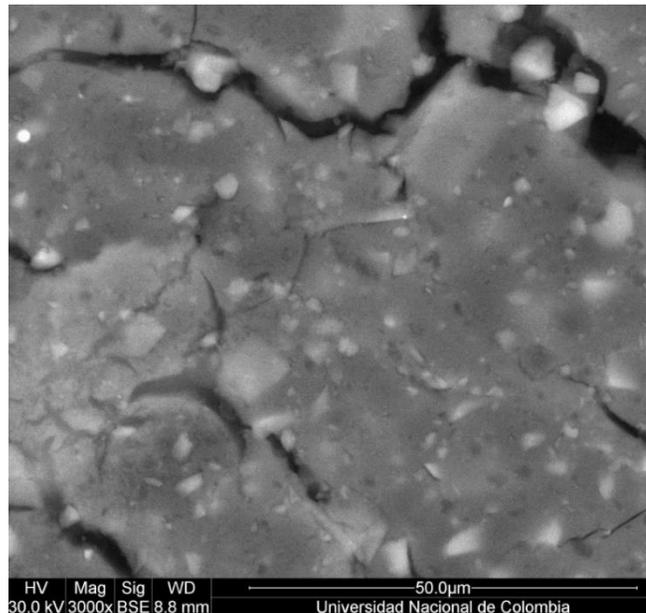
## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR



**Morteros NaOH 1 día**

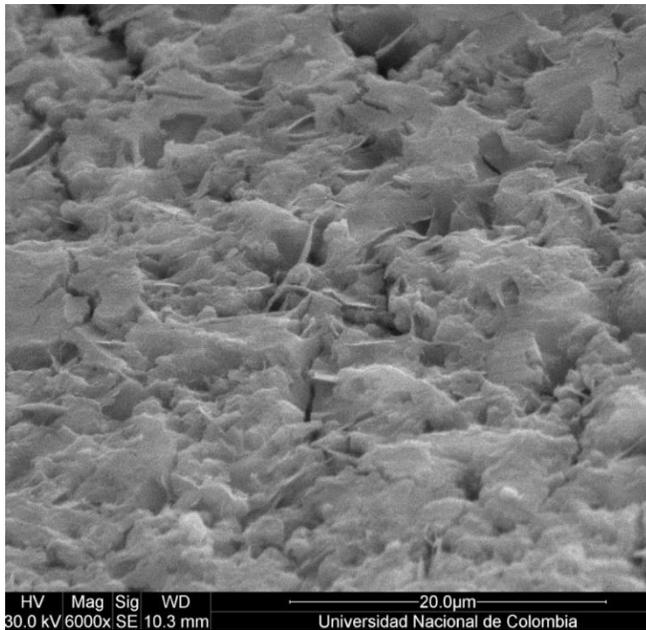


**Ms = 1.5 1 día**

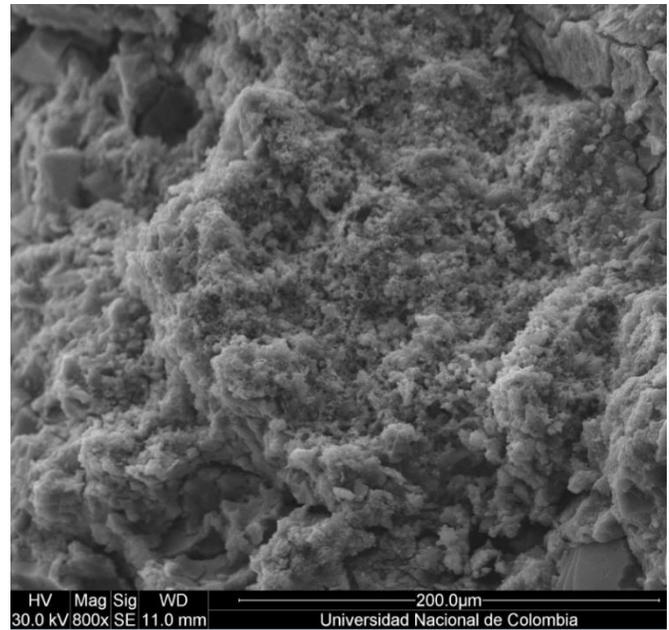


## COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS POR ACTIVADOR

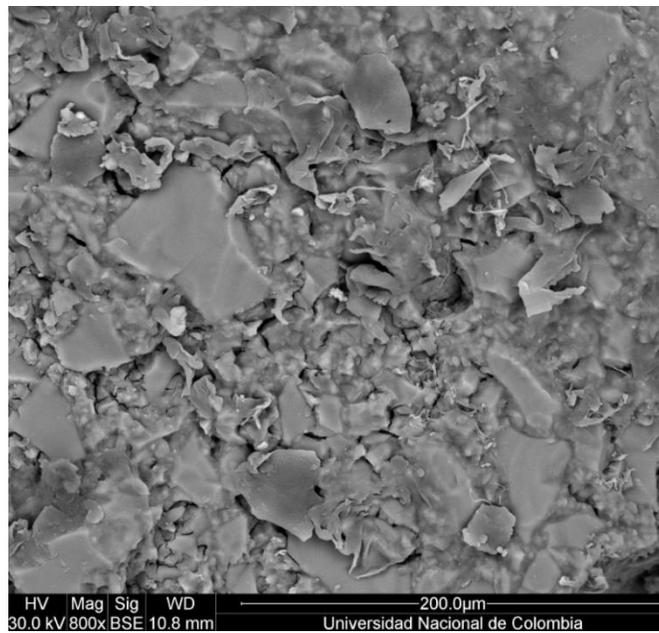
**Morteros NaOH 3 días**



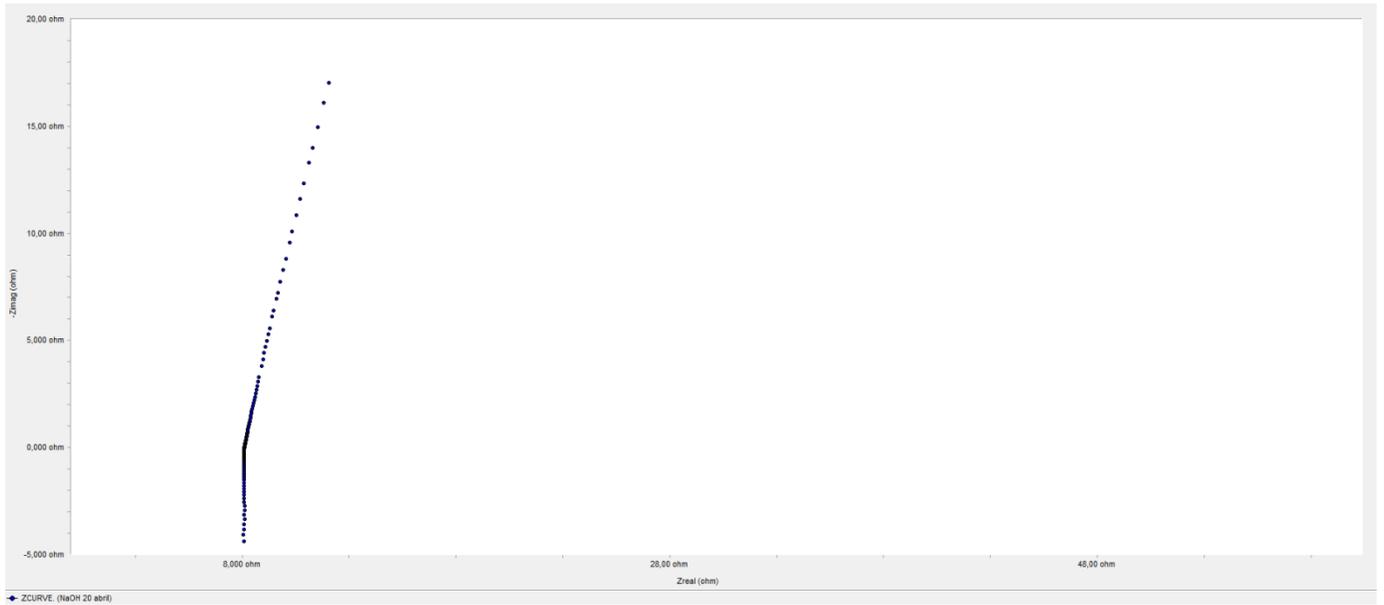
**Ms = 1.5 3 días**



**Mortero Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> T 1 día**



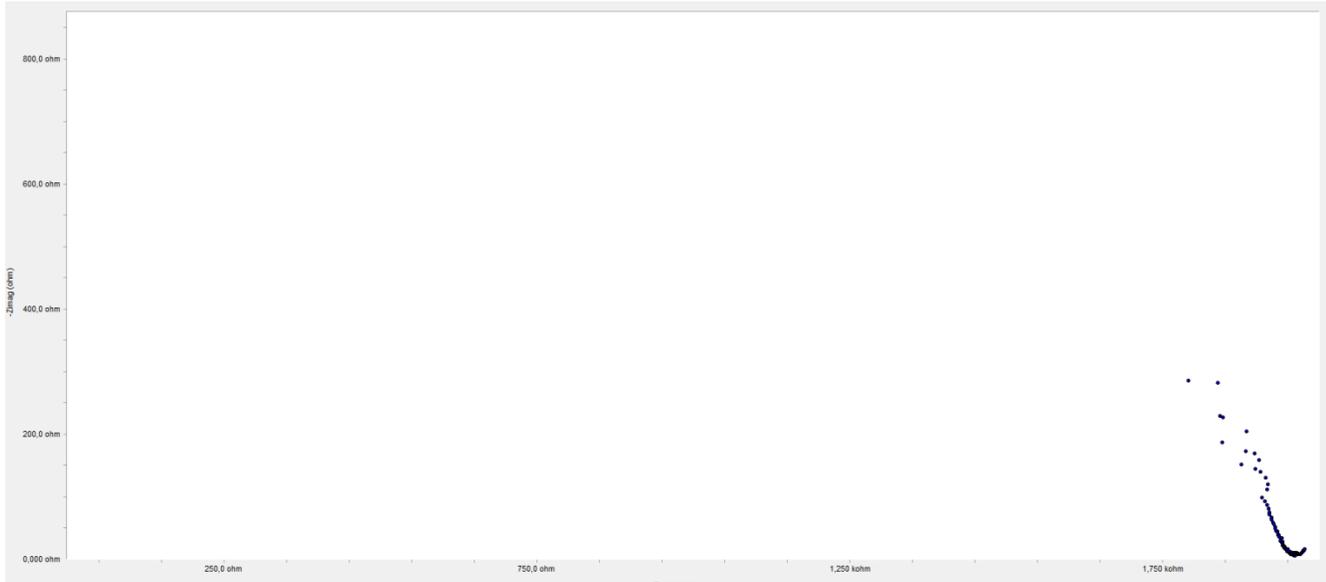
## **ANEXO C: Resumen impedancia.**



NaOH 0 DÍAS NYQUIST



NaOH 1 DÍAS NYQUIST



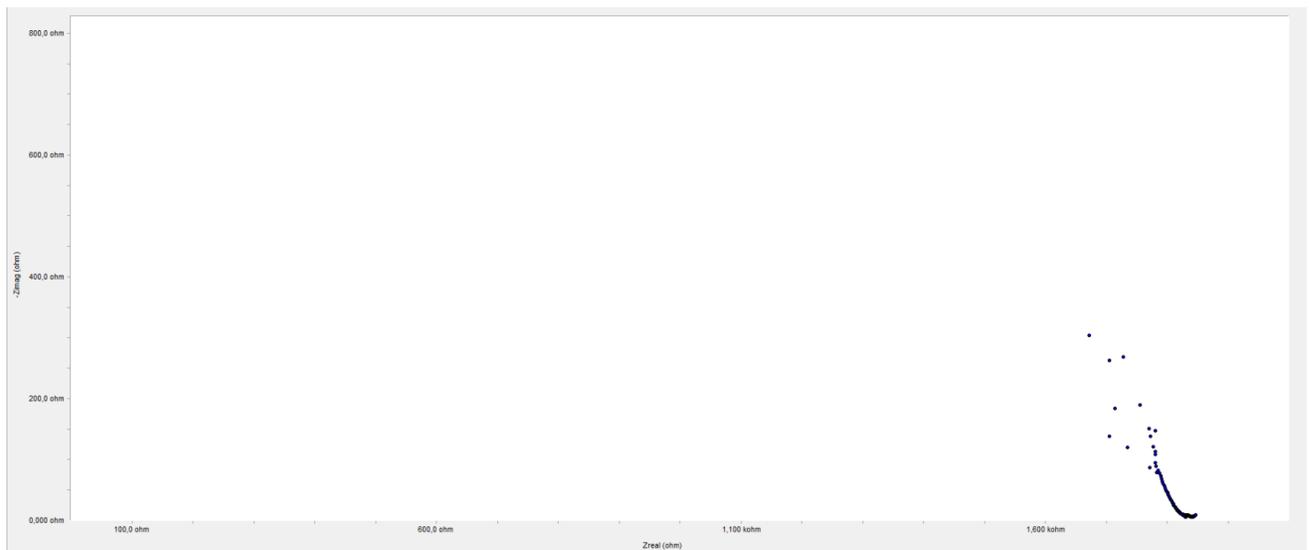
NaOH 3 DÍAS NYQUIST



NaOH 4 DÍAS NYQUIST



NaOH 0 DÍAS NYQUIST



NaOH 3 DÍAS NYQUIST

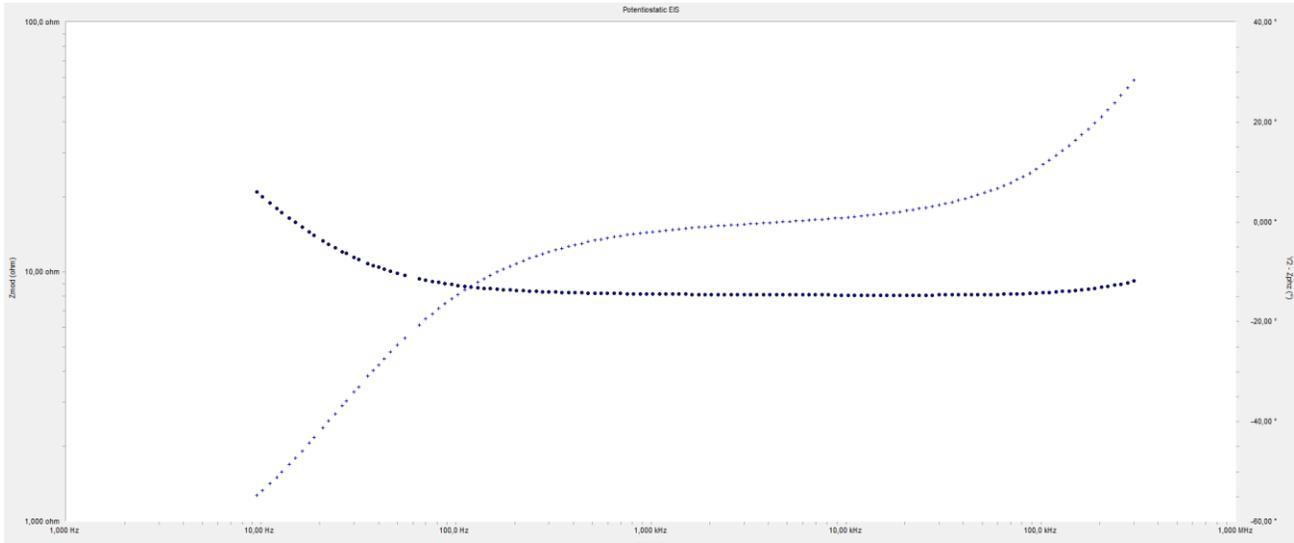


NaOH 9 DÍAS NYQUIST

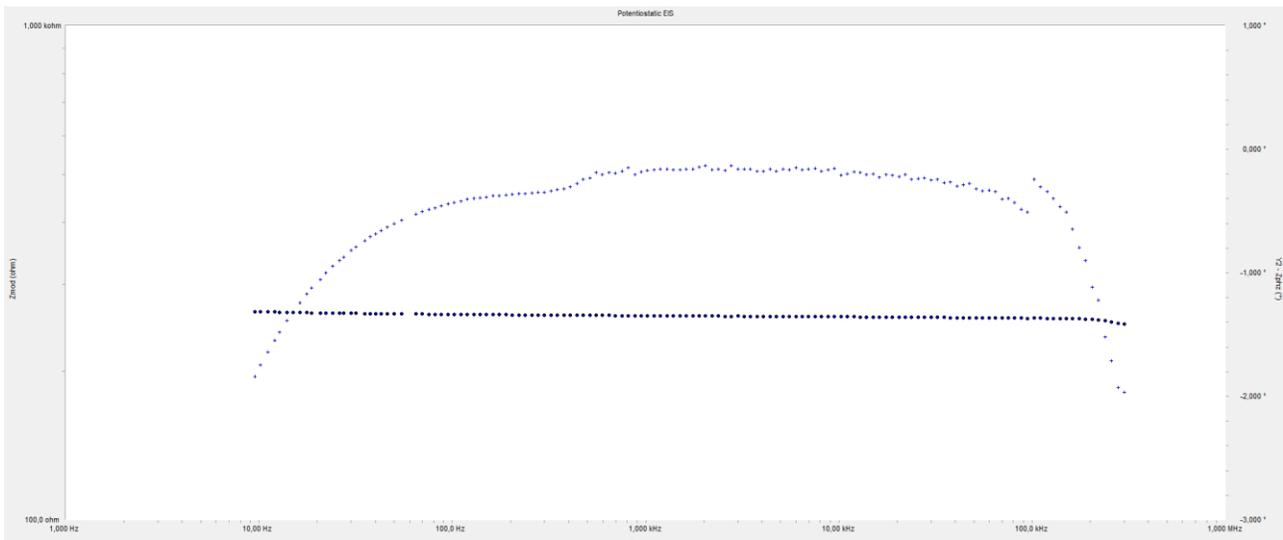


NaOH 0 DÍAS NYQUIST

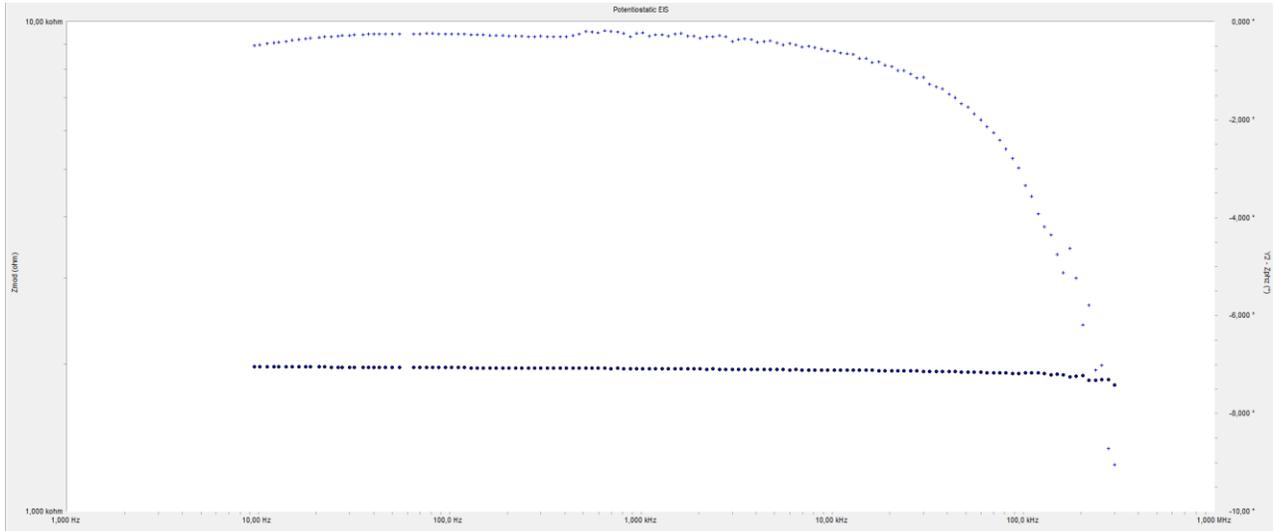
# OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND



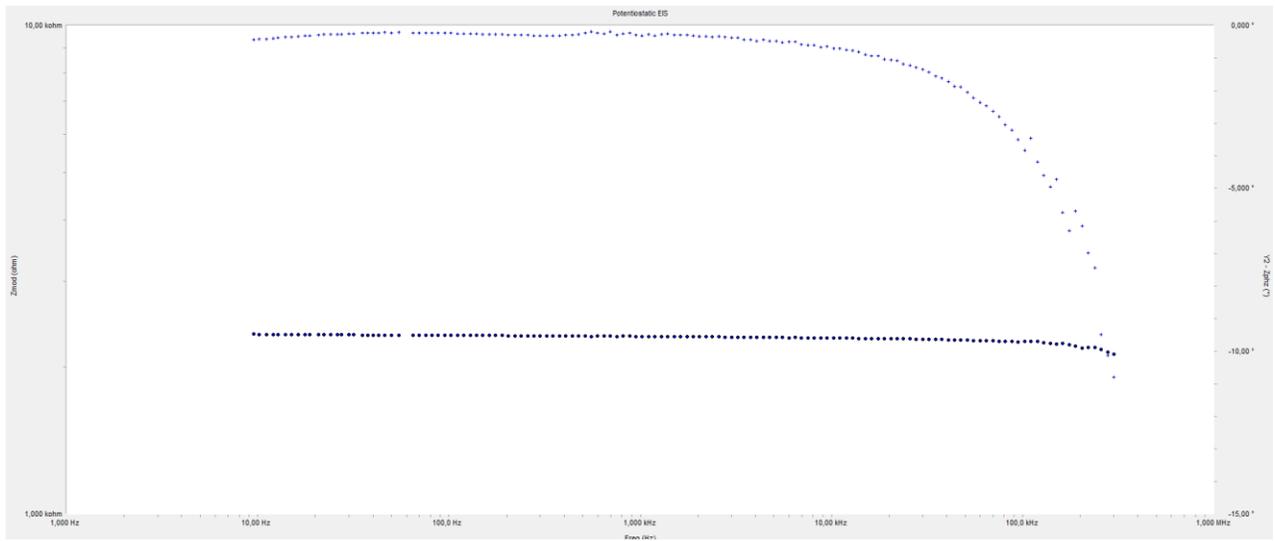
NaOH 0 DÍAS BODE



NaOH 1 DÍAS BODE

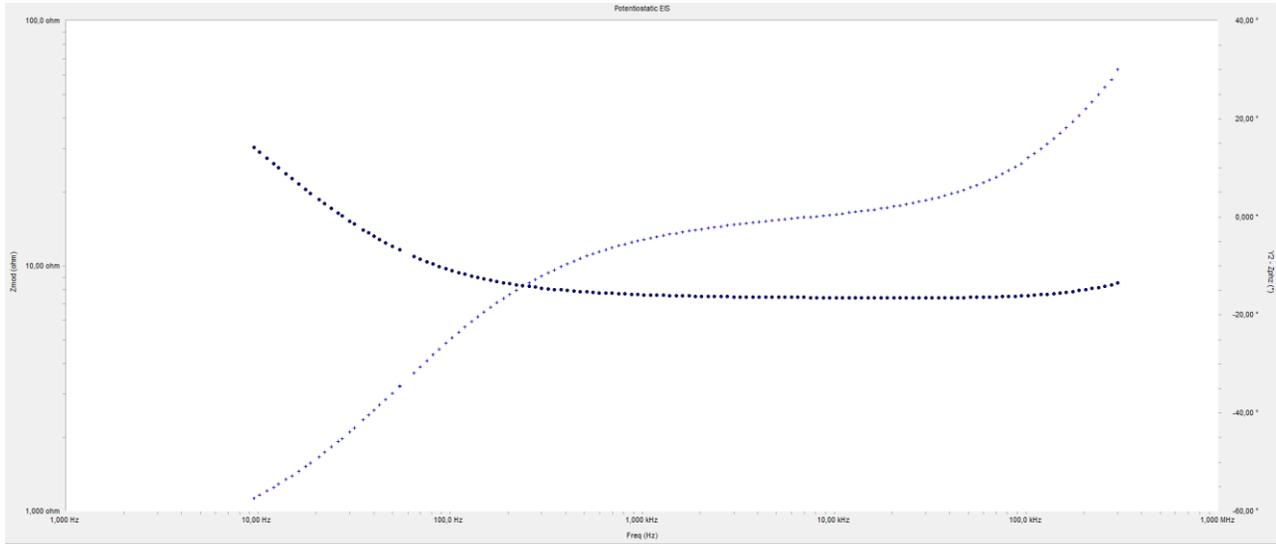


NaOH 3 DÍAS BODE

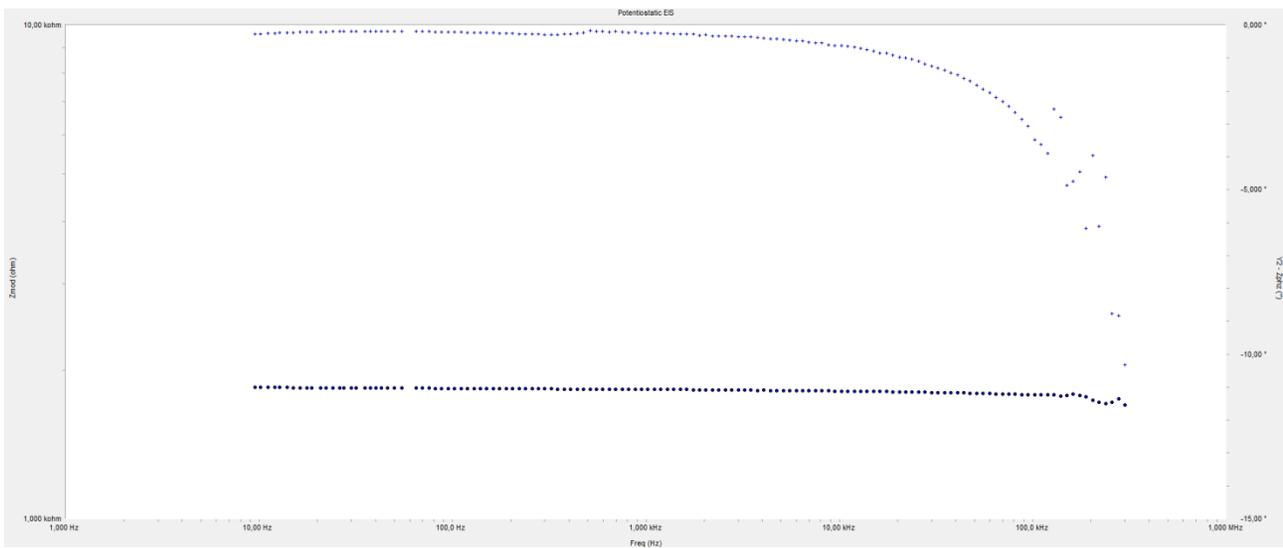


NaOH 4 DÍAS BODE

# OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

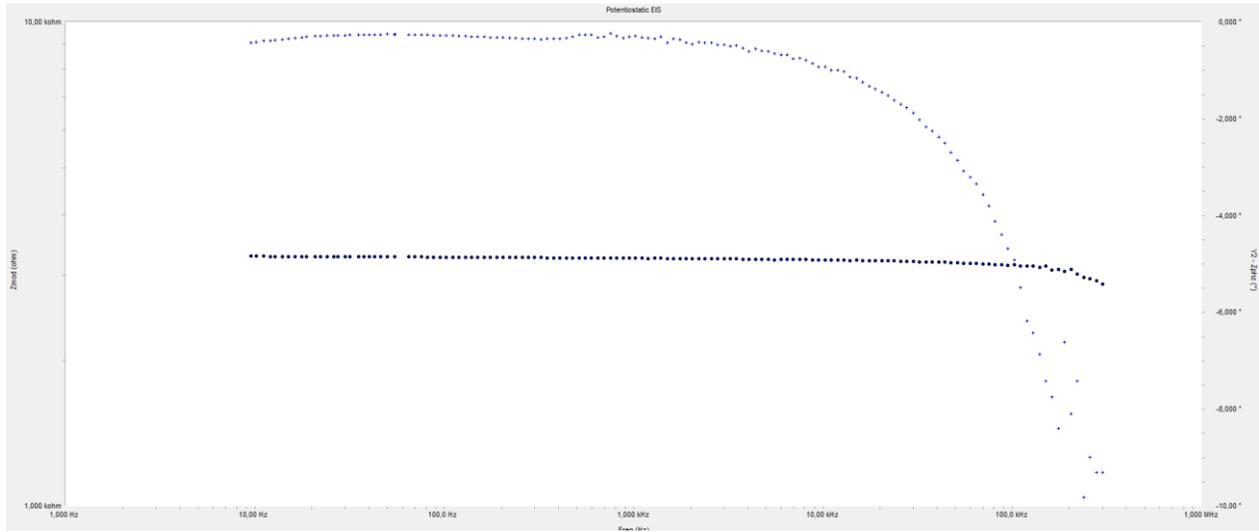


NaOH 0 DÍAS BODE

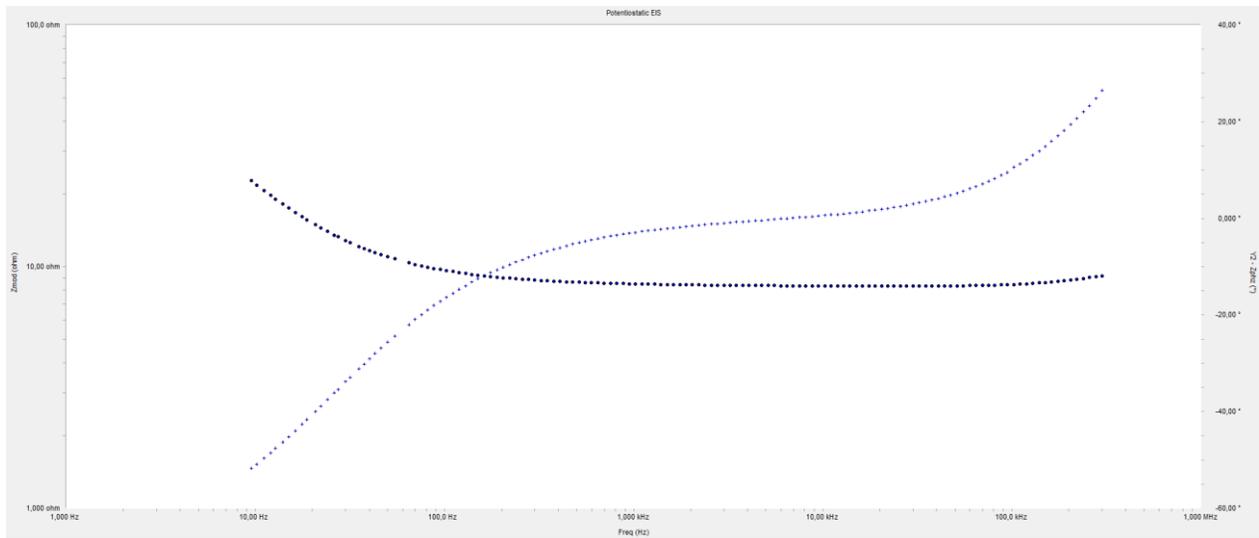


NaOH 3 DÍAS BODE

OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

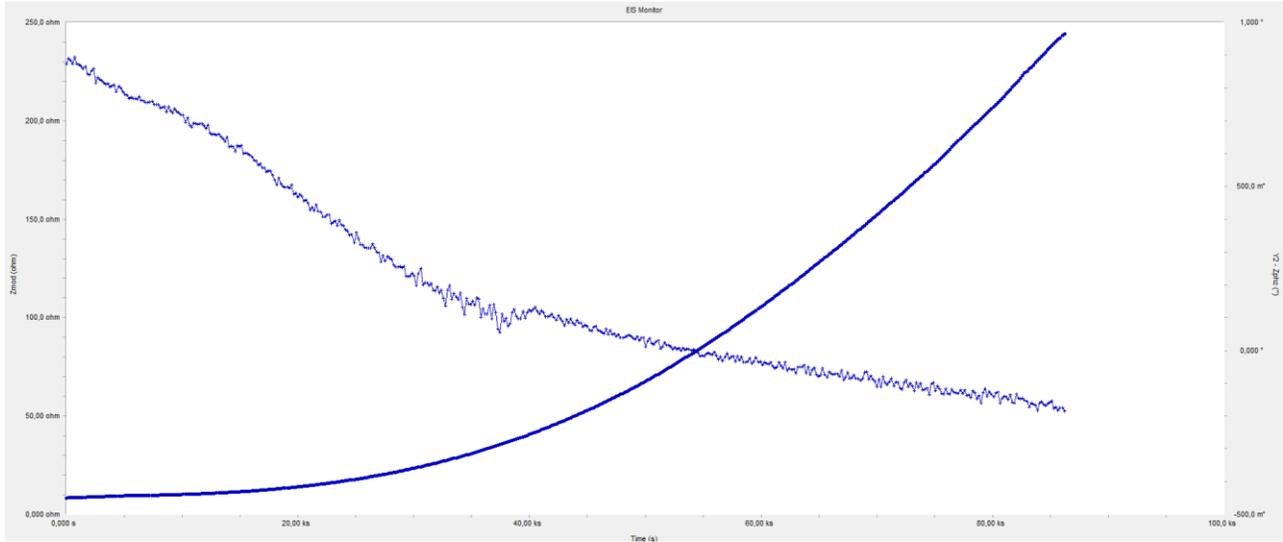


NaOH 9 DÍAS BODE

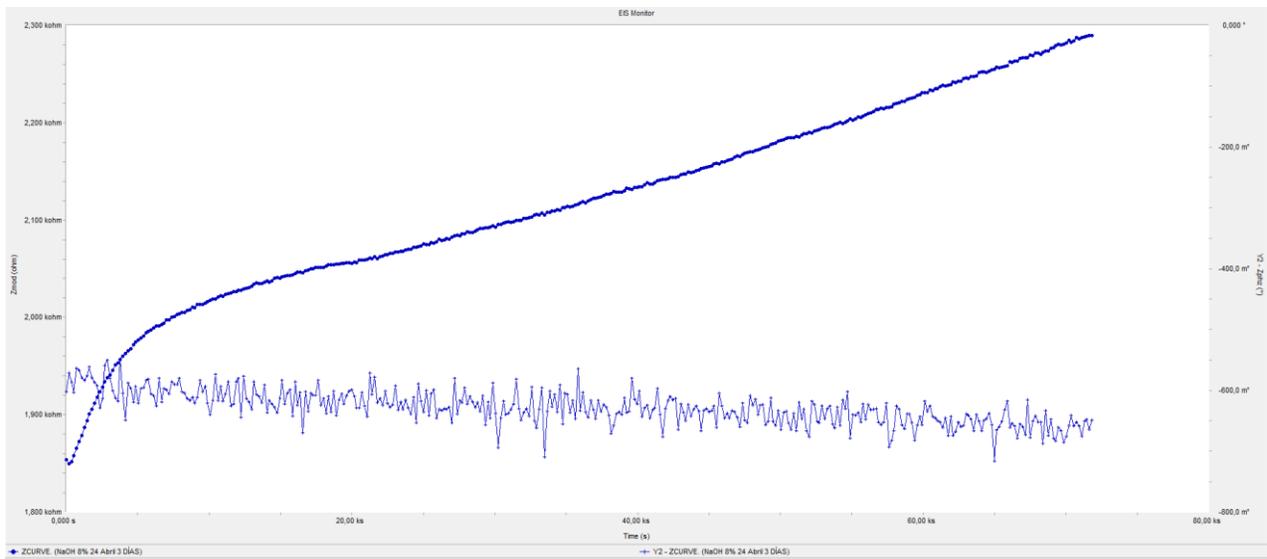


NaOH 0 DÍAS BODE

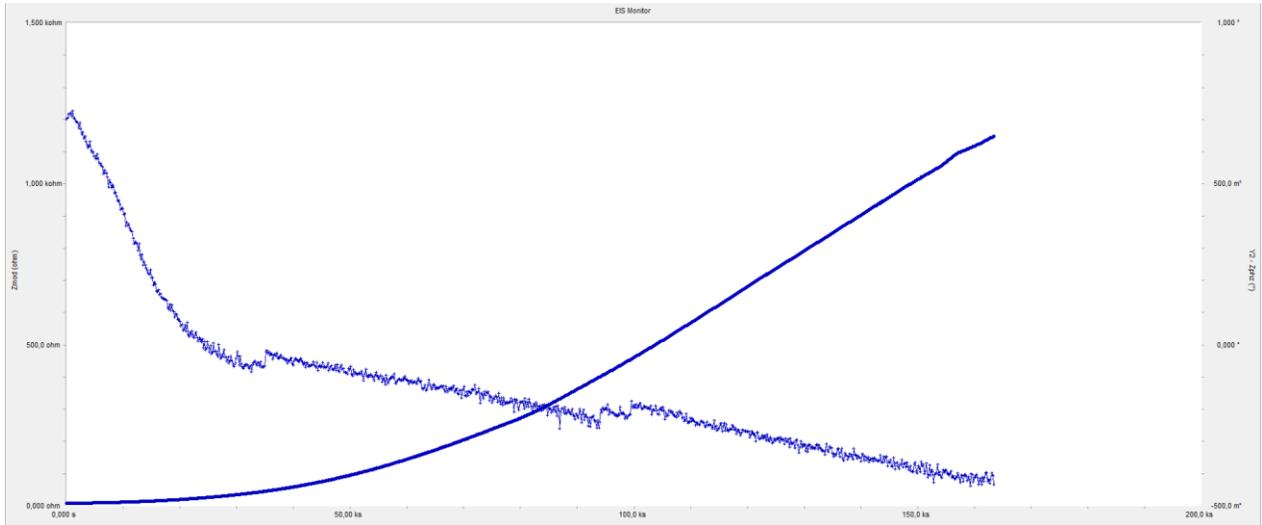
OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND



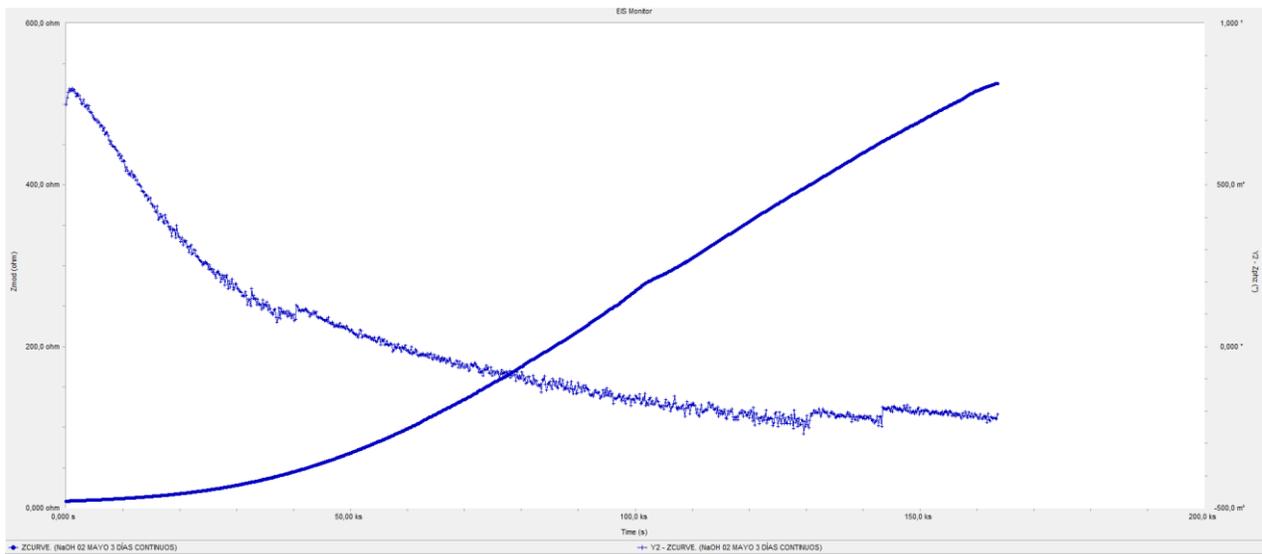
NaOH 24 HORAS SINGLE



NaOH 72 HORAS SINGLE

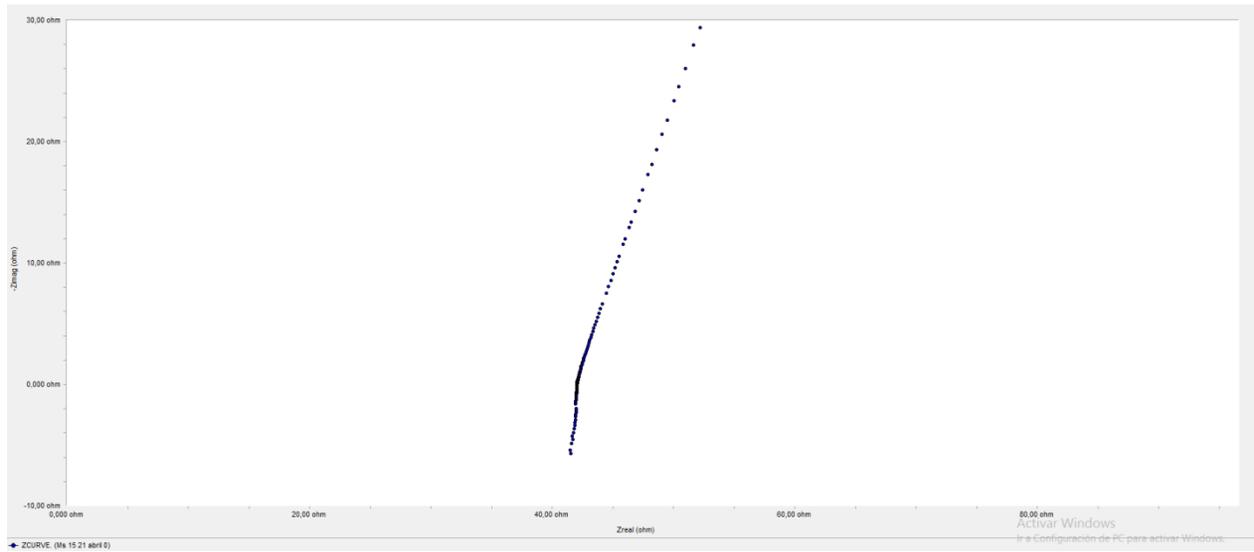


NaOH3 DÍAS SINGLE

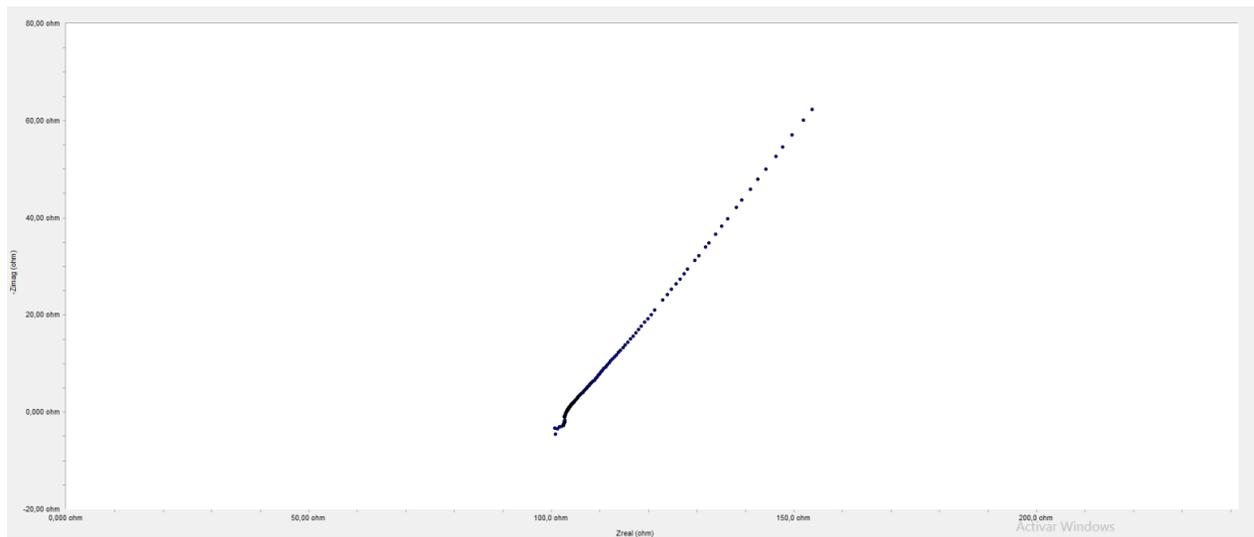


NaOH3 DÍAS SINGLE

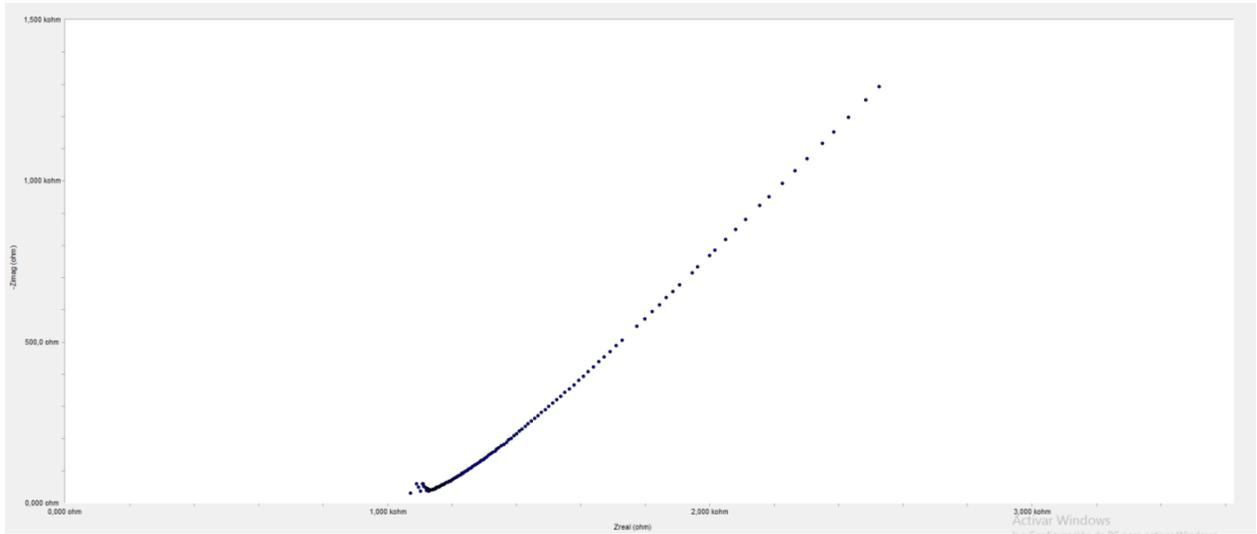
OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND



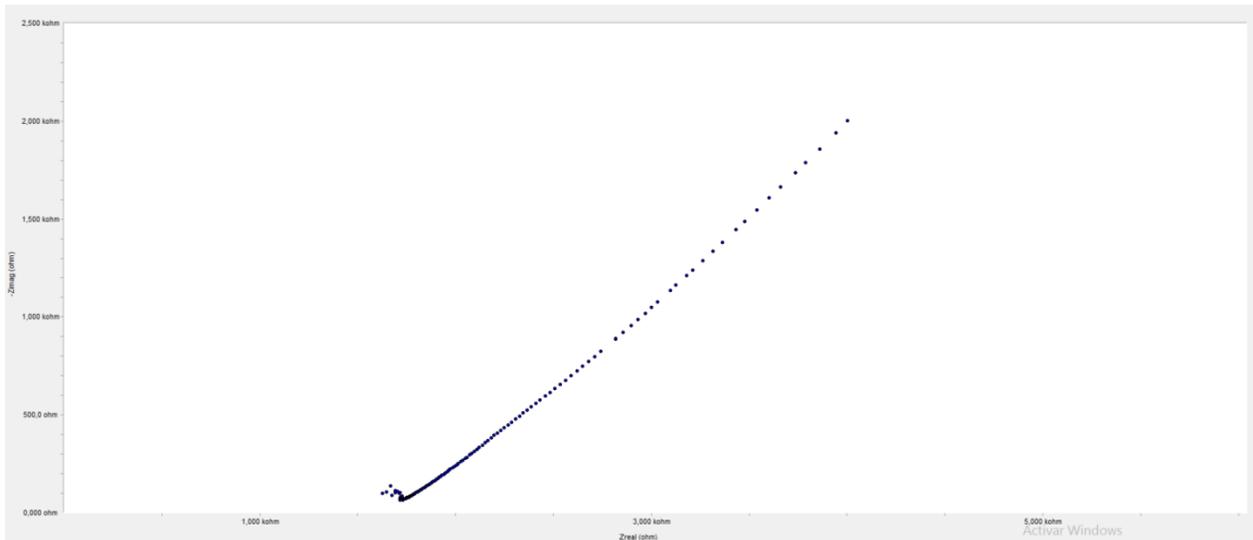
Ms 1,5 0 DÍAS NYQUIST



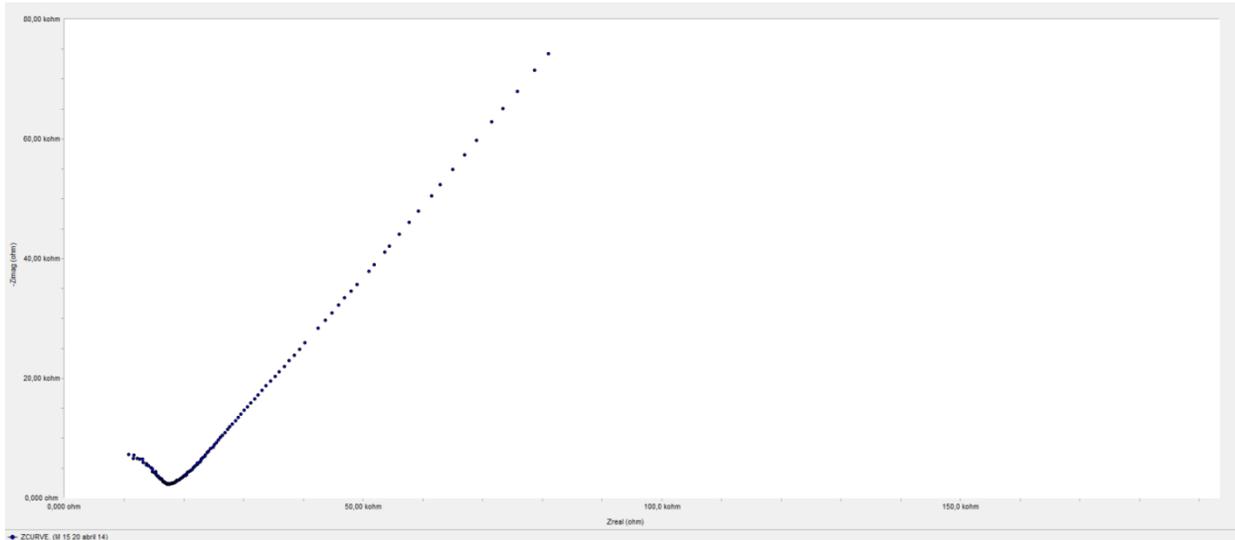
Ms 1,5 1 DÍAS NYQUIST



Ms 1,5 3 DÍAS NYQUIST



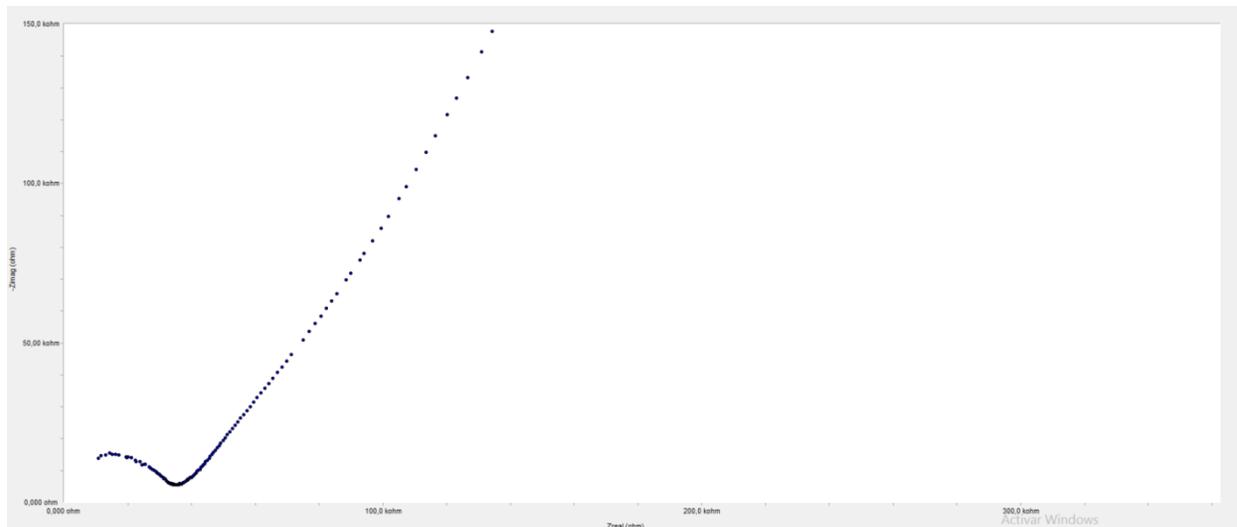
Ms 1,5 4 DÍAS NYQUIST



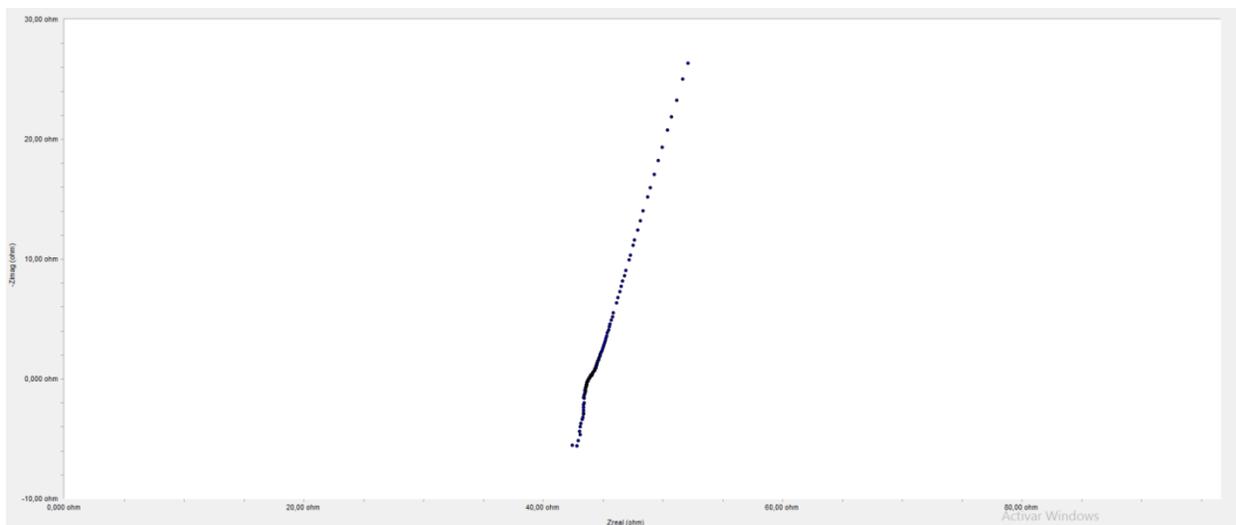
Ms 1,5 14 DÍAS NYQUIST



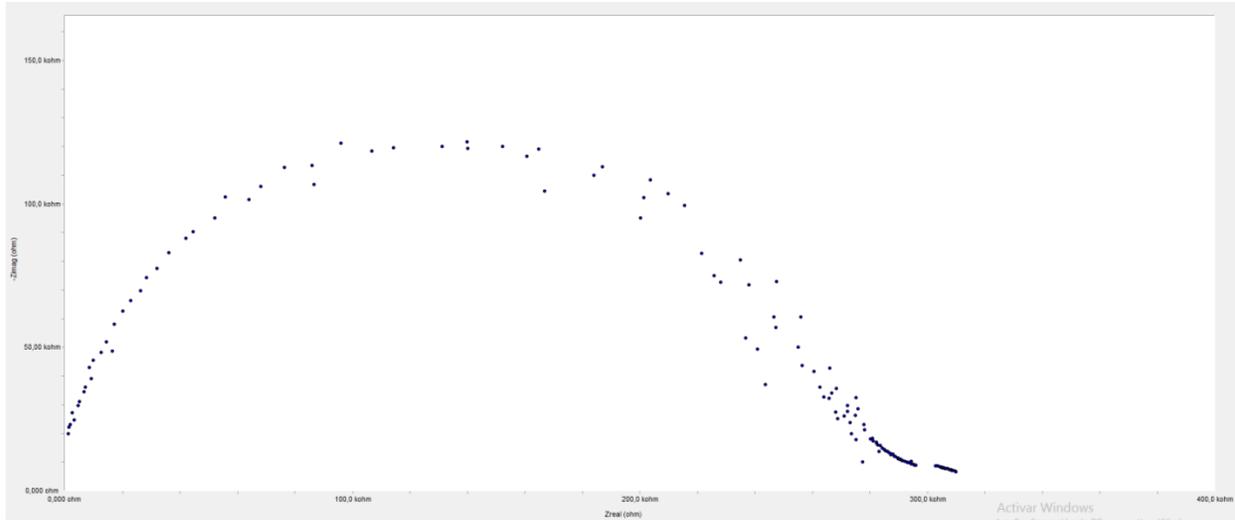
Ms 1,5 14 DÍAS CURADO NYQUIST



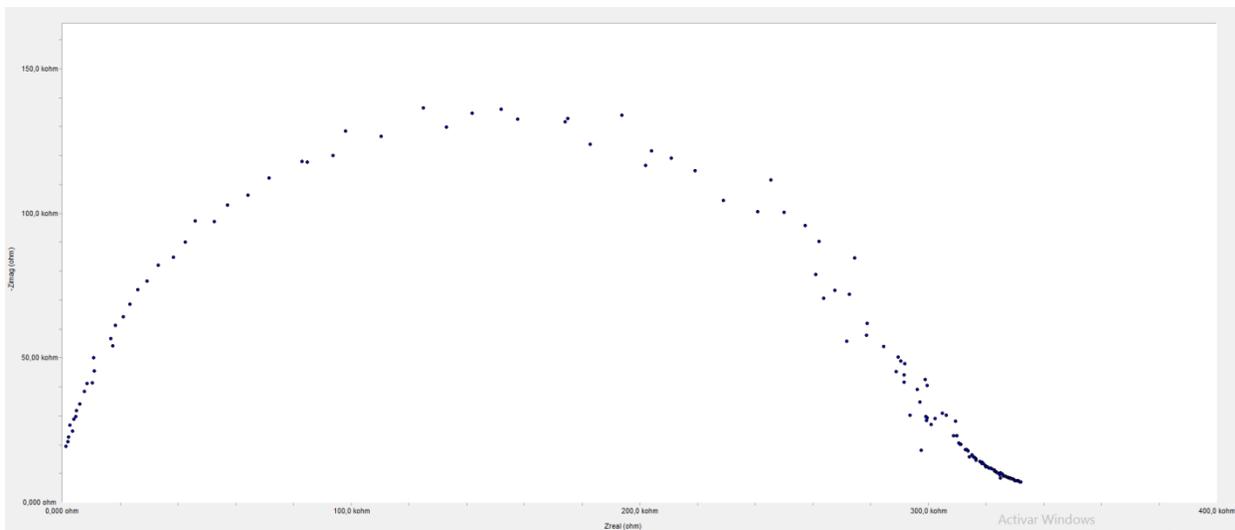
### DÍAS NYQUIST



### Ms 1,5 0 DÍAS NYQUIST

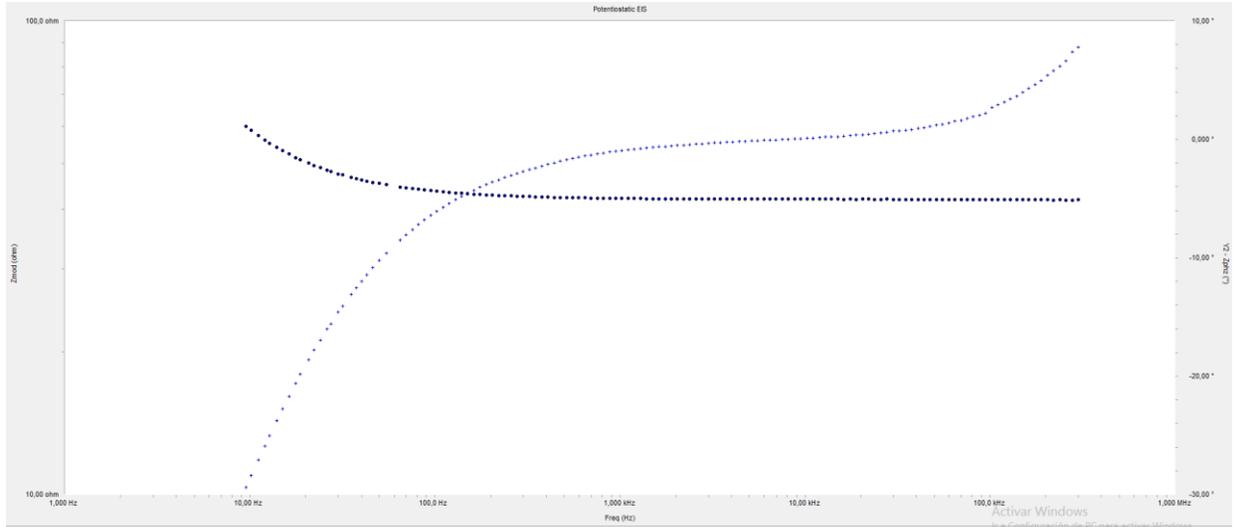


Ms 1,5 3 DÍAS NYQUIST

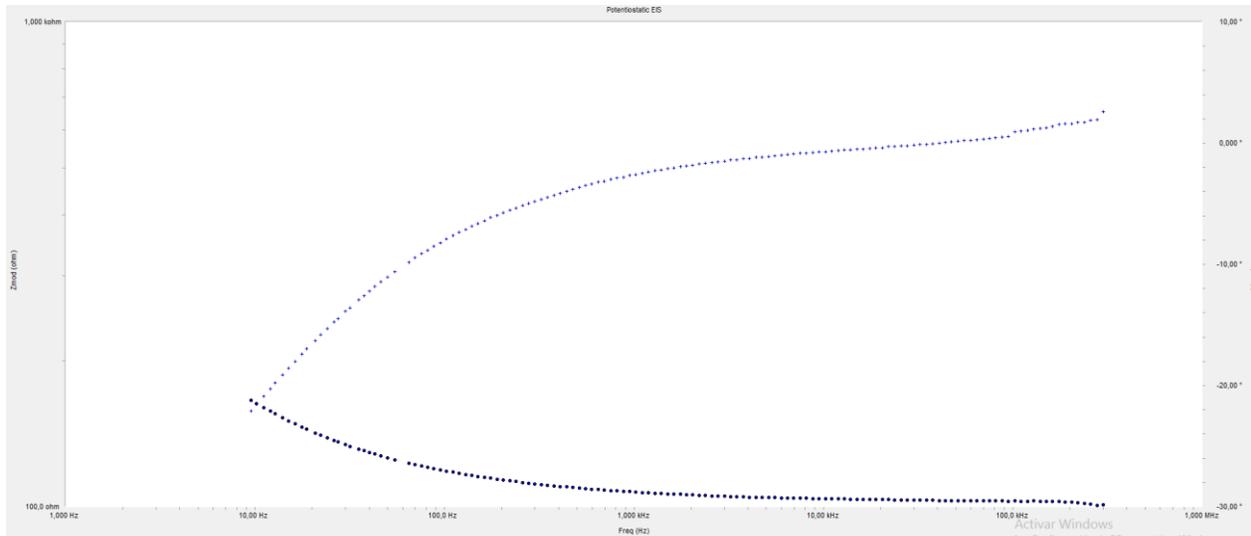


Ms 1,5 3 DÍAS B NYQUIST

OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

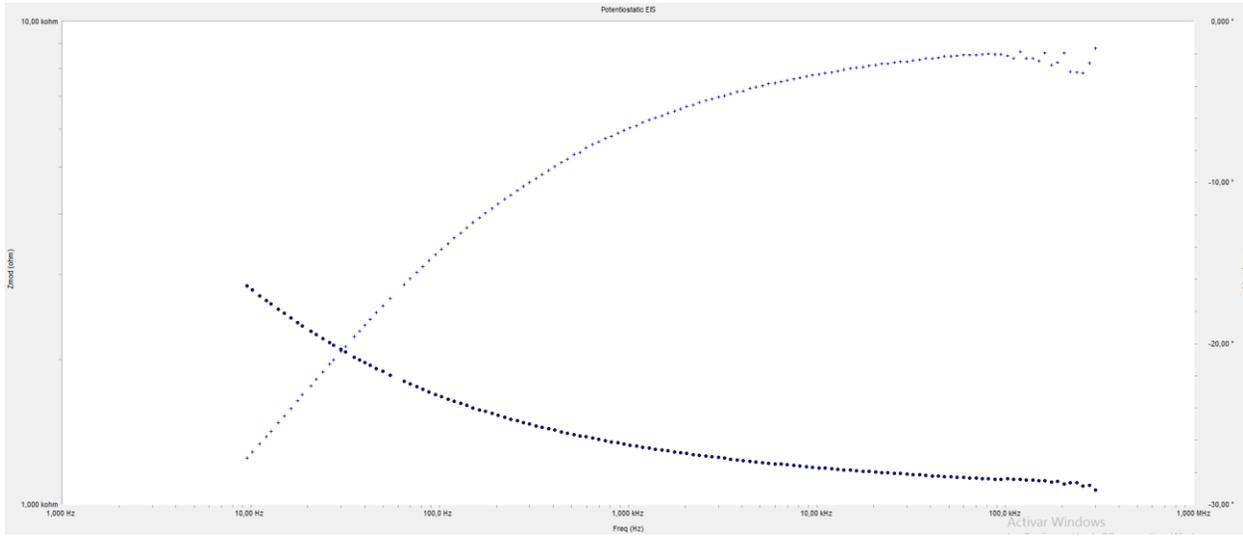


Ms 1,5 0 DÍAS BODE

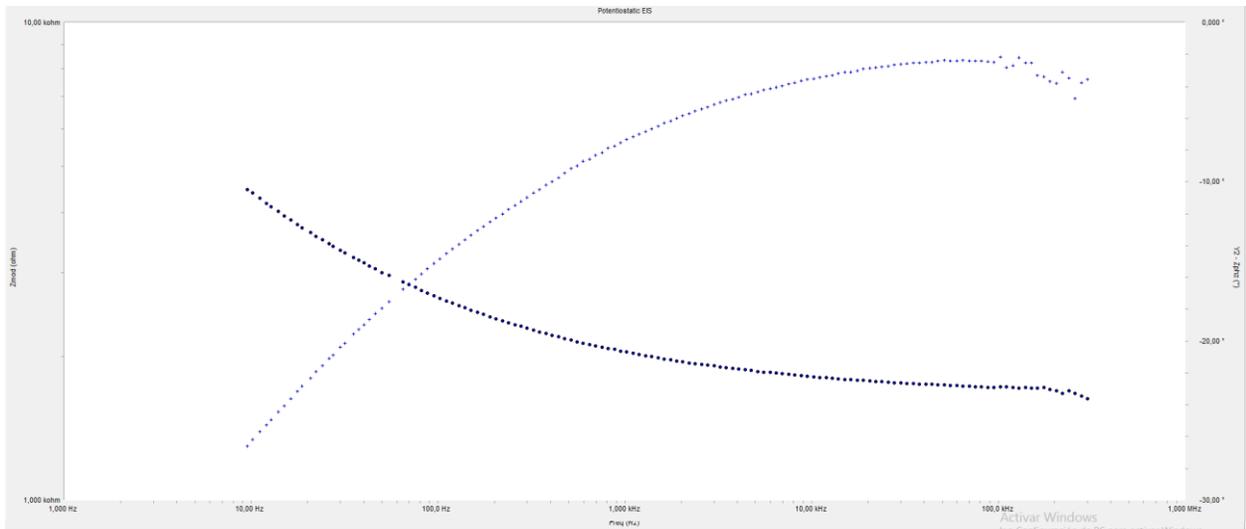


Ms 1,5 2 DÍAS BODE

OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

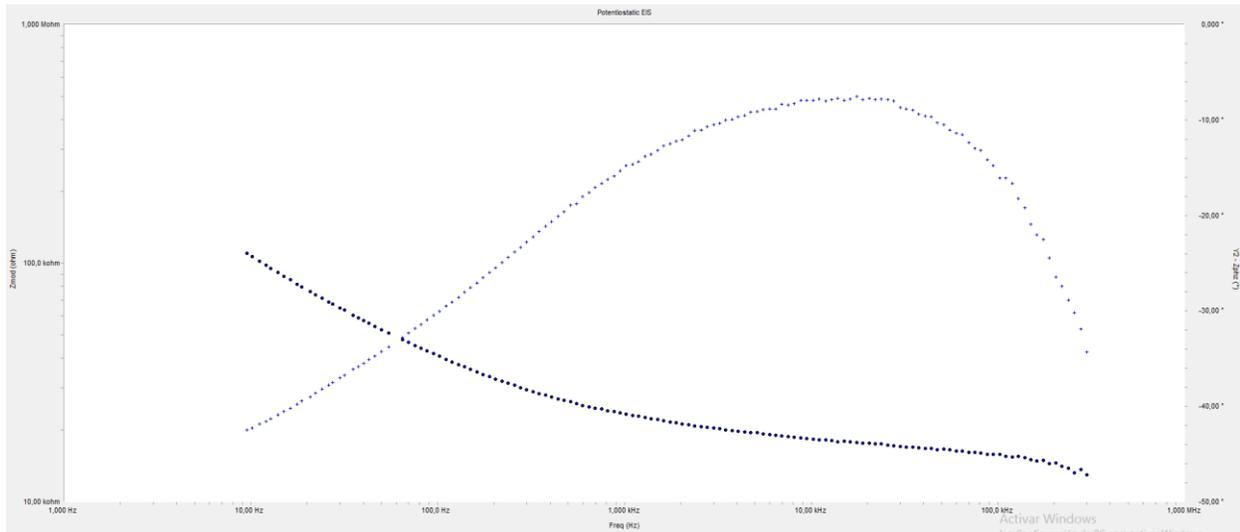


Ms 1,5 3 DÍAS BODE

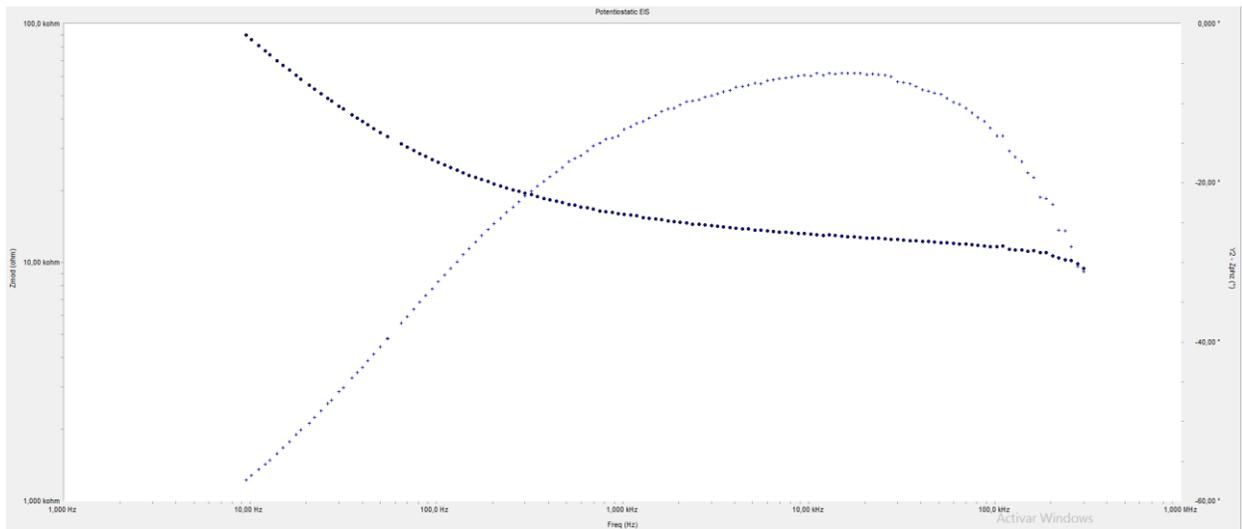


Ms 1,5 4 DÍAS BODE

# OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

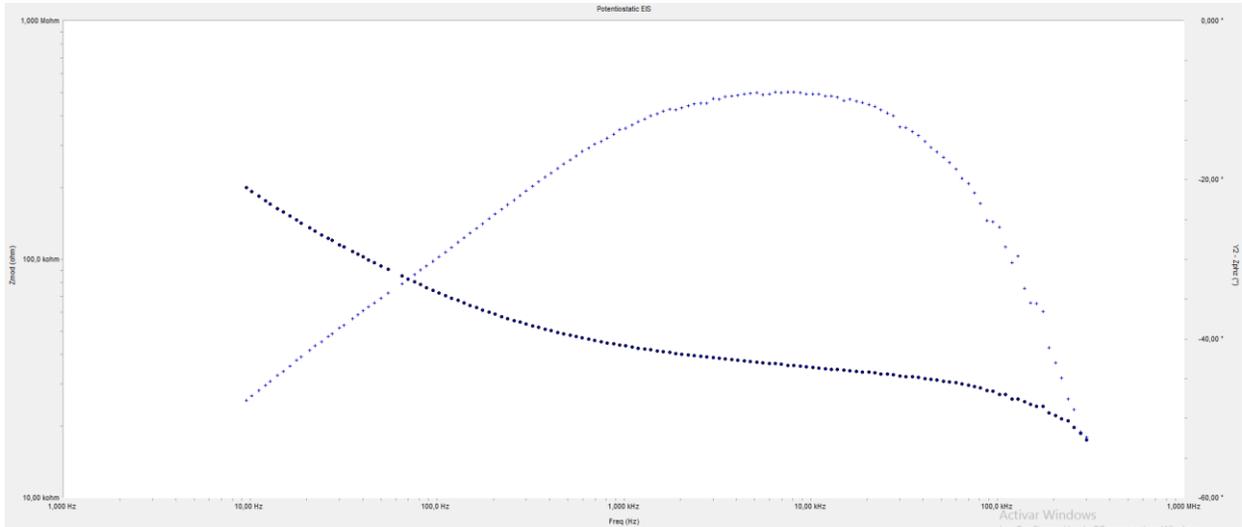


Ms 1,5 14 DÍAS BODE

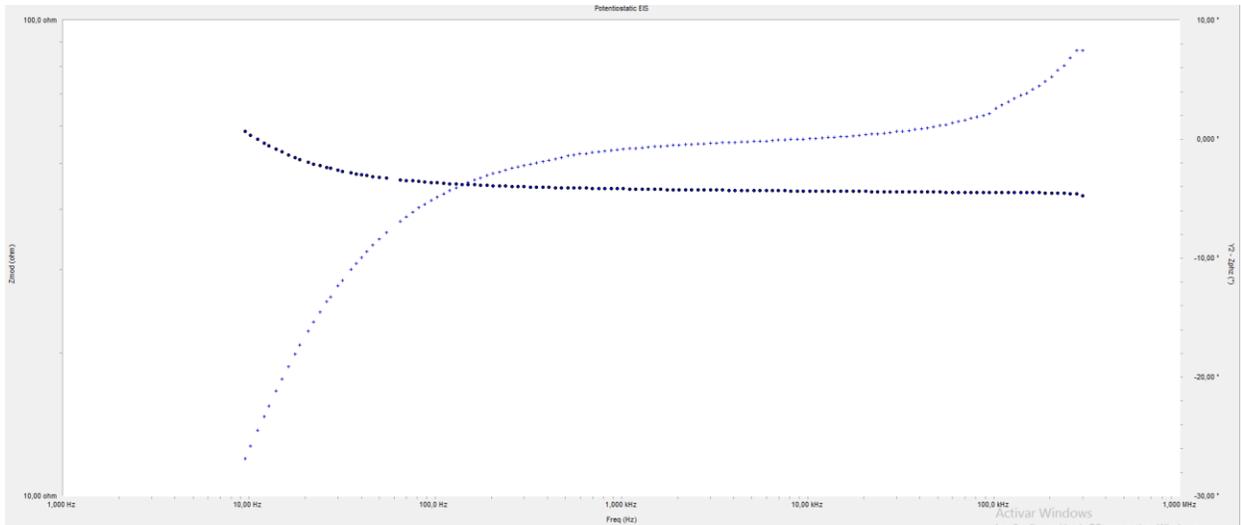


Ms 1,5 14 DÍAS CURADO BODE

OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

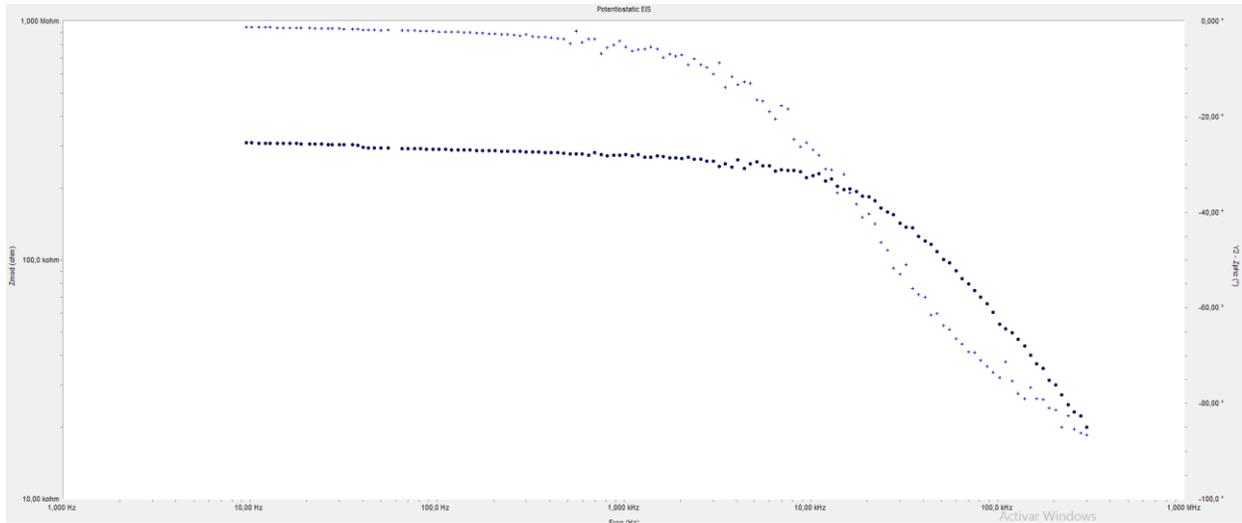


Ms 1,5 23 DÍAS BODE

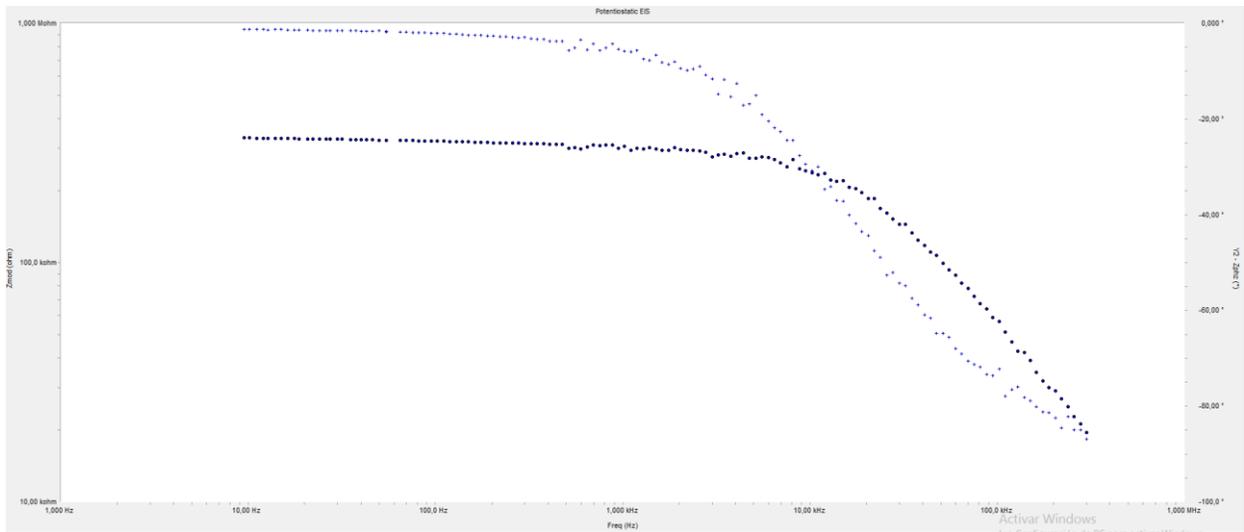


Ms 1,5 0 DÍAS BODE

# OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

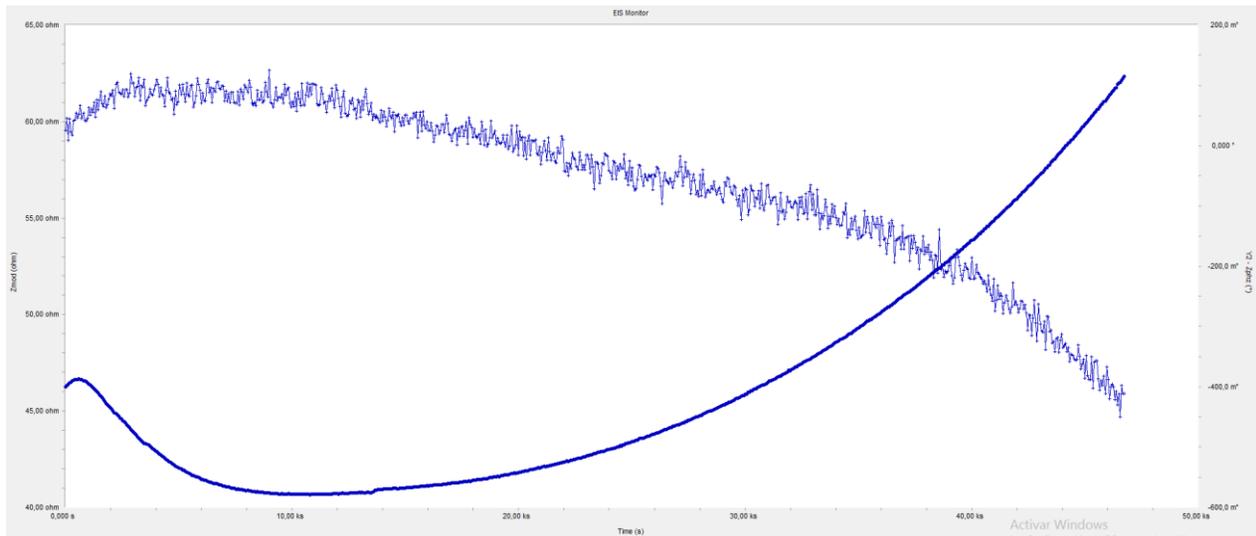


Ms 1,5 3 DÍAS BODE

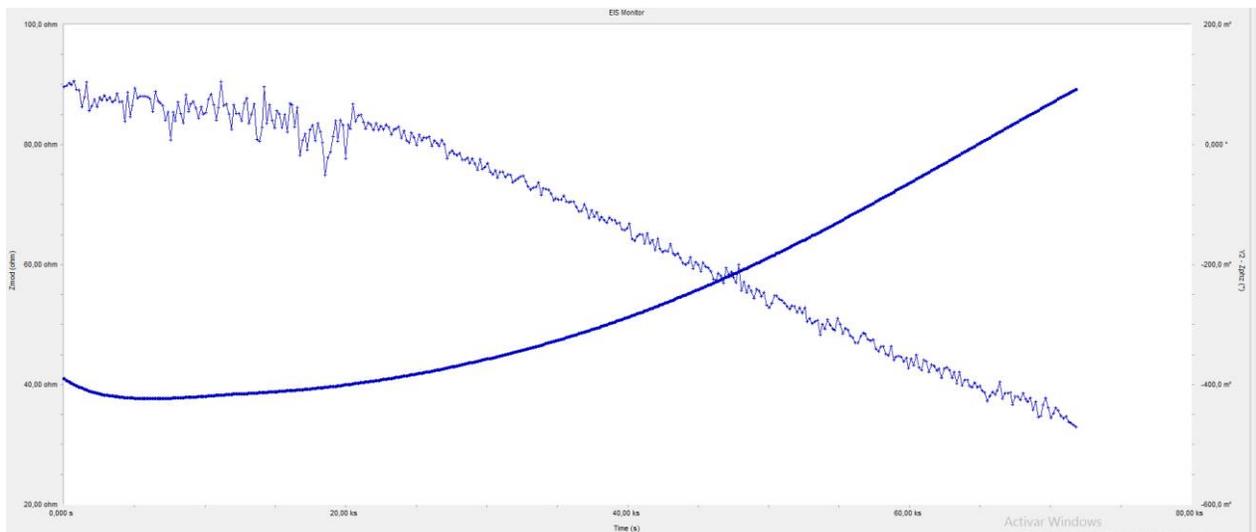


Ms 1,5 3 DÍAS B BODE

OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND

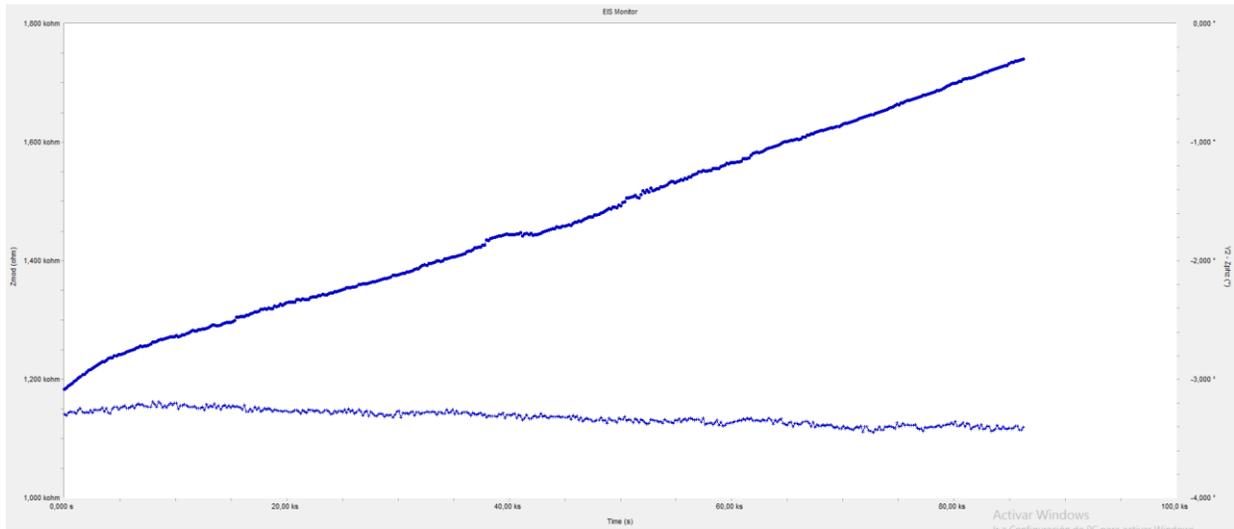


Ms 1,5 24 HORAS SINGLE

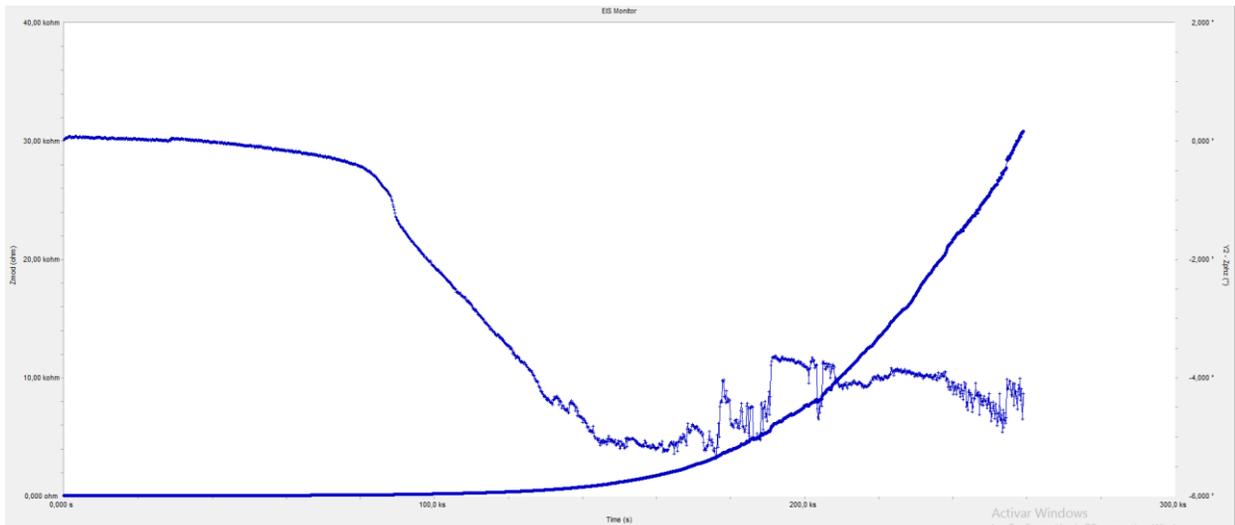


Ms 1,5 20 HORAS SINGLE

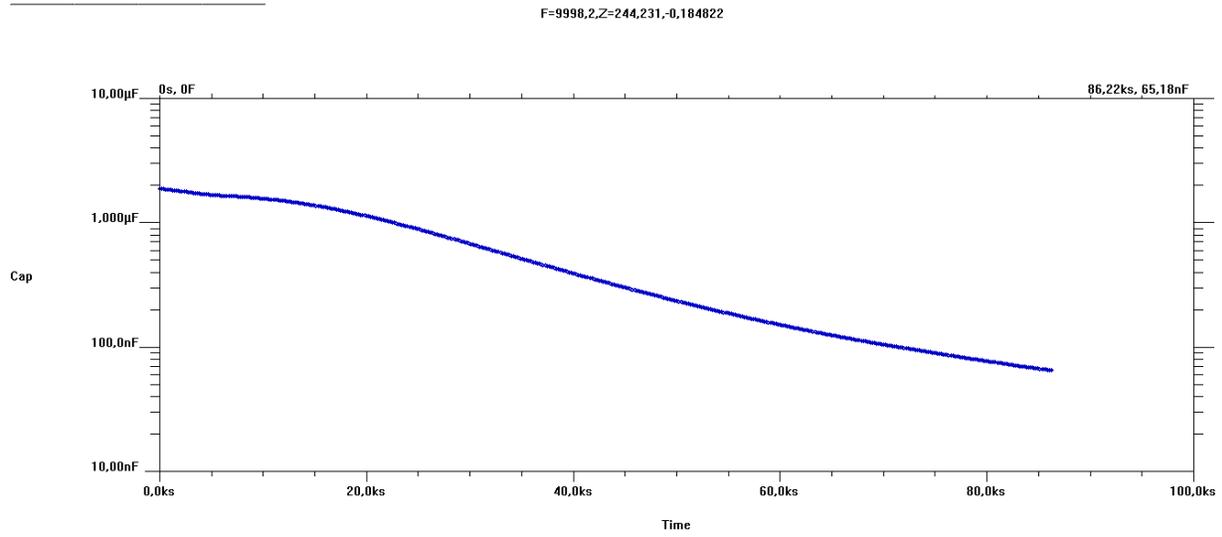
# OBTENCIÓN DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND



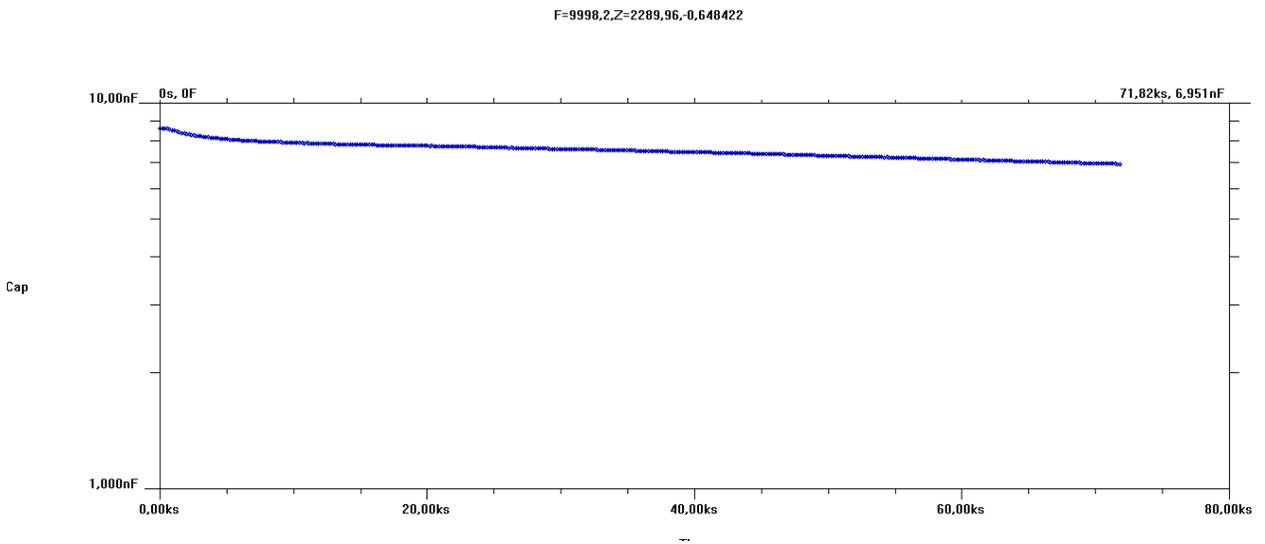
Ms 1,5 24 HORAS SINGLE



Ms 1,5 3 DÍAS CONTINUOS SINGLE

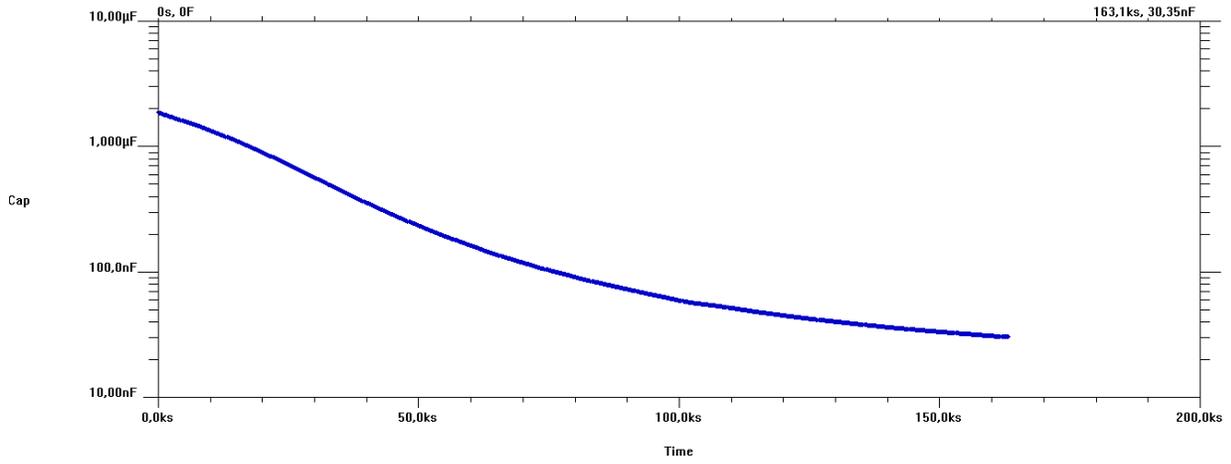


NaOH 1 DÍA Capacitancia



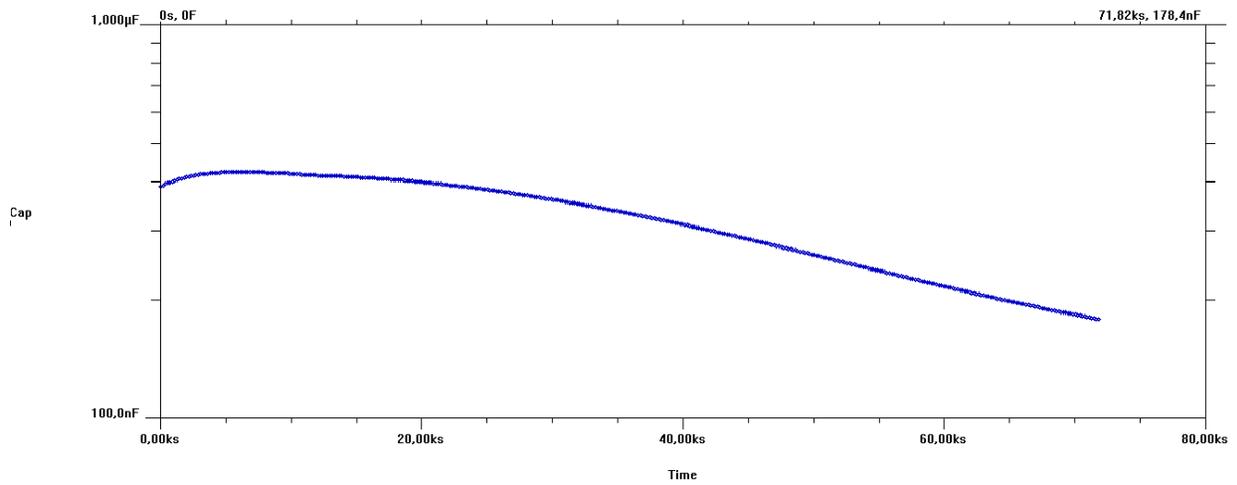
NaOH 3 DÍA Capacitancia

F=9998,2,Z=524,522,-0,220831

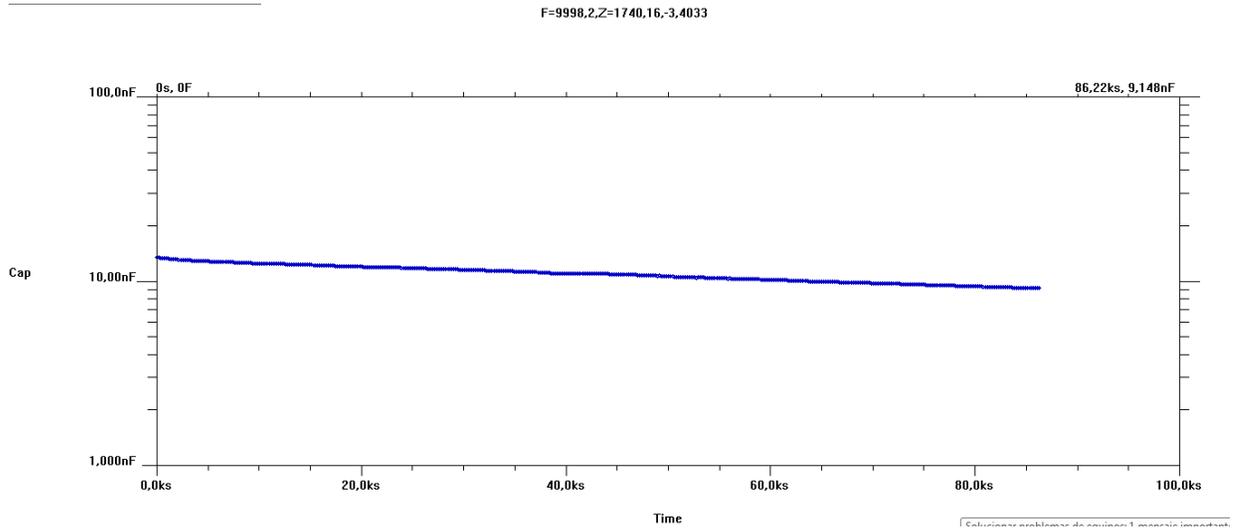


NaOH 3 DÍA Capacitancia

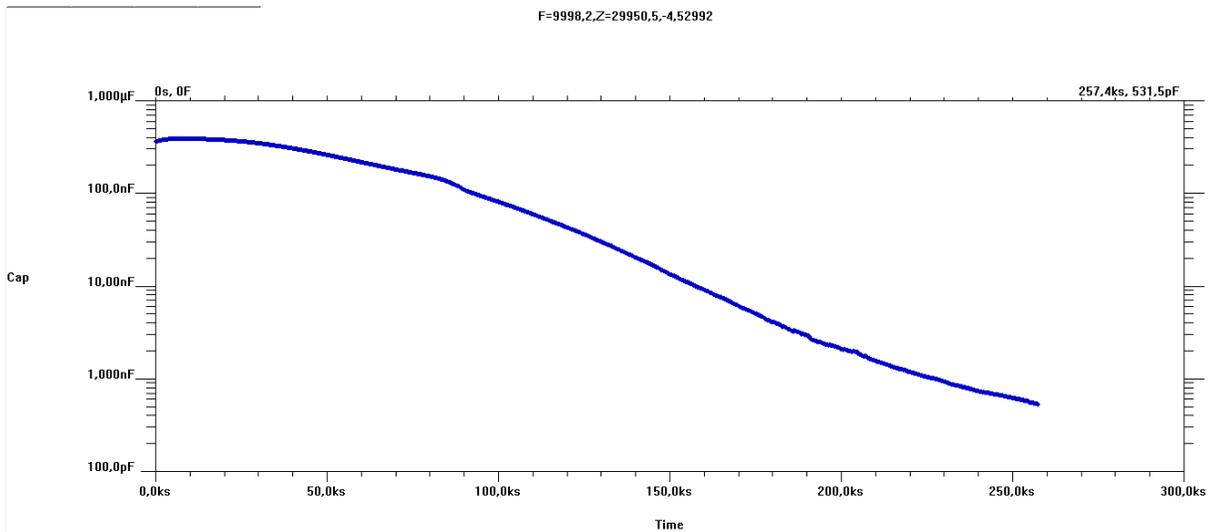
F=9998,2,Z=89,2104,-0,471228



Ms 1,5 1 DÍA Capacitancia



Ms 1,5 2 DÍA Capacitancia



Ms 1,5 3 DÍA Capacitancia

## 7. Referencias

- Aïtcin, P. (2000). Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and concrete research*, 30(9), 1349-1359.
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47(1), 55-62. Obtenido de [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00212-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00212-3)
- Andersson, R., & Gram, H. (1987). Properties of alkali activated slag concrete. *Nordic concrete research*, 6, 7-18.
- ASTM 618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Atiş, C., Bilim, C., Çelik, Ö., & Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23(1), 548-555.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35, 1233–1246.
- Bakharev, T. (2005b). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658-670.
- Bakharev, T., Sanjayan, J., & Cheng, Y. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1277-1283.
- Bao, Y., Grutzeck, M., & Jantzen, C. (2005). Preparation and Properties of Hydroceramic Waste Forms Made with Simulated Hanford Low-Activity Waste. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(12), 3287-3302.

- Barber, J. (1975). Solid Wastes from Phosphorus Production. En I. Mantell, *Solid Wastes: Origin, Collection, Processing, and Disposal* (págs. 927–947). New York: Interscience Publication, John Wiley & Sons.
- Barbosa, V. (1999). *Síntese e caracterização de polissialatos*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, V., MacKenzie, K., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate. . *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 309-317.
- Bin, Q., Wu, X., & Tang, M. (1989). An investigation on alkali-BFS-steel slag cement. *2nd Beijing International Symposium on Cements and Concretes* (págs. 288-294). Beijing: PR.
- Brough, A., & Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 865-879.
- Caijun Shi, P. (2006). *Alkali-activated cements and concretes*. London, UK: Taylor & Francis.
- Caijun, S., & Yinyu, L. (1989). Investigation on some factors affecting the characteristics of alkali-phosphorus slag cement. *Cement and Concrete Research*, 19(4), 527-533.
- Camp, P., & Bilotta, S. (1989). Dielectric properties of Portland cement paste as a function of time since mixing. *Journal of Applied Physics*, 66(12), 6007-6013.
- Chao Li, H. (2010). *A review: The comparison between alkali-activated slag (Si +Ca) and metacoalin and metakaolin (Si+Al) cements*. .
- Chassevent, L. (1937). *Hydraulicity of slags*. Paris.
- Chen, J., Thomas, J., Taylor, H., & Jennings, H. (2004). Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1499-1519.
- Chen, W., & Brouwers, H. (2007). The hydration of slag, part 2: reaction models for blended cement . *Journal of Materials Science*, 42(2), 444-464.

- Clarke, C. (1980). Zeolites: Take off for the Tuff Guys. *Industrial Minerals*, 21-32.
- Clifont, R. (1987). *Natural and synthetic zeolites, Washington: Bureau of Mines. Information Circular; 9140.*
- Cong, X., & Kirkpatrick, R. (1996).  $^{29}\text{Si}$  MAS NMR study of the structure of calcium silicate hydrate. *Advanced Cement Based Materials*, 3(3-4), 144-156.
- Coutinho, A. (1988). *De Sousa-Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. 2). Lisboa: LNEC.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., De La Torre, A., Aranda, M., & Palomo, A. (2007). An XRD study of the effect of the  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and concrete research*, 37(5), 671-679.
- Davidovits, J. (1981). *US Patente n° 4, 472.*
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials education*, 91-139.
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. *In First international conference on alkaline cements and concretes, 1*, 131-149.
- Davidovits, J. (2002). Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs . *In Keynote Conference, on Geopolymer Conference.*
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable. *Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer.* Geopolymer Institute.
- De la Llata, D. (2001). *Química inorgánica.* Ciudad de México: Progreso.

- Deja, J., & Malolepszy, J. (1994). Long-term resistance of alkali-activated slag Mortars to chloride solution (Supplementary Paper). *3rd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, (págs. 657–671). Nice, France.
- Douglas, E., & Brandstetr, J. (1990). A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag. *Cement and concrete research*, 20(5), 746-756.
- Douglas, E., & Mainwaring, P. (1985). Hydration and pozzolanic activity of nonferrous slags. *American Ceramic Society Bulletin*, 64(5), 700-706.
- Duchesne, J., & Be, M. (1995). Effect of supplementary cementing materials on the composition of cement hydration products. *Advanced Cement Based Materials*, 2(2), 43-52.
- Duxson, P., & Provis, J. (2008). Designing precursors for geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12), 3864-3869.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A., & Van Deventer, J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- Escalante, J. (2002). Materiales alternativos al cemento portland. *Avance y perspectiva*, 21, 79-88.
- Feng, N. (1993). Properties of Zeolite Mineral Admixture Concrete. En H. a. Sarkar, *Progress in Cement and Concrete. Mineral Admixture in Cement and Concrete* (págs. 396–447). New Delhi: ABI Books Pty. Ltd.
- Feret, R. (1939). Slags for the manufacture of cement. *Rev. Mater. Constr. Tr. Publications*, 1-145.
- Fernández, A., García, I., & Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3055-3065.

- Fernández-Jiménez, A. (2000). *Cementos de escorias activadas alcalinamente influencia de las variables y modelización del proceso*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, J. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35, 1984-1992.
- Fernández-Jiménez, A., & Puertas, F. (1997). Influence of the activator concentration on the kinetics of the alkaline activation process of a blastfurnace slag. *Materiales de Construcción*, 47(246), 31-42.
- Fernández-Jiménez, A., & Puertas, F. (2003). Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements. *Advances in cement research*, 15(3), 129-136.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous materials*, 91(1), 111-119. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J., & Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313- 1321.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, M., & Criado. (2004). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 20.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I., & Sanz, J. (2003). Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline 30 activator. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(8), 1389-1394. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03481.x>.
- Glukhovskiy, V. (1957). *Soil silicate-based products and structures*. Kiev, USSR: Kiev, USSR: Gosstroizdat Publish.

- Glukhovskiy, V., Rostovskaja, G., & Rumyna, G. (1980). High strength slag- alkaline cements. *In Proceedings of the 7th international congress on the chemistry of cement*, (págs. 164-168). París.
- Gu, P., & Beaudoin, J. (1996). Dielectric behaviour of hardened cement paste systems. *Journal of materials science letters*, 15(2), 182-184.
- Guo, J., & Liang, C. (1980). A study on reaction mechanisms of zeolite during the hydration of cement. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 8(3), 242–257.
- Haha, M., Le Saout, G., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2011). Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 301-310.
- Haha, M., Lothenbach, B., Le Saout, G., & Winnefeld, F. (2011). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 42, 74–83. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.005>.
- Haha, M., Lothenbach, B., Le Saout, G., & Winnefeld, F. (2012). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part II: Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 74-83. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.005>.
- Hakkinen, T. (1987). Durability of alkali-activated slag concrete. *Nordic concrete research*, 6, 81-94.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.). *Normas I.N.V.E-324-07 y I.N.V.E-327-07*.
- J.A.C.S. (75 [12], 3233–3240. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04416.x>. de 1992). Alkali-Metal and Alkaline-Earth Hydroxides. *Journal of the American Ceramic Society*,

- 3233–3240. Obtenido de Journal of the American Ceramic Society.:  
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb04416.x>.
- JR, V. (1970). *Inorg Macromol.* 1-89.
- Koch, A., & Steinegger, H. (1990). Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff. *Zement* 41, 7, 317-324.
- Krivenko, P. (1986). *Sintez vyazhushchih so special'nymi svojstvami v sisteme Me2O- MeO-Me2O3-SiO2-H2O*. Kyiv: KPI.
- Krivenko, P. (1986). *Synthesis of Cementitious Materials in a System R2O-Al2O3-SiO2-H2O with Required Properties*. Ukraine: DSc (Eng) Thesis, Kiev Civil Engineering Institute.
- Krivenko, P. (1994). Progress in alkaline cements. En K.P., *Proceedings of the 1st Inter. Conf. Alkaline cements and Concretes* (págs. 11-129). Kiev, Ukraine. .
- Krivenko, P., Skurchinskaya, Z., & Sultanov, A. (1984). Peculiarities of the processes of hydration and structure formation of the slag alkaline binders based on non-ferrous slags. II. National Conference on Slag Alkaline Cements. *Concretes and Structures (edited by Glukhovsky)*, 25-26.
- Kühl, H. (1930). *Zementchemie*.
- Lee, W., & Van Deventer, J. (2003). Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *Langmuir*, 19(21), 8726-8734. .
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated Slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341-1349.  
Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
- Li, D., & Wu, X. (1992). Improvement of early strength of steel slag cement. *Jiangsu Build. Mater*, 4, 24-27.

- Lippmaa, E., Mägi, M., Samoson, A., Engelhardt, G., & Grimmer, A. (1980). Structural studies of silicates by solid-state high-resolution silicon-29 NMR. *Journal of the American Chemical Society*, 102(15), 4889-4893.
- Loewenstein, W. (1954). The distribution of aluminum in the tetrahedra of silicates and aluminates. *American Mineralogist*, 39(1-2), 92-96.
- Londoño, M., & Pinto, A. (2015). *Perfil Logístico del Sector del Cemento en Colombia*. Bogotá: Universidad del Rosario. Obtenido de <https://goo.gl/E2zn7B>
- Macdonald, J., & Barsoukov, E. (2005). Impedance spectroscopy: theory experiment, and applications. *History*, 1(26).
- Malishev, G., Nikolaiev, Y., & Shuvalov. (1979). *Tecnología de los metales*. Moscú: Mir.
- Mallicoat, S. (2005). Advanced Ceramic Coatings and Ceramic-Metal Systems. En K.P, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. Dongming Zhu.
- Malolepszy, J., & Deja, J. (1999). Durability of alkali activated slag mortars and concrete. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 685-697.
- Martínez, L. (2008). *Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (fcc)*. Doctoral dissertation.
- McCormick, A., & Bell, A. (1989). The solution chemistry of zeolite .
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2008). *Concreto—Microestrutura, Propriedades e Materiais* (3ª edição ed.). São Paulo.
- Metha, P. (2007). *Concrete in the Marine Environment*. Taylor & Francis.
- Mozgawa, W., & Deja, J. (2009). Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 924-926, 434-441.

Neville, A. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman.

Neville, A. (1996). *Properties of concrete* (4th and final ed.) Addison Wesley Logman. Page, C.,

Short, N. R., & El Tarras, A. (1981). Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes.

*Cement and concrete research*, 11(3), 395-406.

Page, C., Short, N., & El Tarras, A. (1981). Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes.

*Cement and concrete research*, 11(3), 395-406.

Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2004). Alkaline

activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. *Journal of the American*

*Ceramic Society*, 87(6), 1141-1145. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551>

2916.2004.01141.x

Palomo, A., Blanco, M., Granizo, M., Puertas, F., Vázquez, T., & Grutzeck, W. (1999). Chemical

stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*.

*Cement and Concrete Research*, 29(7), 997-1004.

Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future.

*Cement and concrete research*, 1323-1329.

Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future.

*Cement and concrete research*, 29(8).

Palomo, A., Krivenko, P., García, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández, A. (2014). A

review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales en construcción*.

Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>

Petropavlovsky, O. (1987). *Slag alkaline binding systems and concretes based on steelmaking slag*

. Doctoral dissertation, Thesis , Kiev Civil Engineering Institute.

- Pinto, A. (2004). *Sistemas ligantes obtenido por activação alcalina do metacaulino*. Tese de doutorado .
- Pork, V. (1971). Glassy State. *Nauka*, 354-356.
- Provis, J., & Van Deventer, J. (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. EU: Woodhead Publishing.
- Provis, J., & Van Deventer, J. (2014). Alkali Activated Materials State-of-the-Art Report. *RILEM*.
- Puertas, F. (1995). Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. *Materiales de Construcción*, 239, 53-63.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J., Rico, A., & Rodríguez, J. (2014). CASH gels formed in alkali-activated slag cement pastes. Structure and effect on cement properties and durability. *MATEC Web Conferences*. 11, pág. 01002. EDP Sciences.
- Purdon, A. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society Of Chemical Industry*, 59(9), 191-202.
- Rahier, H., Van Mele, B., & Wastiels, J. (1996). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *Journal of Materials Science*, 31(1), 80-85.
- Richardson, I. (2004). Tobermorite/jennite-and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of CSH: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate,  $\beta$ - dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaoli. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1733-1777.
- Richardson, I., & Groves, G. (1997). The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends. *Journal of Materials Science*, 32(18), 4793-4802.

- Roper, H., Kam, F., & Auld, G. (1983). Characterization of a copper slag used in mine fill operations. *Special Publication*, 79, 1091-1110.
- Roy, D. (1989). Hydration, microstructure, and chloride diffusion of slag-cement pastes and mortars. *Special Publication*, 114, 1265-1282.
- Roy, D., Jiang, W., & Silsbee, M. (2000). Chloride diffusion in ordinary blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1879-1884.
- Ruíz, A., & Vaquero, J. (1989). Aplicaciones de las escorias de horno alto en la técnica de carreteras. *CEDEX Revista Ingeniería Civil*(71).
- Schilling, P., Butler, L., Roy, A., & Eaton, H. (1994). <sup>29</sup>Si and <sup>27</sup>Al MAS-NMR of NaOH-Activated Blast-Furnace Slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 77(9), 2363-2368.  
Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb04606.x>
- Schilling, P., Roy, A., Eaton, H., Malone, P., & Brabston, N. (1994). Microstructure, strength, and reaction products of ground granulated blast-furnace slag activated by highly concentrated NaOH solution. *Journal of materials research*, 9(1), 188-197.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642-650.
- Scrivener, K., & Kirkpatrick, R. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38, 128-136.
- Sersale, R. (1992). Tema IIA. *IX Congreso Internacional de la Química del Cemento*, 1, págs. 261-302. New Delhi.
- Shi, C. (1996). Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(12), 1789-1799.

- Shi, C. (2003). Corrosion resistance of alkali-activated slag cement. *Advances in cement research*, 15(2), 77-81.
- Shi, C. (2003). On the state and role of alkalis during the activation of alkali-activated slag cement. *In Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement*, (págs. 2097-2105). Durban (South Africa).
- Shi, C. (2004). Steel slag- its production, processing, characteristics and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- Shi, C. (2004). Steel slag- its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- Shi, C., & Day, R. (1995). A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1333-1346.
- Shi, C., & Day, R. (1996). Selectivity of alkaline activators for the activation of slags. *Cement, Concrete and Aggregate*, 8-14.
- Shi, C., & Li, Y. (1989). Investigation on some factors affecting the characteristics of alkali-phosphorus slag cement. *Cement and Concrete Research*, 19(4), 527-533.
- Shi, C., Day, R., Wu, X., & Tang, M. (1991). Uptake of metal ions by autoclaved cement pastes. In MRS Proceedings. *Cambridge University Press*, 245, 141.
- Shi, C., Jiménez, A., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
- Shi, C., Krivenko, P., & Roy, D. (2006). *Alkali-activated cements and concretes*. Taylor & Francis.
- Shi, C., Wu, X., & Tang, M. (1991). Hydration of alkali-slag cements at 150 C. *Cement and Concrete Research*, 21(1), 91-100.

- Shi, C., Wu, X., & Tang, M. (1993). Research on alkali-activated cementitious systems in China: a review. *Advances in Cement Research*, 5(17), 1-7.
- Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G., & Shter, G. (2003). The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 405-416.
- Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3), 392-400.
- Sofi, M., Van Deventer, S., & Mendis, A. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 37(2).
- Song, S., Sohn, D., Jennings, H., & Mason, T. (2000). Hydration of alkali- activated ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Science*, 249-257.
- Song, X. (2007). *Development and performance of class F fly ash based geopolymer concretes against sulphuric acid attack*. Australia: The University of New South Wales Sydney.
- Sun, W., Lui, M., & Wei, R. (1984). A study on the use of granulated phosphorus slag as a cement replacement. *Cement (in Chinese)*, 3, 23-38.
- Swanepoel, J., & Strydom, C. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Talling, B., & Brandstetr, J. (1989). Present state and future of alkali-activated slag concretes. *Special Publication*, 114, 1519-1546.
- Tashima, M. (2012). *Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del silicoaluminato calcico vitreo (VCAS)*. Doctoral dissertation.
- Taylor, H. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford.
- Teoreanu. (1991). I.: II cemento. (2), 91-97.

- Thomas, J., & Klinowski, J. (1995). The study of aluminosilicate and related catalysts by high-resolution solid-state NMR spectroscopy. *Advances in catalysis*, 33, 199-374.
- Van Jaarsveld, J., & Van Deventer, J. (1999). Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. *Industrial & engineering chemistry research*, 38(10), 3932-3941.
- Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J., & Schwartzman, A. (1999). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching. *Minerals Engineering*, 12, 75-91.
- Vanderley, J. (1995). *Blast furnace slag cements activated with waterglass*. PHD thesis, Universidade of Sao Paulo, [Only in Portuguese].
- Velandia, D., Bernabeu, J., & Balbuena, J. (2006). *Caracterización y*.
- Wang, S. (1991). Review of recent research on alkali-activated concrete in China. *Magazine of concrete research*, 43(154), 29-35.
- Wang, S. (1995). Imperial College. London: Alkaline activation of slag.
- Wang, S., & Scrivener, K. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 25(3), 561-571. Obtenido de [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00045-E](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00045-E)
- Wang, S., Scrivener, K., & Pratt, P. (1994). *Factors affecting the strength of alkali-*.
- Wang, S., Scrivener, K., & Pratt, P. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and concrete research*, 24(6), 1033-1043.
- Wastiels, J., Wu, S., & Patfoort, G. (1993). Mineral polymer based on fly ash. *9th International Conference on Solid Waste Managemen*. Philadelphia, USA : Widener University.

Xu, H., & Van Deventer, J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.

Xu, H., & Van Deventer, J. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 15(12), 1131-1139.

Zachariasen, W. (1932). The atomic arrangement in glass. *Journal of the American Chemical Society*, 54(10), 3841-3851.

