

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN GEOPOLIMERO  
ELABORADO A PARTIR DE BENTONITA PARA SER USADO COMO AGENTE  
CEMENTANTE ALTERNATIVO AL PORTLAND**

**CLAUDIA ROYERO MONTEJO**

**JENNY PÉREZ MEDINA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2012**

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN GEOPOLIMERO  
ELABORADO A PARTIR DE BENTONITA PARA SER USADO COMO AGENTE  
CEMENTANTE ALTERNATIVO AL PORTLAND.**

**CLAUDIA JULIETH ROYERO MONTEJO**

**JENNY MARCELA PERÉZ MEDINA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
QUÍMICO**

**Director:  
ANGELA MONTAÑO  
Químico, Ph. D.**

**Codirector:  
JOSE CARLOS GUTIERREZ  
Químico**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2012**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 General.	14
1.1.2 Específicos	14
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
1.4 HIPÓTESIS	16
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1 ESTADO DEL ARTE	17
2.2 MARCO TEÓRICO	21
2.2.1 Bentonita.	21
2.2.2 Geopolímeros.	24
2.2.3 Geopolimerización.	27
2.2.3.1 Influencia del silicato soluble en la reacción de geopolimerización	29
2.2.3.2 Importancia de la presencia de cationes Na, K y Ca	30
2.2.3.3 Efecto de la temperatura de curado y tiempo de envejecimiento	30
2.2.3.4 Ventajas y desventajas del uso de geopolímeros	30
2.2.4 Concreto.	31
2.2.5 Concreto reforzado.	32
2.2.6 Cemento.	33
2.2.6.1 Tipos de cementos.	34
2.2.6.2 Producción del cemento	36
2.2.7 Agua.	36
2.2.8 Arena.	36
2.2.9 Agregado grueso.	37
2.2.10 Corrosión.	37

2.3 TÉCNICAS A UTILIZAR	39
2.3.1 Difracción de Rayos X.	40
2.3.2 Resistencia del concreto endurecido [5].	41
2.3.3 Ataque de sulfatos.	41
2.3.4 Ataque por ácido.	42
2.3.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)	42
3. PARTE EXPERIMENTAL	47
3.1 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LA BENTONITA	47
3.1.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier.	47
3.1.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.	47
3.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO	48
3.2.1 Metodología para la obtención del geopolimero a partir de bentonita	51
3.3 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO	51
3.3.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.	51
3.3.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.	51
3.4 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO	52
3.4.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.	52
3.4.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.	52
3.5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	53
3.5.1 Diseño De La Mezcla.	54
3.5.2 Construcción De Las Probetas.	56
3.5.3 Proceso De Fraguado.	58
3.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO	59
3.6.1 Mecánica	59
3.6.1.2 Resistencia a la Compresión.	59
3.6.2 Química	60
3.6.2.1 Resistencia a los sulfatos	60
3.6.2.2 Resistencia a los ácidos	61
3.7 ELÉCTRICAS	62
3.7.1 Elaboración de las celdas electroquímicas	62

3.7.2 Seguimiento Del Proceso De Corrosión	63
3.7.3 Espectroscopia De Impedancia Electroquímica (EIS).	64
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
4.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA BENTONITA	66
4.1.1 Difracción De Rayos X.	66
4.1.2 Caracterización por Espectroscopia Infrarroja de la Bentonita.	68
4.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO	69
4.3 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO	71
4.3.1 Análisis Por Difracción De Rayos X	71
4.3.2 Caracterización Por Espectroscopia Infrarroja Del Geopolímero.	73
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO	75
4.4.1 Resistencia a la compresión.	75
4.4.2 Análisis Eléctrico	77
4.4.2.1 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.	77
4.4.2.2 Descripción del circuito equivalente propuesto	80
4.4.3 Análisis Químico	84
4.4.3.1 Resistencia a los Sulfatos.	84
4.4.3.2 Resistencia a Ácidos.	86
5. CONCLUSIONES	88
6. RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	96

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura de la bentonita	22
Figura 2. Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS por Barbosa.	26
Figura 3. Esquema del proceso de corrosión en presencia de cloruros.	38
Figura 4. Gráfica de Nyquist-EIS	44
Figura 5. Circuito eléctrico equivalente sencillo	45
Figura 6. Bentonita	47
Figura 7. Mezcla de los componentes	49
Figura 8. Pasta obtenida después de la mezcla	50
Figura 9. Geopolimero triturado	50
Figura 10. Agregado grueso	53
Figura 11. Agregado fino	53
Figura 11. Tubos de PVC usados como moldes	56
Figura 12. Preparación de la mezcla	57
Figura 13. Construcción probeta	57
Figura 14. Proceso de elaboración de las probetas	57
Figura 15. Probetas en proceso de secado y Desmoldado	58
Figura 16. Probetas en tiempo de fraguado	58
Figura 17. Prueba de Resistencia a la compresión. Maquina Universal de Ensayos INSOLTEC LTDA	60
Figura 18. Imagen de las muestras de las probetas.	61
Figura 19. Imagen de las muestras de probetas sumergidas en acido sulfúrico.	62
Figura 20. Probetas fabricadas para el proceso de corrosión	63
Figura 21. Probetas expuestas a ambiente corrosivo con flujo constante de oxigeno	63
Figura 22. Probeta con sus respectivas conexiones	64
Figura 23. Montaje para Espectroscopia de Impedancia.	65
Figura 24. Perfil de difracción de la Bentonita	67
Figura 25. Espectro infrarrojo de la bentonita	68

Figura 26. Geopolimero sintetizado	71
Figura 27. Perfil de difracción del geopolimero sintetizado a base de bentonita	72
Figura 28. Espectro infrarrojo del geopolimero	74
Figura 29. Resistencia a la compresión para las probetas con sustituciones de geopolimero y probetas de referencia	76
Figura 30. Diagrama de Nyquist de la probeta M0 a diferentes tiempos de inmersión	78
Figura 31. Diagrama de Nyquist de la probeta M1 a diferentes tiempos de inmersión	78
Figura 32. Diagrama de Nyquist de la probeta M2 a diferentes tiempos de inmersión	79
Figura 33. Diagrama de Nyquist de la probeta M3 a diferentes tiempos de inmersión.	79
Figura 34. Circuito equivalente para las probetas M0 y M3 (día 0)	80
Figura 35. Circuito equivalente para el Día 15 M3	82
Figura 36. Muestras de probetas desgastadas por la solución saturada de sulfato de sodio	86
Figura 37. Muestras de probetas desgastadas por la solución ácido sulfúrico.	87

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de esmectitas	23
Tabla 2. Clasificación de las estructuras de polisialatos con sus respectivas aplicaciones	25
Tabla 3. Componentes fundamentales del cemento portland	34
Tabla 4. Numerar Composición Química del cemento Portland	35
Tabla 5. Condiciones de medida para el análisis por DRX.	48
Tabla 6. Propiedades químicas y físicas de $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ suministrado por Conquímica S.A	49
Tabla 7. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas de referencia.	54
Tabla 8. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas con sustitución de cemento por geopolimero.	55
Tabla 9. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas para pruebas electroquímicas, con sustitución de cemento por geopolimero	55
Tabla 10. Fases cristalinas de la bentonita.	66
Tabla 11. Tabla de las bandas características del geopolimero	68
Tabla 12. Fases cristalinas del geopolimero	71
Tabla 13. Tabla de las bandas características del geopolimero	73
Tabla 14. Valores de resistencia y capacitancia para M3 día 0	81
Tabla 15. Valores de resistencia y capacitancia para M0 día 0	82
Tabla 16. Valores de resistencia y capacitancia para M3 día 15	83
Tabla 17. Valores de resistencia y capacitancia para M0 día 15	84
Tabla 18. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .	85
Tabla 19. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con $\text{H}_2\text{SO}_4$ .	87

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ESPECTRO IR DEL CEMENTO	96
ANEXO B. DIFRACTOGRAMA DEL CEMENTO	97
ANEXO C. TABLA DE LOS MINERALES ENCONTRADOS EN EL CEMENTO.	99
ANEXO D. ESPECTRO ATR DE LA BENTONITA.	100
ANEXO E. ESPECTRO ATR DEL GEOPOLIMERO	101
ANEXO F. ESPECTRO DE LA BENTONITA Y EL GEOPOLIMERO	102

## RESUMEN

**TITULO: SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN GEOPOLIMERO ELABORADO A PARTIR DE BENTONITA PARA SER USADO COMO AGENTE CEMENTANTE ALTERNATIVO AL PORTLAND\*.**

**AUTORES:**Royero, C. Pérez, J. \*\*

**PALABRAS CLAVES:**Geopolimeros, bentonita, activación alcalina.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente trabajo de investigación está enfocado a evaluar el desempeño de materiales geopoliméricos cementantes, geopolimeros (polímeros inorgánicos); dichos materiales geopoliméricos son una nueva clase de materiales cerámicos considerados revolucionarios debido a las ventajas técnicas que exhiben. Se sintetizan a partir del uso de minerales ricos en aluminio y silicio como la Bentonita. Durante el proceso de geopolimerización se realizó la activación alcalina de los aluminosilicatos presentes en la bentonita empleando como agentes activantes el silicato de sodio comercial (pH básico) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Con el fin de realizar su caracterización estructural, se hicieron análisis por Difracción de Rayos X y análisis por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier. Para evaluar el comportamiento y durabilidad de los cementos geopoliméricos, es decir, el geopolimero obtenido, se emplearon pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a ataque con ácido y ataque con sulfatos, y pruebas electroquímicas para determinar su resistencia a la corrosión por medio de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS); análisis los cuales se realizaron a probetas de concreto elaboradas a partir del geopolimero obtenido, usandolo para sustituir parcialmente el cemento en un pequeño porcentaje.

El proceso de geopolimerización es una manera viable para transformar y dar valor agregado a estos minerales, dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, alta inercia química y una alta durabilidad en el tiempo, además de contribuir a la disminución del impacto ambiental como consecuencia del tipo de materias primas a partir de las cuales se obtienen.

---

\*Trabajo de grado, modalidad investigación

\*\*Facultad de Ciencia, Escuela de Química. Director: Ph. D Angela. Montaña. Co-Director: químico Jose C. Gutierrez. Co-Director: Claudia. González.

## ABSTRACT

**TITLE:** SYNTHESIS AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF A GEOPOLYMER FROM BENTONITE PREPARED FOR USE AS ALTERNATIVE TO PORTLAND CEMENTING AGENT \*.

**AUTHORS:** Royero, C. Pérez, J. \*\*

**KEYWORDS:** Geopolymer, bentonite, alkaline activation.

### DESCRIPTION

This research study is aimed at evaluating the performance of cementitious materials geopolymers, geopolymers, (inorganic polymers); geopolymers such materials are a new class of ceramic materials considered revolutionary because of the technical advantages they exhibit. Synthesized from the use of aluminum-rich minerals such as bentonite and silicon. During the geopolymerization process of aluminosilicate present in the bentonite was necessary the use of activating agents, like commercial sodium silicate (basic pH) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), in the alkali activation of aluminosilicates.

In order to perform its structural characterization, analysis was made by X-ray diffraction analysis and Infrared Spectroscopy Fourier Transform. To assess the performance and durability of geopolymeric cements, namely geopolymer obtained tests were used compressive strength, resistance to acid and sulfate attack, and Electrochemical tests to determine their corrosion resistance by means of the technique electrochemical impedance spectroscopy (EIS); analyzes which were performed on samples of concrete made from geopolymer obtained, using it to partially replace cement in a small percentage.

Geopolymerization process is a viable way to transform and add value to these minerals, resulting in materials with high mechanical strength, high chemical inertness and high durability over time and contribute to the reduction of environmental impacts as a result of the type of raw materials from which are obtained.

---

\*Degree project, research modality

\*\*Faculty of science, Chemistry School. Director: Ph. D Angela. Montaña. Co-Director: químico Jose C. Gutierrez. Co-Director: Claudia. González.

## INTRODUCCIÓN

El uso de cemento portland ha aumentado en los últimos años debido al constante crecimiento poblacional, creando así un problema ya que la producción de este es una de las prácticas más contaminantes en la industria; provoca una amenaza constante para el medio ambiente por la deliberada emisión de gases de invernadero en el proceso de obtención del clinker. La producción de una tonelada de cemento libera cerca de una tonelada de CO<sub>2</sub> y otros gases que están asociados a la descarbonatación de la caliza en el horno de clinkerización, así como la quema de combustibles fósiles y el alto consumo de recursos no renovables. Esto hace que crezca el interés de grupos de investigación e industrias cementeras en buscar soluciones eficaces y que protejan el medio ambiente, utilizando como materia prima recursos naturales renovables o residuos industriales de aluminosilicatos.

La Geopolimerización surge como una buena opción para procesar y agregar valor a los residuos industriales y recursos naturales renovables, dando lugar a materiales con elevados valores de resistencia mecánica, esta es por supuesto dependiente de la composición mineralógica, de la relación sílice/ alúmina, de la concentración de álcalis, de la morfología del reactivo y de la superficie específica.

[1]

El término geopolimero (polímero inorgánico) fue aplicado por Joseph Davidovits [2] en los años 80 del siglo XX, primeramente, para definir polímeros sintéticos inorgánicos a través de síntesis hidrotérmicas por aluminosilicatos en presencia de soluciones de concentración alcalina (geopolimerización). Se lleva a cabo entonces una reacción química de minerales (geosíntesis) cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alúmina (silicoaluminatos), y que presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina

(sustancia activante) la cual debe estar constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica. La alcalinidad de las soluciones activantes induce a que cierta cantidad de átomos de Si y Al se disuelvan o se hidrolicen a partir de la fuente primaria de aluminosilicatos, para formar geonómeros (monómeros inorgánicos) en la solución y luego ser policondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales. [3]

En este trabajo la bentonita se transformará en geopolímero mediante la activación alcalina, dicho geopolímero se caracterizará estructuralmente. Posteriormente se sustituirá cemento portland parcialmente por el geopolímero obtenido para finalmente determinar las propiedades mecánicas, químicas y eléctricas del geoconcreto preparado.

# 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 OBJETIVOS

**1.1.1 General.** Obtención y evaluación de un geopolímero para ser utilizado como agente cementante.

### 1.1.2 Específicos

- ✓ Caracterizar estructuralmente la bentonita.
- ✓ Determinar las condiciones de reacción para la óptima elaboración del geopolímero.
- ✓ Obtener el geopolímero a partir de la bentonita.
- ✓ Caracterizar estructuralmente el geopolímero obtenido.
- ✓ Establecer la proporción de geopolímero, cemento y arena para la preparación de probetas de concreto.
- ✓ Evaluar las propiedades mecánicas de los geopolímeros a partir de la resistencia a la compresión.
- ✓ Evaluar la durabilidad de los geopolímeros a partir de pruebas químicas como la resistencia al ataque con ácidos y sulfatos, y pruebas eléctricas del concreto.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cemento portland es uno de los materiales más utilizados en la producción de concreto debido especialmente a sus buenas propiedades mecánicas y bajo costo.

En la actualidad se estima que a nivel mundial se fabrican anualmente aproximadamente  $1.8 \cdot 10^9$  toneladas de cemento [12]. Sin embargo, su producción es una de las prácticas más contaminantes ya que alrededor del 5% de la contaminación atmosférica es atribuida a este tipo de industria. Estos sistemas cementantes han servido adecuadamente, pero tienen algunos inconvenientes como el gran consumo de energía que supone su síntesis.

Otro gran problema que afecta seriamente al sector de construcción a nivel mundial es la corrosión del acero en las estructuras de concreto; dichas estructuras están reforzadas con varillas de acero las cuales le aportan muy buenas propiedades de resistencia, pero con el paso del tiempo las varillas presentan una formación de óxido o corrosión lo cual es la causa de la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero lo que conlleva a su deterioro.

La corrosión puede ser inducida por muchas causas, una de ellas es por la permeación de los iones cloruro presentes en el agua de mar. Dicho inconveniente se presenta en estructuras expuestas al medio marino. Los iones cloruro avanzan desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla de acero; una vez llegan al acero se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión.[34]

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

A nivel mundial la industria del concreto junto con diversos grupos de investigación busca implementar el uso de materias primas que favorezcan el desarrollo sostenible con una baja emisión de gases de efecto invernadero y el correcto aprovechamiento de los recursos naturales con el fin de conservar y proteger los recursos no renovables. Es en este sentido, que la sustitución parcial o total de cemento por diferentes tipos de minerales naturales, como la bentonita, en

mezclas de concreto se ha convertido en una excelente alternativa para la disminución del impacto ambiental.

Estos geopolímeros han resultado también como una alternativa para evitar la corrosión del acero en el concreto; la adición de mayores cantidades de estos materiales, tales como cenizas volantes, escorias u otros productos cementantes, reducen la permeabilidad del concreto a la penetración de los iones cloruro.

Así mismo, los geopolímeros ayudan al mejoramiento de los procesos de producción y calidad del concreto, ya que han presentado buenas propiedades cementantes con gran desempeño mecánico y altos valores de resistencia.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

Al efectuar la geosíntesis del aluminosilicato bentonita para la preparación del concreto, se obtendrá una baja emisión de los gases causantes del efecto de invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ ) y un aumento en las propiedades mecánicas, químicas y eléctricas.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

Los griegos fueron los primeros en utilizar la cal obtenida por la descomposición del  $\text{CaCO}_3$  para elaborar morteros de cal, mientras que los romanos adoptaron esta tecnología para elaborar morteros con base en una mezcla de cal y arena. El mejor comportamiento de las construcciones romanas y la elevada resistencia de los morteros obtenidos en estas edificaciones fueron atribuidas en principio a un secreto de los constructores relativo a la composición de las mezclas o de la cal. Sin embargo, Rondelet concluyó que la excelente calidad de los morteros se debía a los cuidadosos procedimientos de mezclado y compactación usados, que permitían obtener un material con una textura muy cerrada de tal modo que en su interior permanecían cantidades de cal sin carbonatar, evidenciando así la impermeabilidad a los gases que tenían los morteros.

Hace más de dos milenios, los griegos y los romanos también utilizaron ciertos materiales provenientes de depósitos volcánicos que cuando eran molidos finamente e incorporados a la mezcla de cal y arena, proporcionaban una mejor resistencia y un mejor comportamiento frente a la acción del agua. La mayor resistencia de los morteros elaborados inicialmente por los griegos es atribuida a la utilización de una piedra caliza de menor pureza que la usada por los Romanos [3]. Luego, los griegos comenzaron a emplear un material volcánico proveniente de la Isla de Thera (actualmente conocida como tierra de Santorin), para elaborar morteros impermeables capaces de limitar el ingreso del agua y de sales y los efectos de la congelación. Para los romanos el empleo de materiales de origen volcánico en los morteros tenía como principal objetivo lograr una mayor resistencia y trabajabilidad [3]. Empleaban un material volcánico de color variable entre rojizo y púrpura obtenido en las cercanías de la Bahía de Nápoles. La mejor

variedad de este material provenía de los alrededores de Pozzoli o Pozzuoli, del cual derivó el nombre de puzolana.

La activación alcalina fue descubierta inicialmente por Purdon O. [32], a través del estudio del efecto que tiene la incorporación de hidróxido de sodio (NaOH) sobre una variedad de minerales que estaban constituidos por Si y/o Al fundamentalmente. Purdon O. [32] propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria (basada en un 41% de CaO, 30% de SiO<sub>2</sub> y 20.5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) activada alcalinamente con NaOH (del 5.5 % al 7.5%) involucra la disolución de Si y Al y precipitación de silicato cálcico hidratado (CSH) o aluminatos hidratados, obteniendo una resistencia de 27 MPa a un día de curado y 72 MPa a 5 años. No obstante, Glukhovskiy V.D. [33] es reconocido como el investigador que sentó las bases teóricas de cementos alcalinos basados en materias primas con altos contenidos de calcio. En sus reportes propone que el mecanismo general el cual permite describir la activación alcalina se basaba fundamentalmente en tres etapas: 1) disolución/hidrólisis; 2) reorganización/condensación y 3) policondensación / gelación.

Joseph Davidovits en 1978, implementó el término geopolímeros para designar una nueva clase de polímeros inorgánicos, los cuales estaban constituidos por una red tridimensional de aluminosilicatos. El proceso de polimerización involucra una reacción química bajo condiciones altamente alcalinas en minerales ricos en Al y Si produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O [2].

Desde hace algunos años se ha puesto un especial interés sobre la necesidad de crear conciencia hacia la seguridad del medioambiente. El aumento del consumo y el posterior aumento de la producción industrial han llevado a una disminución rápida de los recursos naturales disponibles y, al mismo tiempo se ha incrementado el volumen de residuos que se generan. Investigaciones recientes han demostrado que la geopolimerización surge como una forma viable para

transformar estos residuos en nuevos productos y valorizarlos como materias primas; estos residuos industriales de aluminosilicatos dan lugar a materiales de bajo impacto ambiental y con elevadas resistencias mecánicas [15].

Los aluminosilicatos empleados para la obtención de los geopolímeros, son activados con un agente alcalino, presentándose una transición en los ligandos inorgánicos. Los productos que se forman durante la activación alcalina de los aluminosilicatos, presentan fases cristalinas y amorfas; las cristalinas son analizadas por difracción de rayos X. Estos materiales presentan una excelente resistencia a la acción corrosiva de las soluciones de sal, poseen altos valores de fuerza y una buena resistencia a las heladas, además, pueden soportar la exposición a temperaturas de hasta unos 600 °C.

Las investigaciones realizadas por Xu, Van Deventer y Lukey, han demostrado que el uso de estilbita como fuente de aluminosilicatos, presenta efecto sobre el grado de geopolimerización. La disolución del silicato de aluminio y las especies estilbita/caolinita aumenta la resistencia a la compresión del geopolímero. La dispersión homogénea condensada de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  es el principal responsable del éxito de la geopolimerización [8, 10].

Van Jaarsveld y Van Deventer [9] demuestran que los cationes metálicos alcalinos y alcalinotérreos presentes durante la formación de estructuras de aluminosilicatos, tienen un efecto muy importante en las propiedades físicas y químicas del geopolímero, efectos analizados en geopolímeros sintetizados a partir de cenizas volantes, a través de medidas geológicas, resistencia a la compresión y análisis estructural [9,14].

Con el progreso de los conocimientos referidos a la química del cemento y la mejora en los sistemas de producción, se produjo el desarrollo de los cementos con características especiales, tales como los de alta resistencia inicial, los

resistentes a los sulfatos, los resistentes a la reacción álcali-sílice, los de bajo calor de hidratación, etc. La crisis energética de los años 1970 genera la aparición de cementos elaborados con menor consumo de energía (cemento portland con mineralizadores, cementos constituidos por alinita), mientras que una gran gama de cementos se comienzan a estudiar a partir de finales de la década de 1990 con el objeto de producir cementos que contribuyan al desarrollo sostenible de la industria. Entre los más importantes se pueden citar: los cementos modificados energéticamente (Energetically Modified Cement, EMC), los cementos con menor contenido de calcio, los productos cementantes como los geopolímeros y los compuestos cementantes por polimerización de alcohol polivinílico. [4]

La escoria siderúrgica de alto horno, subproducto del arrabio o fundición del hierro, ha venido siendo utilizada para la producción de cementos compuestos en mezclas de concreto con excelentes cualidades. Este material, formado básicamente por óxidos de Si, Al y Ca, posee propiedades hidráulicas latentes, y en general su naturaleza vítrea lo hace un material apto para ser activado alcalinamente. [21].

Los cementantes basados en la activación alcalina de escoria siderúrgica de alto horno fueron desarrollados en la antigua USSR en 1957 y hasta la fecha se han publicado diversas investigaciones donde resaltan el desempeño mecánico y de durabilidad de estos materiales frente a los producidos con OPC (cemento Pórtland ordinario). [21]

Los requerimientos actuales tanto ambientales como técnicos han promovido que la comunidad científica a escala mundial se vincule en esta línea de estudio, a tal punto que se ha llegado a mencionar que sean los materiales cementantes del tercer milenio. [22]

## 2.2 MARCO TEÓRICO

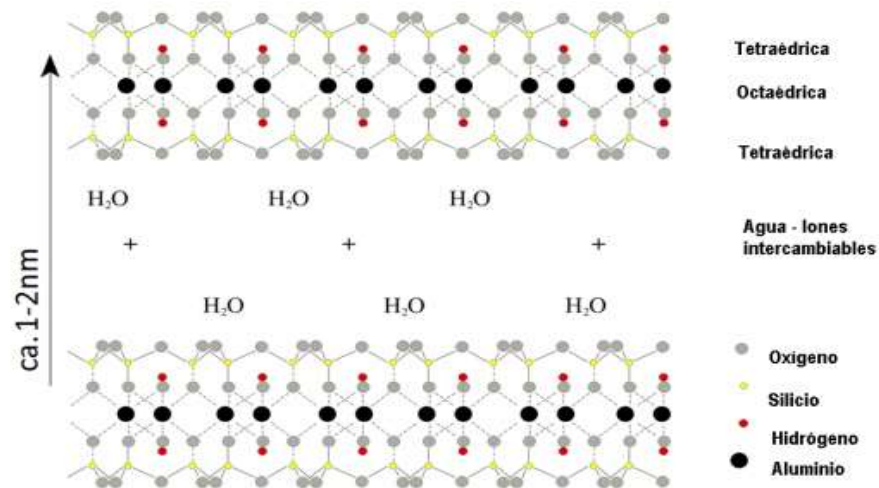
**2.2.1 Bentonita.** El término "bentonita" fue sugerido por primera vez por Knight en 1898 para un material arcilloso de propiedades jabonosas procedente de "BentonShale" (Wyoming, USA). Actualmente, la definición más ampliamente aceptada es la dada por R.E. Grim (1972): "La bentonita es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmécticas, con independencia de su génesis y modo de aparición". Desde este punto de vista, la bentonita es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmécticas sus constituyentes esenciales y las que le confieren sus propiedades características.[24]

Las arcillas constituyen casi el 70% de la corteza terrestre, y la mayor ventaja de estos materiales, a parte de su disponibilidad, es que debido a su estructura laminar orientan a que una reacción química se produzca en un cierto plano, y no en el espacio tridimensional, lo que hace que ésta sea mucho más rápida. Además, la facilidad para modificar sus propiedades, adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas, justifica su utilización. [21]

En la figura 1, se observa la estructura molecular de una arcilla esmectita presentan estructuras de filosilicatos del tipo 2:1, es decir está compuesta por tres capas externas tetraédricas de silicio-oxígeno, cada tetraedro está compuesto por una átomo de silicio unido a cuatro átomos de oxígeno y una capa intermedia octaédrica de aluminio, formada por octaedros que contienen un átomo de aluminio unido a seis hidroxilos ( $\text{Al}(\text{OH})_6$ ), el peso molecular de este compuesto es de aproximadamente 720 g. Son materiales capaces de hinchar y aumentar varias veces su volumen en el contacto con el agua y formar geles tixotrópicos cuando se les añade en pequeñas cantidades. La capacidad de hidratación variable que

presentan las esmectitas hace que el volumen que ocupa varíe en función de la presión de vapor de agua ambiental y, por ello, se les denomina genéricamente “arcillas hinchables”, propiedad que es más acusada en las sódicas que en las cálcicas.

**Figura 1. Estructura de la bentonita**



**Fuente:** <http://commons.wikimedia.org>

Las esmectitas son filosilicatos trilaminares (T:O:T), de fórmula compleja (en la Tabla siguiente 1 se muestran las fórmulas estructurales ideales para los distintos miembros del grupo de las esmectitas). Se pueden dividir en esmectitas dioctaédricas y trioctaédricas. Las esmectitas dioctaédricas tienen aluminio como catión mayoritario en posición octaédrica (montmorillonita y beidellita) o hierro (nontronita). Las esmectitas trioctaédricas tienen, mayoritariamente, Mg<sup>2+</sup> en posición octaédrica. El mineral más importante es la saponita.

Las esmectitas más comunes en las bentonitas son las de la serie montmorillonita-beidellita, con pequeñas cantidades de hierro.

**Tabla 1. Tipos de esmectitas**

		<b>Cationes Tetraédricos</b>	<b>Cationes Octaédricos</b>	<b>Interlámina</b>	
<b>DIOCTAEDRICAS</b>	Montmorillonita	Si <sub>4</sub>	(Al <sub>2-x</sub> R <sub>x</sub> <sup>2+</sup> )	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> . nH <sub>2</sub> O
	Beidellita	(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )	Al <sub>2</sub>	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> . nH <sub>2</sub> O
	Nontronita	(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )	Fe <sub>2-x</sub> <sup>3+</sup> Al <sub>x</sub>	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> . nH <sub>2</sub> O
<b>TRIOCTAEDRICAS</b>	Saponita	(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )	Mg <sub>3</sub>	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
	Hectorita	Si <sub>4</sub>	Mg <sub>3-x</sub> (Li, F) <sub>x</sub>	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O
	Estevensita	Si <sub>4</sub>	(Mg <sub>3-x</sub> R <sub>x</sub> <sup>3+</sup> )	Cl <sub>x</sub>	O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O

Cl= Ca, Na, Mg

R<sup>2+</sup> = Mg, Fe<sup>2+</sup>

R<sup>3+</sup>= Al, Fe<sup>3+</sup>

**Fuente:** <http://commons.wikimedia.org>

Generalmente las esmectitas presentan formas de escamas u hojuelas muy finas, con tamaño de partícula muy pequeño, lo que les confiere un área superficial muy grande cuando están bien dispersadas, mucho mayor que el de las caolinitas.

Su carga, su capacidad de intercambio catiónico y su gran área superficial hacen que las esmectitas presenten un alto grado de adsorción para muchas sustancias (aguas, aceites y otros productos químicos.); por otra parte, la carga, el tamaño fino de partícula y su capacidad de hinchamiento hacen que cuando se mezclan

con agua, particularmente las variables sódicas, se obtengan suspensiones con una viscosidad elevada con bajas concentraciones de partículas solidas (10%). Estas propiedades básicas de las esmectitas, las hacen útiles en diversas aplicaciones industriales. [24]

La bentonita tiene su origen en las cenizas volcánicas y el efecto complementario de la erosión. Las cenizas se asientan en los valles y se hundeen en la tierra a poca profundidad. Estas vetas de bentonita suelen tener un espesor de 1 ó 2 m y están enterradas a unos 25 m de profundidad.

**2.2.2 Geopolímeros.** Joseph Davidovits en 1978, implementó el término geopolímeros para designar una nueva clase de polímeros inorgánicos, los cuales estaban constituidos por una red tridimensional de aluminosilicatos. El proceso de polimerización involucra una reacción química bajo condiciones altamente alcalinas en minerales ricos en Al y Si produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O mostrado en la figura 2. [2]

Los geopolímeros son una nueva clase de materiales formados a partir de la polimerización de silicio, aluminio y oxígeno que se dispone formando una estructura tridimensional amorfa. Son materiales similares a cerámicos que exhiben excelentes propiedades como resistencia en entornos ácidos o a altas temperaturas. En la actualidad se están estudiando extensivamente la síntesis de geopolímeros a partir de residuos tales como arcillas, cenizas o desechos procedentes de altos hornos debido a las posibilidades que ofrecen estos materiales para el aislamiento y estabilización de materiales de desecho. [3]

A pesar de este interés hay escasos estudios sobre la durabilidad de estos materiales en relación a sus competidores (basados en cemento de Portland o fosfatos), muy usados en la actualidad. Dependiendo de su uso final, será preciso

caracterizar propiedades mecánicas tales como la abrasión, la erosión por agua o por partículas sólidas o la fractura.

Debido a que los geopolímeros contienen menos porosidad que los cementos convencionales, se espera mejores propiedades mecánicas y particularmente se cree que tienen excelentes propiedades a altas temperaturas. Los geopolímeros tienen un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cementos portland. Los geopolímeros tienen la ventaja de tener bajas emisiones de CO<sub>2</sub> en su producción, una gran resistencia química y térmica, y buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas extremas.

**Tabla 2. Clasificación de las estructuras de polisialatos con sus respectivas aplicaciones**

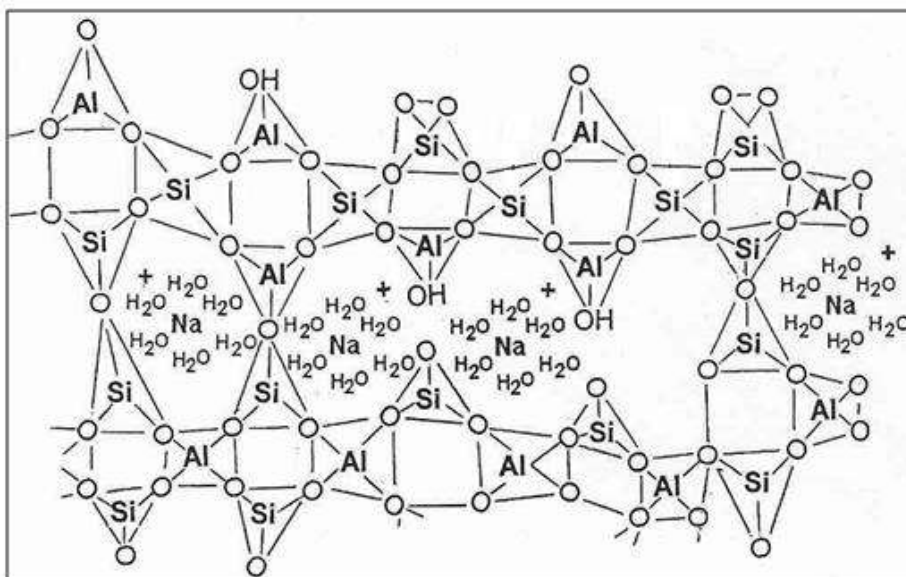
Clasificación	Estructura monomérica	Aplicación
Polisialato (PS) Si : Al = 1:1	Mn-(Si-O-Al-O-)n	Aislamiento térmico
		Resistencia al fuego
Polisialatosiloxo (PSS) Si : Al = 2:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O)n	Refractarios para fundición de Al
		Cementos de alto rendimiento
		Residuos tóxicos
		Compuestos resistentes al fuego
	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-	Compuestos resistentes al fuego

Polisialatodisiloxo(PSDS) Si : Al = 3:1	Si-O)n	Material de herramientas para uso en el rango de temperatura de 600 – 1000 °C
--	--------	---

**Fuente:** Davidovits (1991)

Davidovits (1999) clasificó los tipos de polímeros Si – O- Al – en polisialato (PS), polisialatosiloxo (PSS), y polysialatodisiloxo (PSDS). Las estructuras de sus respectivos polisialatos y su aplicación están enumeradas en la tabla 2. PSS y PS pueden ser fácilmente sintetizados a temperatura ambiente, sus rangos de aplicaciones se extienden a la movilización de residuos tóxicos y productos de construcción. Sin embargo, PSDS posee propiedades físicas y térmicas superiores en comparación con los formadores, por lo que se puede utilizar como revestimiento refractario o como herramienta en la preparación de materiales compuestos. [40]

**Figura 2. Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS por Barbosa.**



**Fuente:** [25].

**2.2.3 Geopolimerización.** El proceso de geopolimerización es una reacción química de minerales (geosíntesis) cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alúmina (silicioaluminatos), y presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina (sustancia activante), la cual debe estar constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica. La alcalinidad de las soluciones activantes induce que cierta cantidad de átomos de Al y Si se disuelvan o se hidrolicen a partir de la fuente primaria de aluminosilicato, para formar geonómeros (monómeros inorgánicos) en la solución y luego ser policondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales.

El mecanismo y cinética de las reacciones de geopolimerización depende de al menos tres factores:

- Concentración de unidades tetraédricas de sílice.
- Tipo y concentración del metal alcalino.
- Condiciones de curado (temperatura, tiempo y humedad relativa).

Con base en un modelo de reacción propuesto por varios autores Davidovits (1999) (Xu y Van Deventer, 2000b, 2000a), las reacciones en la Geopolimerización se puede dividir en tres etapas mecánicas, es decir, disolución / hidrolisis, restructuración y policondensación / gelatinización.

Estos tres mecanismos pueden ocurrir simultáneamente y, son reversibles en cierta medida. La cinética de cada una de estas etapas varía según el tipo de aluminosilicato, relación sólido solución, concentración de silicato alcalino, contenido de agua y la condición de reacción. Cada etapa será discutida en mayor detalle.

- a. Disolución/hidrólisis

La Geopolimerización comienza con la hidrólisis de  $H^+$  con cationes monovalentes ( $Na^+$ ,  $K^+$ ); esto es seguido por la disolución continua de los aluminosilicatos precursores, producto de la disolución de la ruptura de las bandas de Si-O-Si o Si-O-Al en las partículas de aluminosilicato para formar reactivos precursores  $Si(OH)_4$  y  $Al(OH)_4^-$  en la solución. Pasada la disolución es probable que esta produzca simultáneamente con la gelatinización de Aluminosilicato, que ocurre generalmente en la superficie sólida debido a que la densidad es mayor.

b. Reestructuración.

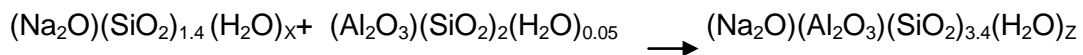
En la solución, los aluminosilicatos precursores son móviles y son capaces de orientarse parcialmente un mejor estado termodinámicamente estable.

c. Gelatinización.

La condición supersaturada es alcanzada cuando la concentración de disolución de las especies es mayor que las concentraciones de los saturados. En el punto de sobresaturación, la polimerización de  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$  se produce de inmediato. El paso polimerización también se caracteriza por la expulsión de agua molecular del gel geopolimérico, por lo tanto, la contracción de los materiales suele observarse también; en este proceso se obtiene como producto secundario  $H_2O$ .

Se ha encontrado que las propiedades físicas y características microestructurales de geopolímeros basados en metacaolín (MK) son dependientes de la cantidad de sílice presente en el sistema, la cual es incrementada al incorporar las soluciones activantes. Por tanto, el desempeño mecánico de los sistemas geopoliméricos puede ser optimizado a partir de su composición química mediante un ajuste en las relaciones estequiométricas de los óxidos de Si, Al y Na. Esto brinda la alternativa de controlar la nanoestructura, porosidad y propiedades de los materiales geopoliméricos para ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones en la ingeniería [23].

**2.2.3.1 Influencia del silicato soluble en la reacción de geopolimerización.** La cinética y el mecanismo de geopolimerización son en gran medida afectados por al menos tres factores: (1) La concentración de silicato; (2) La concentración y tipo de cationes metálicos alcalinos; y (3) Las condiciones de curado (por ejemplo, temperatura, tiempo y humedad). El efecto de adición de silicato soluble en la síntesis de geopolímeros fue en primer lugar investigado por Rahier [41]. Él en lugar de emplear el término geopolímero, empleaba la palabra GIBT (Gel Inorgánico de Baja Temperatura) para referirse al material sintetizado. A partir del estudio del GIBT, se encontró que éste tenía un alto límite de elasticidad y resistencia a la compresión, comparable a la de un vidrio convencional o material cerámico. El GIBT era sintetizado mediante la activación de la caolinita calcinada (metacaolinita) en Na-silicato con soluciones SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O con relación molar de 1 a 2,15. Rahier propone que una relación óptima se obtiene cuando en la metacaolinita el Al es totalmente consumido en la estructura de silicato. Esto significa que una relación óptima de Al/Na debe ser igual a 1, para cada Al presente en la estructura del aluminosilicato, un catión es necesario para equilibrar el exceso de carga, como se ilustra en la siguiente ecuación:



Donde **x** se refiere a la cantidad de moléculas de agua enlazadas en la solución de silicato y **z** al número de moléculas de agua en GIBT. El efecto de la concentración de álcalis (H<sub>2</sub>O/M<sub>2</sub>O) sobre la reacción cinética, el calor de reacción y composición del gel no es tan importante como el efecto de la concentración de silicato (SiO<sub>2</sub>/M<sub>2</sub>O).

De otro lado, Fernández, Jiménez y Palomo [42] utilizaron concentraciones más altas de silicato (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 1,0-6,0) y encontraron una relación óptima de 1,7 para geopolímeros a base de cenizas volantes. Sin embargo, el estudio no explica el efecto de la relación de silicato en la química de geopolimerización.

**2.2.3.2 Importancia de la presencia de cationes Na, K y Ca.** Se cree que el catión  $\text{Na}^+$  aumenta la disolución de la fase amorfa, debido a su asociación con el anión monomérico de silicato, mientras que el catión  $\text{K}^+$  mejora el crecimiento de la red de gel debido a su asociación con los aniones más grandes de aluminosilicatos. El comportamiento similar de los cationes de metales alcalinos se observa también en la geopolimerización. Van Jaarsveld [9] demostró que el grado de disolución de aluminio y los precursores de silicio es mayor en geopolímeros basados en  $\text{Na}^+$  que los basados en  $\text{K}^+$ . Sin embargo, el grado de formación de gel en geopolímeros a base de  $\text{K}^+$  es más alto que los geopolímeros basados en  $\text{Na}^+$ .

**2.2.3.3 Efecto de la temperatura de curado y tiempo de envejecimiento.**

Palomo, A., utilizó calorimetría para examinar la activación alcalina de metacaolinita con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 35, 45 y 60 °C. Ellos atribuyeron las curvas de calorimetría a la disolución, a la precipitación de fases de aluminosilicato amorfo y a la formación de fases zeolíticas. Del mismo modo observaron que el aumento en la temperatura de curado da lugar al aumento del índice de reacción. La misma tendencia se aplica a los geopolímeros a base de cenizas volantes, el cual a altas temperaturas de curado, tanto la disolución como la policondensación son aceleradas. La formación de fases zeolíticas, tales como hidroxisodalita y chabazita, son también observadas en las cenizas volantes activadas con soluciones alcalinas a altas temperaturas. Bakharev y Van Jaarsveld encontraron que con los geopolímeros sintetizados de una mezcla de caolinita y cenizas volantes a prolongadas altas temperaturas de curado (70-80 °C), se produce un decrecimiento del esfuerzo mecánico debido a la evaporación de agua de poros y a la desintegración de gel geopolimérico. [42]

**2.2.3.4 Ventajas y desventajas del uso de geopolímeros.** La búsqueda de nuevos materiales cementantes debe tener presente la necesidad de los usuarios

de poder emplear un producto con propiedades de alta resistencia mecánica y durabilidad en el largo plazo. Algunas ventajas encontradas en el uso de materiales alumino-silicatados en la síntesis de nuevos cementos geopoliméricos como sustituyentes parciales o totales del cemento portland convencional, se enumeran a continuación:

- ✓ Pueden llegar a tener propiedades mecánicas muy superiores a los cementos rutinarios
- ✓ Presentan una durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (ambientes costeros, pisos en plantas químicas, entre otros)
- ✓ No requieren de un tratamiento térmico adicional, proporcionando ahorro de energía y evitando la contaminación ambiental.
- ✓ Contribuyen a la reducción de la acumulación de desechos inorgánicos en tiraderos o rellenos (caso principalmente dado en las actividades mineras).

Dentro de las desventajas se tienen:

- ✓ Poca resistencia mecánica en el corto plazo, cuando los geopolímeros son sintetizados a base de escorias de alto horno. (Valores óptimos después de 28 días).
- ✓ Los tiempos de fraguado de las escorias activadas son menores a los del cemento convencional, lo que podría generar problemas en los concretos premezclados.
- ✓ Alta precaución en el manejo de agentes activantes alcalinos. Este puede ser un factor de riesgo si no se hace con responsabilidad.

**2.2.4 Concreto.**El concreto es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta está compuesta de cemento portland y agua, ésta une los agregados (arena y grava o piedra triturada) para obtener una masa semejante a

una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que puedan llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es de 19 mm o 25 mm. Como se mencionó anteriormente la pasta está compuesta de Cemento Portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. La pasta constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7 y el 15 % y el agua entre el 14 y el 21 %. El contenido de aire y concreto con aire incluido puede llegar hasta el 8 % del volumen del grueso del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso. [4]

La selección del agregado es muy importante ya que éste constituye el 60 al 75% del volumen total del concreto. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar daño o deterioro la concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.

**2.2.5 Concreto reforzado.** El concreto reforzado combina de forma eficiente las características de resistencia a la compresión del concreto con la alta resistencia a la tensión del acero lo que hace uno de los principales materiales de construcción. Presenta ventajas indiscutibles frente a otros materiales de construcción como su adaptación para moldearse a diferentes formas, la resistencia al fuego y además, puede competir económicamente con el acero.

**2.2.6 Cemento.** El cemento portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos descritos en la tabla 3 conforman el 90% o más del peso del cemento portland, estos reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades mecánicas del concreto como el endurecimiento y fraguado, resistencia y estabilidad bidimensional, dependen principalmente del gel del hidrato de silicato de calcio; esta es la médula del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>) en una proporción sobre el orden de 3 a 2. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrenadantes de cemento sin hidratar, también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencias.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, porque el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismo que no tiene resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. [6]

**Tabla 3. Componentes fundamentales del cemento portland**

COMPONENTES	FORMULA QUÍMICA	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**Fuente: 4**

**2.2.6.1 Tipos de cementos.** Existen o se fabrican varios tipos de cemento portland para satisfacer los requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas.

La siguiente clasificación está establecida en la NTC [43] del Icontec, la cual es correspondiente a Colombia:

- Cemento Portland tipo 1, es el que se utiliza en obras de hormigón en general, a este no se le exige propiedades especiales.
- Cemento portland tipo 2, Se emplea cuando se prevé una exposición moderada al ataque por sulfatos o cuando se requiere un moderado calor de hidratación. Estas características se logran al imponer limitaciones en el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  del cemento. El cemento tipo II adquiere resistencia con más lentitud que el tipo I; pero a final de cuentas, alcanza la misma resistencia. Este tipo de cemento se usa en el hormigón expuesto al agua de mar. Cemento portland tipo 3, recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. Este cemento se obtiene por un molido más fino y un porcentaje más elevado de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_3\text{S}$ . El hormigón tiene una resistencia a la compresión

a los 3 días aproximadamente igual a la resistencia a la compresión a los 7 días para los tipos 1 y 2 y una resistencia a la compresión a los 7 días casi igual a la resistencia a la compresión a los 28 días para los tipos 1 y 2. Sin embargo, la resistencia última es más o menos la misma o menor que la de los tipos 1 y 2. Dado que el cemento tipo 3 tiene un gran desprendimiento de calor, no se debe usar en hormigones masivos. Con un 15% de C3A presenta una mala resistencia a los sulfatos. El contenido de C3A puede limitarse al 8% para obtener una resistencia moderada a los sulfatos o a 5% cuando se requiere alta resistencia.

- Cemento portland tipo 4, Los porcentajes de C2S y C4AF son relativamente altos; El bajo calor de hidratación en el cemento tipo 4 se logra limitando los compuestos que más influyen en la formación de calor por hidratación, o sea, C3A y C3S. Dado que estos compuestos también aportan la resistencia inicial de la mezcla de cemento, al limitarlos se tiene una mezcla que gana resistencia con lentitud.
- Cemento portland tipo 5, se hace una gran reducción del contenido de aluminato tricálcico, para evitar la formación de sulfoaluminio de calcio, cuando el concreto es atacado por sulfatos, sustancia que al formarse en el concreto endurecido producen su destrucción.

En la tabla 4 se muestra la composición química del cemento portland:

**Tabla 4. Numerar Composición Química del cemento Portland**

COMPUESTO	SIMBOLO QUÍMICO	LIMITE APROXIMADO
Cal	CaO	60 – 70
Sílice	SiO <sub>3</sub>	17 – 25
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 – 8
Óxido de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 – 6
Óxido de Magnesio	MgO	0,1 – 7
Álcalis		0,1 – 1,3
Anhídrido sulfúrico	SO <sub>3</sub>	1 – 3,5

**Fuente: 4**

**2.2.6.2 Producción del cemento.** El cemento Portland convencional es generado a partir de la calcinación de la caliza en presencia de arcilla para finalmente producir clinker. La caliza es una roca constituida principalmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), mientras que la arcilla es una roca que constituida de sílice, alúmina, hierro y gran parte de minerales silicatados. Este proceso se ve claramente en la siguiente relación:

$$\textit{Caliza} + \textit{Arcilla} + \textit{Temperatura} = \textit{Clín ker}$$

La temperatura empleada en la obtención del clinker es de aproximadamente  $1400^\circ\text{C}$ . Como consecuencia de esta reacción, los principales óxidos generados son  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeO}_3$ . A la hora de producir cementos se deben tener análisis químicos que comprueben la presencia de estos compuestos mayores en los valores porcentuales expuestos en la anterior Tabla 4.

**2.2.7 Agua.** El agua en la mezcla tiene dos funciones muy importantes, por un lado, participa en la reacciones de hidratación del cemento, desarrollando su capacidad ligante; por el otro, confiere al concreto la manejabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

El agua de mezclado debe ser: agua potable, limpia de impurezas como ácidos, bases y materias orgánicas. Esto con el fin de evitar que propiedades como tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, acabado y durabilidad, sean afectadas por agua contaminada. La norma ASTM C 94 presenta las especificaciones del agua a utilizar en el mezclado como también en el contenido máximo de sustancias o sales aceptables para uso dentro de la mezcla. [30]

**2.2.8 Arena.** El agregado fino o arena actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto; la falta de arena se

refleja en la manejabilidad de la mezcla y un exceso demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado.

**2.2.9 Agregado grueso.** Muchas de las características del concreto dependen de sus propiedades, de allí la importancia de una buena graduación de la grava, que son rocas que tienen tamaños intermedios entre 2 y 64 mm; la falta de dos o más tamaños sucesivos puede producir problemas de segregación.

**2.2.10 Corrosión.** La corrosión ocurre cuando el cloruro o las sales atacan al concreto armado; como consecuencia se produce la oxidación del acero, el cual aumenta de 2-4 veces su volumen lo cual produce tensiones que se manifiestan en grietas en el concreto, y que son las que aceleran al ataque por agentes externos a la estructura.

En estructuras como los puentes, las zonas más propensas a sufrir de corrosión son aquellas que están expuestas a la acumulación de agua, vegetación y basuras, tales como aletas inferiores de las vigas, platinas de apoyo, cordón inferior de armaduras, conexiones, etc.

Cuando los iones cloruros del medio ambiente penetran en el concreto a través de los canales de poros interconectados, algunos de ellos son capturados por el  $C_3A$  para formar el cloroaluminato cálcico  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ , llamado comúnmente Sal de Friedel y conocido como cloruro ligado. Los cloruros ligados son de suma importancia en el estudio del tiempo de servicio de las estructuras de concreto por tres razones: [27]

- a. Reducen la concentración de cloruros libres en la vecindad del acero de refuerzo, lo cual disminuye la posibilidad de corroerse.
- b. Remueven el cloruro del flujo de difusión, retardando de esta forma la penetración de estos iones hasta el acero.

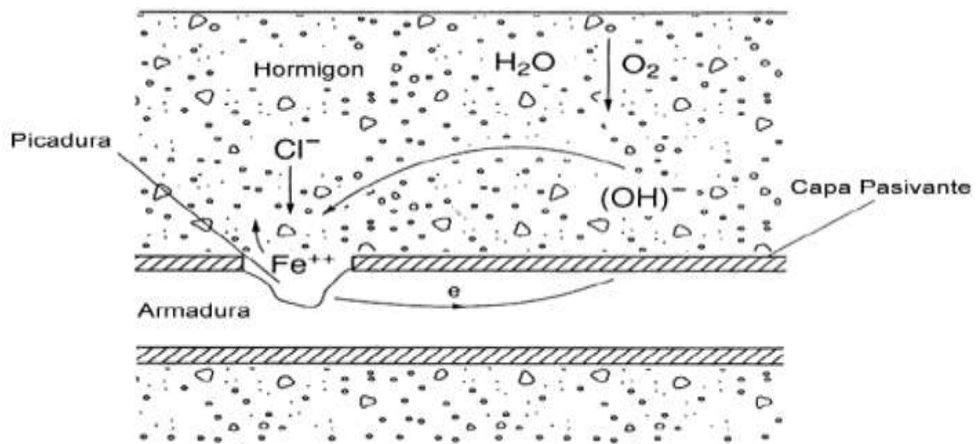
- c. Ayudan a la formación de un mayor número de sales de Friedel, las cuales conforman estructuras menos porosas y dificultan el transporte de los iones cloruro.

Los cloruros que quedan sin combinar son los llamados cloruros libres y van a ser los encargados de afectar directamente la estructura metálica del concreto reforzado y causar su deterioro.

Una vez los cloruros libres ataquen la armadura, la corrosión tendrá lugar y se hará manifiesta en alguna de las siguientes formas: [28]

- a. En el acero, con una disminución de su diámetro inicial y, por lo tanto, de sus propiedades mecánicas.
- b. En el concreto, debido a los productos de corrosión, causando fisuración y desprendimiento.
- c. En la adherencia acero/concreto.

**Figura 3. Esquema del proceso de corrosión en presencia de cloruros.**

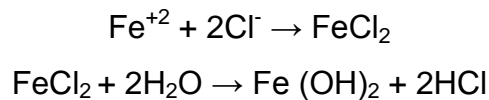


**Fuente:** CORDELO Mariela, Estudio de la Vida Útil de Estructuras de Hormigón pretensando frente a Corrosión por Cloruros, Universidad Politécnica de Catalunya, 2005

La acción de los cloruros produce una corrosión por picadura debido a que la capa pasivamente que protege al acero, es destruida solo en pequeñas áreas, las cuales se convierten en zonas anódicas, mientras que dicha capa actúa como el cátodo en la reacción.

Dado que en la zona anódica es donde ocurre la corrosión, el acero de refuerzo disminuye aquí su sección.

Las reacciones que ocurren en presencia de los iones cloruros son las siguientes:



## **2.3 TÉCNICAS A UTILIZAR**

Espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier.

El análisis infrarrojo es una de las herramientas más importantes para observar espectros vibracionales. Un espectro IR proporciona información de la aromaticidad, de la presencia de unidades estructurales básicas y grupos funcionales, así como información sobre el contenido y la naturaleza del material mineral presente. [35]

La espectroscopia de absorción en el infrarrojo es una técnica donde la radiación correspondiente al infrarrojo del espectro electromagnético interacciona con la materia. Estas interacciones son de absorción discreta de energía, variando los estados rotacionales y vibracionales de las moléculas, siendo estas absorciones características para cada tipo de enlace. Con esta técnica se caracterizan enlaces presentes en una molécula que dan indicios de los grupos funcionales presentes en ella, así como de la estructura molecular.

Aunque el espectro IR no caracteriza a cada compuesto, si brinda información de que ciertos enlaces atómicos que dan lugar siempre a bandas en un determinado intervalo de frecuencias, independiente de la naturaleza del resto de la molécula. La presencia de estas bandas, características de grupos funcionales, permite una amplia utilización de la espectroscopia IR en la determinación estructural. [35]

**2.3.1 Difracción de Rayos X.** El análisis mineralógico y la identificación de fases cristalinas se fundamentan especialmente en estudios de difracción de rayos X (DRX), esta técnica consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz se escinde en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la ley de Bragg.

Es una de las técnicas que goza de mayor prestigio entre la comunidad científica para dilucidar estructuras cristalinas, debido a su precisión y a la experiencia acumulada durante décadas, elementos que la hacen muy fiable. Sus mayores limitaciones se deben a la necesidad de trabajar con sistemas cristalinos, por lo que no es aplicable a disoluciones, a sistemas biológicos in vivo, a sistemas amorfos o a gases.

Entre las técnicas más utilizadas en la difracción de rayos – X se encuentran, la de muestras policristalinas o técnica de polvo y la técnica de monocristal. La técnica de polvo es útil para estudiar aquellas especies o compuestos que no se presentan o no es posible obtener en forma de monocristales. Mediante ambas técnicas se pueden establecer los parámetros estructurales de un determinado cristal que es objeto de estudio. [33]

**2.3.2 Resistencia del concreto endurecido [5].** Cuando el concreto endurece, requiere de una calidad satisfactoria. Esta calidad dependerá principalmente de la impermeabilidad y la resistencia a la compresión del concreto. Siempre se hacen especificaciones en cuanto a la resistencia porque es relativamente fácil de medir, aunque el número que resulta de la prueba no es una medida de su calidad ni de su durabilidad. La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm<sup>2</sup>) a una edad de 28 días.

Se pueden usar otras edades para las pruebas pero es importante saber la relación entre la resistencia a otras edades. La resistencia a los 7 días se estima como un 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que las resistencias a los 28 días.

Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas de mortero o de concreto; la resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, de edificios y otras estructuras. Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua – cemento y la edad, o el grado a que haya progresado la hidratación. Estos factores también afectan a la resistencia a flexión y a tensión, así como a la adherencia del concreto con el acero.

**2.3.3 Ataque de sulfatos.** El concreto que está expuesto a sulfatos, usualmente en el suelo o en aguas freáticas, puede desintegrarse en solo unos cuantos años debido a una reacción física o química, o ambos. El concreto sometido a suelos secos conteniendo sulfatos, no será atacado. Pero puede ocurrir desintegración severa si el concreto inapropiadamente proporcionado es expuesto a agua conteniendo sulfatos disueltos, o a alternancia frecuente de mojado y secado por las aguas con sulfatos.

En vez de destruir el concreto disolviendo los componentes, los sulfatos reaccionan químicamente con otros componentes para formar un mineral expansivo que descompone el material. Debido a que el hidróxido de calcio es uno de los componentes involucrados en la reacción, la resistencia a sulfatos puede mejorarse convirtiendo este componente en el hidróxido de silicato de calcio insoluble (CSH), químicamente más resistente. Cuando existen frecuentes ciclos de mojado y secado en un ambiente con sulfatos, la desintegración también puede ser causada por el crecimiento de cristales de sales de sulfato, que es un fenómeno físico. Ya sea que el mecanismo de desintegración sea químico o físico, la permeabilidad reducida mejora las resistencias a sulfatos no permitiendo la entrada de soluciones de sulfatos. [18]

**2.3.4 Ataque por ácido.** Los ácidos atacan las bases y las sales básicas formadas por la hidratación del cemento, deteriorándolo por la formación de sales solubles y procesos de disolución que eliminan el hidróxido de sodio. Los parámetros que gobiernan el ataque estrictamente ácido son la fuerza del álcali y su concentración, vale decir el valor de pH.

La gran influencia del pH, es la razón por la cuál se puede estimar que las aguas acidas de pH menor a 4.5, atacan fuertemente los concretos cualquiera que sea el cemento utilizado. En las prácticas ya reportadas se puede estimar que ningún tipo de cemento portland resiste la acción de aguas con pH inferiores a 4. Por otro lado los cementos portland corrientes resisten sin mayores daños la acción de aguas con valores de pH superior a 6. [34]

**2.3.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)** [38]. La técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica relativamente moderna, ya que comenzó a aplicar en los años setenta. Se trata de un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una

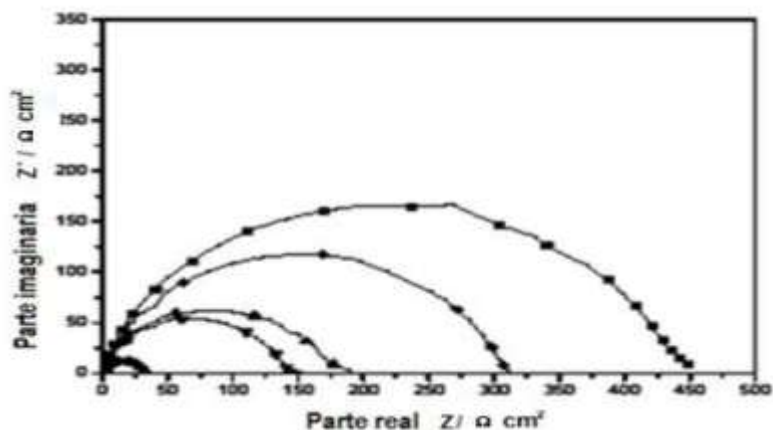
señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en el potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial – tiempo y corriente – tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondiente a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina (espectro de impedancia). [19]

Existen dos formas de representar gráficamente los resultados de impedancia obtenidos de un ensayo de EIS:

- a. **Diagrama de Nyquist:** donde se representa la parte imaginaria multiplicada por -1 ( $-Z''$ ), frente a la parte real ( $Z'$ ). Es el sistema de representación más utilizado y la información que se obtiene de él se basa en la forma que adoptan los espectros.
- b. **Diagrama de Bode:** donde se presentan el logaritmo del módulo de la impedancia ( $\log|Z|$ ) y el desfase ( $\phi$ ) en función del logaritmo de la frecuencia ( $\log\omega$ ). La información que se obtiene de este tipo de representación va encaminada sobre todo al comportamiento en función de la frecuencia.[31]

**Figura 4. Gráfica de Nyquist-EIS**



**Fuente:** [38]

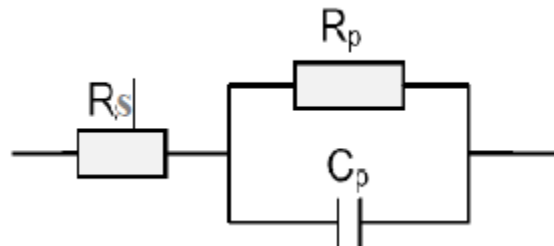
**2.3.5.1 Circuitos Equivalentes.** La interpretación del espectro de impedancias requiere la selección de un modelo eléctrico apropiado que se ajuste a los datos experimentales. A través del modelo, las medidas obtenidas utilizando esta técnica proporcionan información relacionada con la resistencia de la disolución, la resistencia de polarización y la capacitancia de la doble capa de Helmholtz. La resistencia de la disolución se obtiene a altas frecuencias y los datos adquiridos a bajas frecuencias dan información de la cinética de la reacción. Según el modelo que se proponga y la forma de proponerlo, se puede obtener información de los parámetros característicos del mismo. Como cualquier función de transferencia de un sistema, existen dos formas de abordar la obtención del modelo al que ajustar los datos experimentales:

- 1) Mediante un planteamiento teórico, en el que se propone una hipótesis de lo que está sucediendo. A partir de esta hipótesis se propone un modelo teórico y con los datos experimentales se busca conocer los parámetros de este modelo, que a su vez pueden relacionarse con las propiedades físicas y químicas del sistema.

- 2) Mediante un modelo experimental, en el que el sistema electroquímico se considera como una caja negra, pero que se utiliza para predecir su comportamiento futuro.

Generalmente, este tipo de modelos suelen ser circuitos eléctricos cuya respuesta es equivalente al comportamiento de los datos experimentales. Si la amplitud de laperturbación es pequeña, una forma de saber si el sistema se puede considerar lineal o linealizado consiste en aplicar el test de Kramers-Kroning revisar la referencia, según el cual, si el sistema es lineal se puede calcular  $Z''$  a partir de  $Z'$  y viceversa. Estos investigadores propusieron también que si el sistema es lineal, entonces su comportamiento se puede describir a partir de una secuencia de circuitos sencillos del tipo mostrado en la Figura 5:

**Figura 5. Circuito eléctrico equivalente sencillo**



**Fuente:** [38].

El circuito equivalente representado en la Figura 5, corresponde al más sencillo al que es posible ajustar los datos experimentales, cuando sólo se tiene en cuenta la transferencia de carga. En este caso, la función de transferencia teórica,  $Z(\omega)$ , se representa mediante una combinación en paralelo de una resistencia  $R_p$  y una capacitancia  $C_p$ , ambas en serie con otra resistencia  $R_s$  [2, 3]

$$Z(\omega) = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + i \cdot \omega \cdot C_p}$$

Z: valor de impedancia neta de la celda (ohmios).

R<sub>s</sub>: Resistencia del electrolito (ohmios).

C<sub>p</sub>: Capacitancia de la doble capa de Helmholtz (Faradios).

R<sub>p</sub>: Resistencia a la polarización (Ohmios).

ω: frecuencia de excitación (Herz).

R<sub>s</sub> representa la resistencia del electrolito, cuyo valor se puede calcular realizando un barrido a altas frecuencias. R<sub>p</sub> es el término de la resistencia a la transferencia de carga.

La capacitancia de la doble capa (C<sub>p</sub>) está relacionada con las interacciones que tienen lugar en la interfase electrodo/electrolito. Además,  $\omega = 2\pi f$  revisar los términos de la ecuación es la frecuencia en rad/s (siendo f la frecuencia en Hz) e i es la unidad imaginaria.

Para sistemas más complejos se pueden proponer circuitos equivalentes más complicados. De todos modos, es conveniente realizar siempre una primera aproximación del comportamiento electroquímico del sistema a circuitos básicos, para obtener un primer acercamiento.

A partir de un esquema eléctrico dado, como el que se expone en la Figura 5, es posible representar de diversas formas los parámetros obtenidos en los experimentos de EIS.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

#### 3.1 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LA BENTONITA

**3.1.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier.** Las muestras de aluminosilicato (bentonita) se analizaron por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja mediante elaboración de pastillas con KBr. Llevado a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker modelo Tensor 27 ubicado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

**3.1.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.** El espécimen seleccionado de la muestra de aluminosilicato fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

**Figura 6. Bentonita**



**Fuente:** autor

La toma de datos de las muestras se llevó a cabo en un difractómetro BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. Las condiciones de trabajo para cada muestra se describen en la tabla 5.

**Tabla 5. Condiciones de medida para el análisis por DRX.**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DATOS</b>
Rendijas Soller Primario	40 (kV)
Muestreo	30 (mA)
Rango de Medición	0.6 mm
Radiación	2.5 °
Filtro	0.01526° 2theta
Detector	3.5-70° 2theta
Tipo de Barrido	CuK $\alpha$ 1
Tiempo de Muestreo	Níquel
Rendijas Soller Primario	Lineal LynxEye
Muestreo	A pasos
Rango de Medición	0.4 segundos

**Fuente:** autor

La identificación de las fases cristalinas de la bentonita se realizó mediante la comparación de los picos obtenidos con el software Search-Match con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Center for Difraccion Data (ICDD).

### **3.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO**

Según lo reportado en la literatura [34], se procedió a realizar la síntesis del geopolimero a partir de bentonita. La solución alcalina activadora utilizada fue silicato de sodio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> adquirida a nivel comercial a la empresa Conquímica S.A, ubicada en la Carrera 16 No.59-70, Km 7 vía Girón, en Santander-Colombia, en la tabla 6 se pueden observar las propiedades del silicato de sodio, la cual se mezcló en un balde de plástico con arena procedente del río pescadero, bentonita adquirida en Químicos Campota, ubicada en la calle 13 No.13-70, Bogotá Colombia y óxido de aluminio adquirió en Químicos y Reactivos Ltda.

QUIMIRELAv (CI) 24 95-12 Bodega 8 Parque Industrial Colombia – Distrito Capital, Bogotá.

**Tabla 6. Propiedades químicas y físicas de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  suministrado por Conquímica S.A**

PROPIEDAD	VALOR TÍPICO	VALOR DEL PRODUCTO
Fórmula Química	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	
pH	14	12
Relación ( $\text{SiO}_2$ : $\text{Na}_2\text{O}$ )	3,10	3,00 – 3,25
Densidad Baumé (° Be)	42	40,5 – 43,5
Óxido de Sodio (% p/p $\text{Na}_2\text{O}$ )	9,27	8,76 – 9,86
Óxido de Sílice (% p/p $\text{SiO}_2$ )	28,74	27,39 – 30,27
Gravedad Específica	1,4078	1,4162

**Fuente:** suministrado por Conquímica S.A

**Figura 7. Mezcla de los componentes**



**Fuente:** autor

**Figura 8. Pasta obtenida después de la mezcla**



**Fuente:** autor

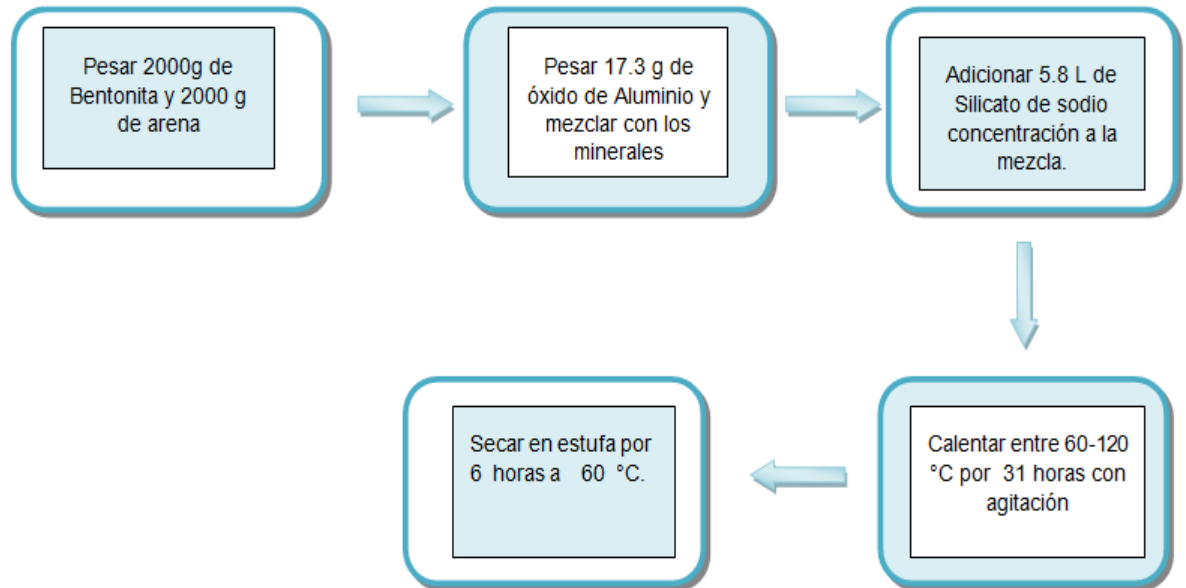
La reacción de síntesis se llevó a cabo durante 31 horas con agitación vigorosa y constante a una temperatura entre 60°-120° C. la pasta que se obtuvo, se dejó secar en estufa a una temperatura de 60 °C hasta que endureció totalmente. Finalmente se procedió a triturar el geopolimero obtenido a un tamaño de partícula de 4,75 mm (según Norma ASTM E-11-87) [30] para realizar posteriormente su caracterización estructural y elaborar probetas de concreto con sustitución de cemento portland por geopolimero.

**Figura 9. Geopolimero triturado**



**Fuente:** autor

### 3.2.1 Metodología para la obtención del geopolimero a partir de bentonita



### 3.3 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO

**3.3.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.** El geopolimero obtenido a base de bentonita se analizó por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja mediante elaboración de pastillas con KBr. Dicho análisis fue llevado a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker modelo Tensor 27 ubicado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

**3.3.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.** Una muestra del geopolimero a base de bentonita fue pulverizada en un mortero de ágata y tamizado hasta un tamaño de partícula de 38  $\mu\text{m}$  y fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

La toma de datos de la muestra se llevó a cabo en un difractómetro BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. Las condiciones de trabajo para la muestra y el tratamiento de los datos se llevaron a cabo de la misma manera que con la bentonita.

### **3.4 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO**

**3.4.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.** El cemento Diamante se analizó por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja mediante elaboración de pastillas con KBr. Dicho análisis fue llevado a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker modelo Tensor 27 ubicado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Estos resultados se muestran en anexo A.

**3.4.2 Análisis Por Difracción De Rayos X.** La muestra de cemento fue pulverizada y tamizada hasta un tamaño de partícula de 38  $\mu\text{m}$  y fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

La toma de datos de la muestra se llevó a cabo en un difractómetro BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. Las condiciones de trabajo para la muestra y el tratamiento de los datos se llevaron a cabo de la misma manera que con la bentonita. Este resultado se muestra en anexo B.

### 3.5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Para la elaboración de las probetas de concreto se utilizaron tubos de PVC como molde, agregado fino (arena) y agregado grueso provenientes de pescadero, cemento marca Diamante Portland tipo I, geopolimero y agua.

**Figura 10. Agregado grueso**



**Fuente:** autor

**Figura 11. Agregado fino**



**Fuente:** autor

Para cada tiempo de fraguado (7, 14, 28, 90 y 120 días) se elaboraron ocho probetas, dos por cada porcentaje de adición de geopolimero (10%, 20% y 30%) y sus respectivas probetas de referencia (concreto elaborado con cemento portland,

sin sustitución), realizando un total de 40 probetas para la primera parte de realización del proyecto que incluye las pruebas mecánicas y químicas.

**3.5.1 Diseño De La Mezcla.** Con el fin de determinar las propiedades mecánicas, químicas y eléctricas de las probetas, se realizaron dos diseños de mezcla. En el primero, se sustituyó el cemento en un 10%, 20% y 30% por el geopolimero sintetizado. En el segundo, para realizar las probetas destinadas a las pruebas eléctricas, se mantuvo la sustitución de cemento por geopolimero pero suprimiendo la presencia del agregado grueso ya que dichas probetas poseían un área mucho menor que las anteriormente realizadas. Además se realizó un diseño de mezcla para la elaboración de las probetas de referencia, es decir aquellas donde no hubo variación de algún material según normas de TECNOCONCRETOS S.A. [44]. En la tabla 7 se muestran los parámetros utilizados para dichos diseños.

**Tabla 7. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas de referencia.**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
AGREGADO GRUESO	1106 Kg/m <sup>3</sup> Concreto
AGREGADO FINO	675.51Kg/m <sup>3</sup> Concreto
CEMENTO	392 Kg/m <sup>3</sup> Concreto
AGUA	200 Kg/m <sup>3</sup> Concreto
RELACIÓN AGUA-CEMENTO	0.51

**Autor: 44**

La relación agua - cemento es el cociente entre las cantidades de agua y de cemento existentes en el hormigón fresco. O sea que se calcula dividiendo la masa del agua por la del cemento contenidas en un volumen dado de hormigón.

**Tabla 8. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas con sustitución de cemento por geopolimero.**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		
AGREGADO GRUESO	1106 Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
AGREGADO FINO	675.51Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
CEMENTO	90:10	80:20	70:30
	352.8 :39.2	313.6 : 78.4	274.4 : 117.6
AGUA	200 Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
RELACIÓN AGUA-CEMENTO	0.51		

**Autor: 44**

**Tabla 9. Parámetros para el diseño de mezcla de las probetas para pruebas electroquímicas, con sustitución de cemento por geopolimero.**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		
AGREGADO GRUESO	1106 Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
AGREGADO FINO	675.51Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
CEMENTO - GEOPOLIMERO	90:10	80:20	70:30
	352.8 :39.2	313.6 : 78.4	274.4 : 117.6
AGUA	200 Kg/m <sup>3</sup> Concreto		
RELACIÓN AGUA-CEMENTO	0.51		

**Autor: 44**

**3.5.2 Construcción De Las Probetas.** En la presente investigación se utilizaron probetas con refuerzo de acero y sin refuerzo, de diferentes medidas. Estas fueron fabricadas en el centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

La construcción de las probetas se realizó con el diseño de mezcla y los parámetros descritos anteriormente siguiendo la norma ICONTEC NTC 1377 [45]. Para su elaboración se utilizaron moldes cilíndricos de PVC los cuales tenían un diámetro de 7.5 cm y 15 cm de longitud que fueron previamente humedecidos con ACPM (aceite comprimido para motor) el cual cumple la función de lubricante facilitando el desmolde de las probetas.

**Figura 11. Tubos de PVC usados como moldes**



**Fuente:** autor.

La mezcla se realizó en un platón metálico homogeneizando primero el cemento con el agregado fino, añadiendo seguidamente el agregado grueso y adicionando lentamente la cantidad óptima de agua.

**Figura 12. Preparación de la mezcla**



**Fuente:** autor

Finalizada la homogenización, la mezcla se dispersó en los moldes en tres partes compactándola con una varilla de acero (método apisonado), dando unos leves golpes para asegurar la firmeza y buena dispersión de la mezcla en dichos moldes y eliminar burbujas de aire.

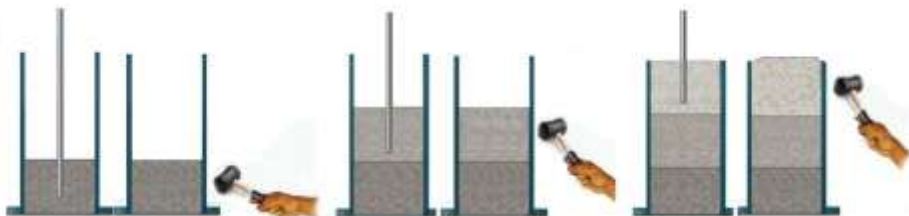
**Figura 13. Construcción probeta**



**Fuente:** autor

En la figura 14, se muestra de forma ilustrada el proceso de elaboración.

**Figura 14. Proceso de elaboración de las probetas**



**Fuente:** [36]

Las probetas se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas, tiempo suficiente para asegurar un buen secado y finalmente se procedió a desmoldar. Se elaboraron en total 40 probetas de este tipo en esta primera parte.

**Figura 15. Probetas en proceso de secado y Desmoldado**



**Fuente:** autor

**3.5.3 Proceso De Fraguado.** El fraguado y curado es un único proceso de hidratación continuo puesto que las reacciones ocurren durante toda la etapa de maduración del concreto, es decir, hasta alcanzar que todos los constituyentes del cemento provoquen el endurecimiento de la masa.

**Figura 16. Probetas en tiempo de fraguado**



**Fuente:** autor

El tiempo de fraguado es un periodo en el cual las reacciones químicas del cemento y el agua conducen a un proceso, que a diferentes velocidades de reacción, genera calor y da origen a nuevos compuestos, éstos en la pasta de cemento, hacen que éste endurezca y aglutine al agregado de la mezcla del concreto, tornándolo fuerte y denso, adquiriendo de este modo una cierta resistencia. Después de 24 horas de secado, las probetas fueron sumergidas totalmente en agua, donde se inicio el fraguado.

El fraguado se realizó en el centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Estas muestras se dejaron en condiciones ambientales 7, 14, 28, 90 y 120 días para observar algún cambio en la resistencia según la norma INCONTEC 1377 [45].

### **3.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO**

#### **3.6.1 Mecánica**

**3.6.1.2 Resistencia a la Compresión.** La prueba se realizó según la Norma ICONTEC NTC 673 [46] en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander en la maquina universal de ensayos INSOLTEC LTDA.

**Figura 17. Prueba de Resistencia a la compresión. Maquina Universal de Ensayos INSOLTEC LTDA**



**Fuente:** autor

Las pruebas de resistencia a la compresión para las probetas de la primera parte se realizaron a los 7, 14, 28, 90 y 120 días de fraguado.

### **3.6.2 Química**

**3.6.2.1 Resistencia a los sulfatos.** Se tomaron muestras de las probetas de 120 días de fraguado las cuales fueron expuestas a una solución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  según la norma I.N.V E-220-07 [47]. Se evaluó la pérdida de masa debido a la desintegración de los concretos causada por la acción de los sulfatos.

Esta prueba se realizó en el laboratorio de Química Industrial de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Las muestras se dejaron sumergidas por un periodo de 16 horas, de manera que el nivel de la solución quedara por lo menos 12.5 mm por encima de la muestra; el recipiente se tapó para evitar la evaporación y la contaminación con sustancias extrañas.

Terminado el periodo de inmersión, las muestras se sacaron de la solución y se dejaron a temperatura ambiente durante 15 minutos. Después se introdujeron en la estufa a una temperatura de 110 °C por un periodo de 2 horas. Posteriormente se dejaron enfriar y se pesaron; por último se volvieron a sumergir en la solución.

**Figura 18. Imagen de las muestras de las probetas.**



**Fuente:** autor

**3.6.2.2 Resistencia a los ácidos.** El ensayo de ataque con ácidos se realizó con el fin de someter las probetas de concreto y geopolímeros a condiciones extremas de exposición, simulando una situación de ambientes agresivos.

Esta prueba de resistencia al ataque de los ácidos se realizó sobre las muestras de concreto sustituidas con geopolímero; debido a que no existe un procedimiento estándar universalmente aceptado, el tipo y concentración de la solución ácida a la cual las muestras son expuestas, pueden variar.

Las probetas utilizadas para el desarrollo de la investigación tuvieron un tiempo de fraguado de 120 días. Se tomó una muestra de cada probeta de diferente porcentaje de sustitución, las cuales fueron expuestas a una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) de pH = 1.

El procedimiento para este ensayo fue el mismo empleado para la resistencia a los sulfatos, descrito anteriormente.

**Figura 19. Imagen de las muestras de probetas sumergidas en ácido sulfúrico.**



**Fuente:** autor

### **3.7 ELÉCTRICAS**

Siguiendo los parámetros establecidos en la norma ICONTEC NTC 1377 [45], se elaboraron probetas de 2 cm de diámetro y 4 cm de longitud, con el fin de realizar el análisis electroquímico.

**3.7.1 Elaboración de las celdas electroquímicas.** Las celdas electroquímicas usadas para este análisis, corresponden a probetas de concreto que fueron elaboradas con los mismos parámetros descritos en la tabla 9 sin añadir agregado grueso debido al pequeño volumen de las probetas. Se introdujo en cada probeta un electrodo de grafito de 7 cm de longitud y 5 mm de diámetro para ser usado como electrodo de referencia y además una varilla de acero de 7 cm de longitud y 5 mm de diámetro, como electrodo de trabajo.

**Figura 20. Probetas fabricadas para el proceso de corrosión**



**Fuente:** autor

La varilla de acero actúa como refuerzo de las estructuras de concreto y el electrodo de grafito permite registrar el potencial de dicho acero de refuerzo. Se construyeron probetas de referencia y probetas con las respectivas sustituciones de cemento por geopolímero a base de bentonita.

**3.7.2 Seguimiento Del Proceso De Corrosión.** El análisis se realizó solo a las probetas que dieron mayores valores de resistencia en las pruebas mecánicas. Las probetas fueron expuestas a un ambiente corrosivo que consistió en sumergir dichas probetas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 2% con flujo de oxígeno.

**Figura 21. Probetas expuestas a ambiente corrosivo con flujo constante de oxígeno**



**Fuente:** autor

El seguimiento de proceso de corrosión se hizo mediante la técnica de espectroscopia de impedancia (EIS) en corriente alterna. El procedimiento y montaje realizado para dicho análisis fue el siguiente:

Se realizó limpieza con lijas en el refuerzo del concreto, donde iban las conexiones con las pinzas del equipo. Se realizaban las respectivas conexiones las cuales se pueden ver en la figura 22, y se iniciaba el análisis aplicando potencial hasta alcanzar la estabilidad del circuito.

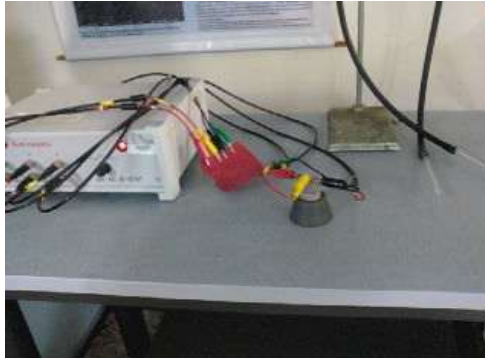
**Figura 22. Probeta con sus respectivas conexiones**



**Fuente:** autor

**3.7.3 Espectroscopia De Impedancia Electroquímica (EIS).** En este ensayo las probetas fueron evaluadas en un rango de frecuencia de barrido desde 200 KHz - 20 mHz con una amplitud de 50 mV con base en la norma ASTM G3. La toma de datos se realizó en la unidad de impedancia ACM Instruments ver figura 23, ubicada en el laboratorio Grupo de Investigación a la Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará.

**Figura 23. Montaje para Espectroscopia de Impedancia.**



## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA BENTONITA

**4.1.1 Difracción De Rayos X.** El difractograma de rayos x es la huella digital de cada mineral, en este se deben verificar tanto la posición de los picos o ángulos  $2\theta$  (eje de abscisas) de cada reflexión, así como su identidad (eje de las coordenadas). Por esto, es una técnica muy poderosa para la identificación de compuestos e incluso de mezclas.

En la siguiente tabla se muestran las fases cristalinas encontradas para la bentonita.

**Tabla 10. Fases cristalinas de la bentonita.**

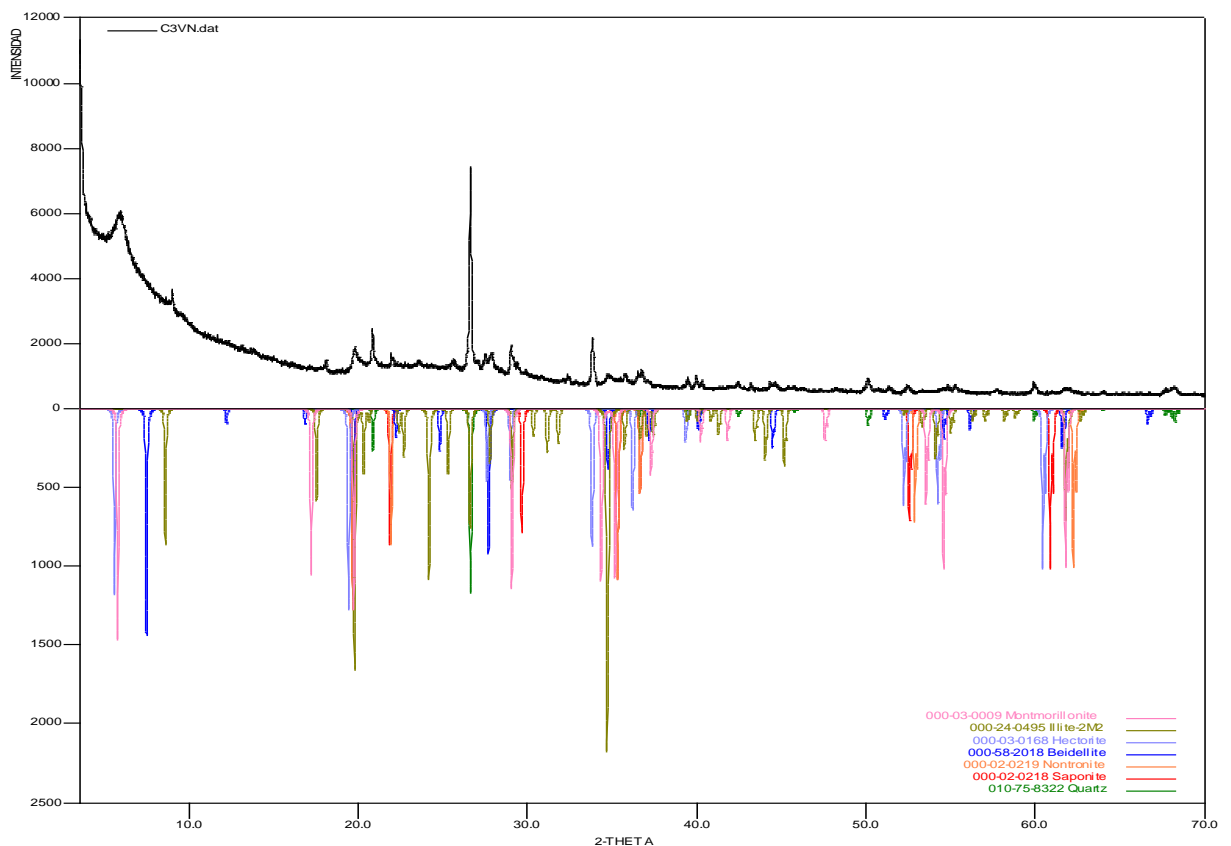
	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$9 \text{ Mg O} \cdot \text{Al}_2 \text{ O}_3 \cdot 11 \text{ Si O}_2 \cdot 15.5 \text{ H}_2\text{O}$	000-02-0218	Saponita
	$\text{Fe}_2 \text{ O}_3 \cdot 4 \text{ Si O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	000-02-0219	Nontronita
	$\text{Si O}_2$	010-75-8322	Cuarzo
	$\text{Si}_{3.74} \text{ Al}_{2.03} \text{ Fe}_{0.03} \text{ Mg}_{0.02} \text{ O}_{11}$	000-02-0009	Montmorillonita
	$\text{K}_{0.7} \text{ Al}_{2.1} (\text{ Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2$	000-24-0495	Illita
	$(\text{ Na, Ca})_{0.3} \text{ Al}_2 (\text{ Si, Al})_4 \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2 \cdot \text{X H}_2\text{O}$	000-58-2018	Beidellita
	$\text{Si}_2 \text{ O}_5 \cdot \text{Mg}_3 (\text{ OH})_2 \cdot \text{Si}_2 \text{ O}_5 \cdot 3 \text{ Mg O} \cdot 4 \text{ Si O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	000-03-0168	Hectorita

**Fuente:** autor

La figura 24 muestra el difractograma de la bentonita que permitió determinar los minerales presentes. Se observan reflexiones intensas de color rosado de 2000 cps (ciclos por segundo) en  $19,5^\circ$  y  $35,2^\circ$  que corresponden a una arcilla

esmectita del tipo montmorillonita; se observan también otras reflexiones a 26° de color verde oscuro correspondientes a cuarzo, el cual es el mineral más abundante y cristalino en la naturaleza. La bentonita suele contener otras fases asociadas como componentes minoritarios, como los minerales arcillosos tales como: la saponita que presenta reflexiones con intensidades de aproximadamente 1700 cps en 22° y 2000 cps en 32° de color rojo en el difractograma. La illita con intensidades de 3000 cps en 35°, químicamente es un aluminosilicato compuesto por potasio; también se puede ver la beidelita con reflexiones de 2000 cps en 34° aproximadamente, se pudo determinar que la muestra analizada está compuesta mayoritariamente por este tipo de minerales, que le confieren sus propiedades físicas y químicas, también se puede observar la presencia de otros minerales huéspedes.

**Figura 24. Perfil de difracción de la Bentonita**



**Fuente:** autor

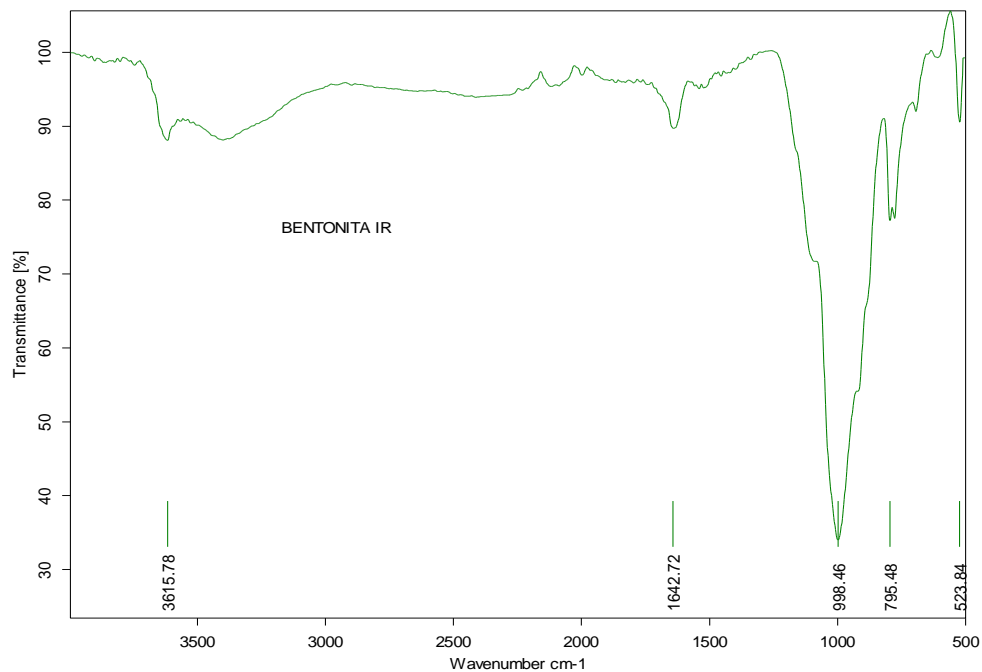
**4.1.2 Caracterización por Espectroscopia Infrarroja de la Bentonita.** En la figura 25 se observa la banda característica de las vibraciones de Si-O y Al-O presentes en los aluminosilicatos, esta banda se encuentra en la región de  $1013.95\text{ cm}^{-1}$ , la banda que se puede observar en la región de  $1635.89\text{ cm}^{-1}$  corresponde a óxidos de minerales presentes en la bentonita y la banda ancha de  $3423.42\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de agua en el mineral. Estos resultados se pueden corroborar con el anexo D.

**Tabla 11. Tabla de las bandas características del geopolimero**

ASIGNACIÓN	INTERVALO ( $\text{cm}^{-1}$ )	OBSERVACIONES
H-OH	~ 3615,78	Presencia de agua
Si – O	~ 1200 – 1000	Vibraciones Si - O
Al – O	~ 998,4	Vibraciones Al - O
Óxidos	~ 1642	Óxidos del mineral

Fuente: autor

**Figura 25. Espectro infrarrojo de la bentonita**

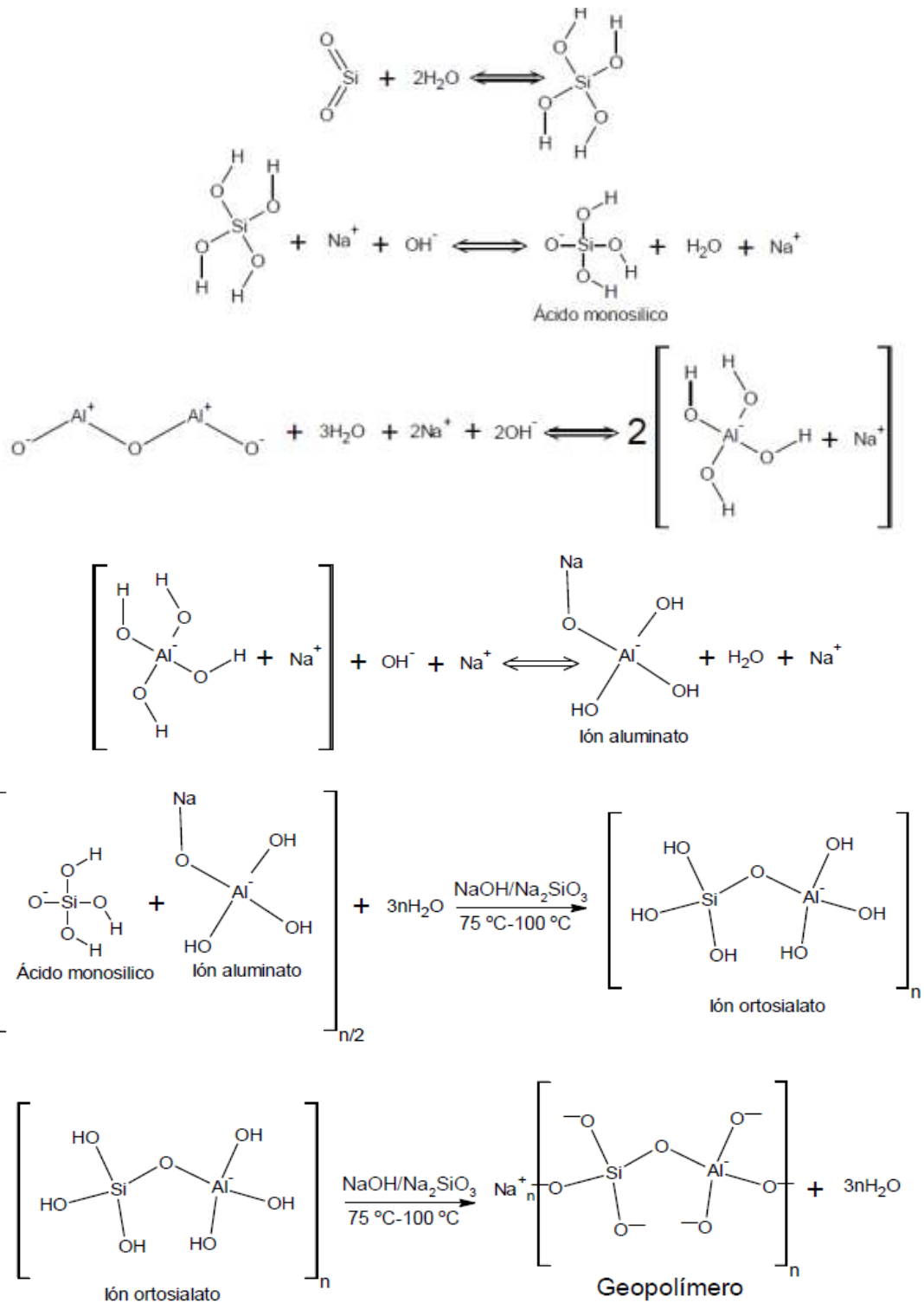


Fuente: autor

## 4.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO

La bentonita cuya composición es principalmente sílice y alúmina (aluminosilicatos), que presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina, la cual está constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica, en este caso el Na. Esta solución activante hace que cierta cantidad de átomos de Si y Al a partir de la fuente primaria de aluminosilicatos, se disuelvan o se hidrolicen, para formar el ion aluminato y el ácido monosálico, estos iones se coordinan tetraédricamente gracias a la alcalinidad de la solución, formando el ion ortosilato, llamado también geonómero el cual se forma en la solución y luego son policondensados. Esta policondensación da lugar una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales [13] ver figura 26.

La estructura de los geopolímeros está conformada por una red polimérica de Si-O-Al constituida por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4^-$  enlazados alternativamente con átomos de oxígeno. El aluminio por tener un número de coordinación de 4, crea con relación al oxígeno, una carga negativa des balanceada y por tanto, la presencia de cationes como  $\text{Na}^+$ , es esencial para mantener la neutralidad eléctrica de la matriz. El metal alcalino y/o hidróxido, contribuye a la disolución de la sílice y alúmina, y a la vez, actúa como catalizador de la reacción de condensación.



**Figura 26. Geopolimero sintetizado**



**Fuente:** autor

### 4.3 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO

#### 4.3.1 Análisis Por Difracción De Rayos X

En la tabla 12 se muestran las fases cristalinas encontradas en el geopolimero.

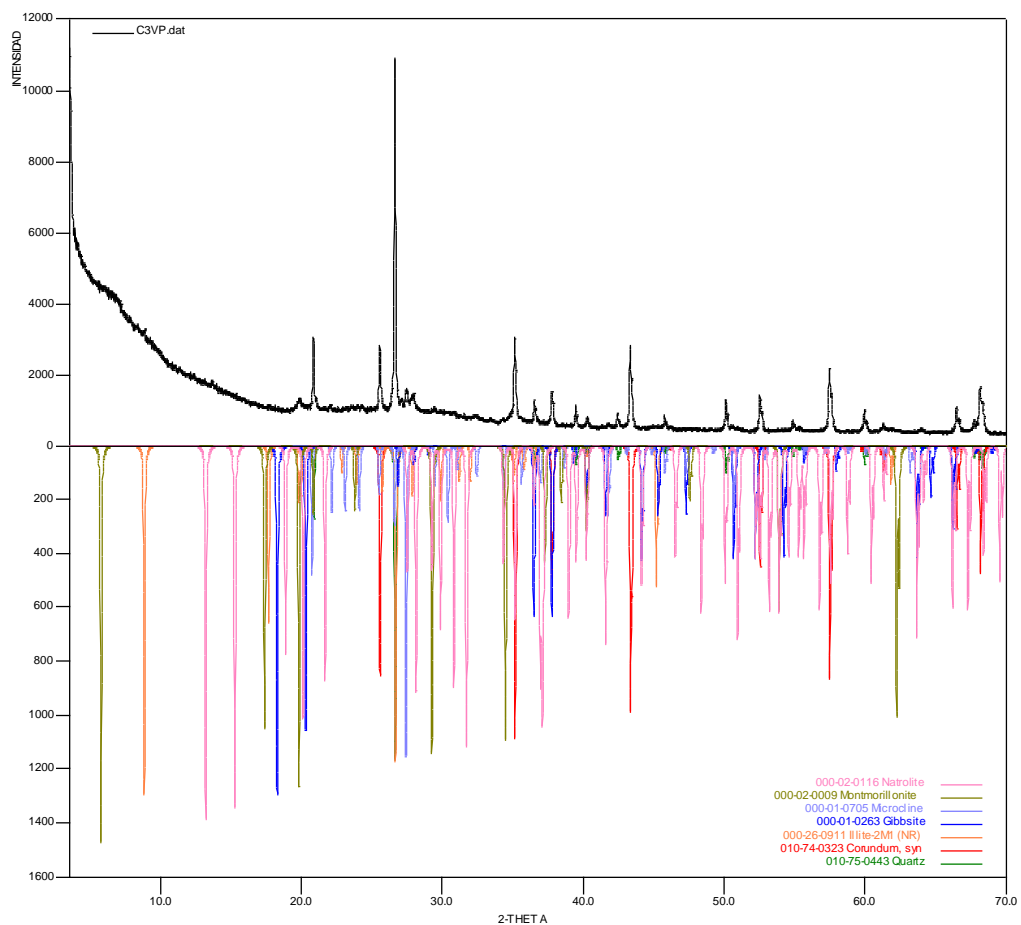
**Tabla 12. Fases cristalinas del geopolimero**

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$\text{Si}_{3.74} \text{Al}_{2.03} \text{Fe}_{0.03} \text{Mg}_{0.02} \text{O}_{11}$	000-02-0009	Montmorillonita
	$\text{Na}_2 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{10} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	000-02-0116	Natrolita
	$\text{Si O}_2$	010-75-0443	Cuarzo
	$\text{K Al}_2 (\text{Si}_3 \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-26-0911	Illita
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	000-01-0705	Microclina
	$\text{Al}_2 \text{O}_3$	010-74-0323	Corindón
	$\text{Al}_2 \text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	000-01-0263	Gibbsita

**Fuente:** autor

En el difractograma del geopolimero se observa la formación de nuevas fases cristalógraficas que no están presentes en el perfil de la bentonita; dichas fases resultan de la transformación de la estructura del aluminosilicato con la solución alcalina. Las fases que se forman son: natrolita, microclina, gibsita y corindón que consisten de aluminosilicatos de sodio potasio y aluminio. Se revela también la conservación de fases presentes en el mineral de partida tales como la illita y el cuarzo, los cuales presentaron la misma posición en  $2\theta$ , y montmorillonita, la cual sufrió un corrimiento de  $0.5^\circ$  en  $2\theta$ , respecto a las bandas características de la bentonita.

**Figura 27. Perfil de difracción del geopolimero sintetizado a base de bentonita**



**Fuente:** autor

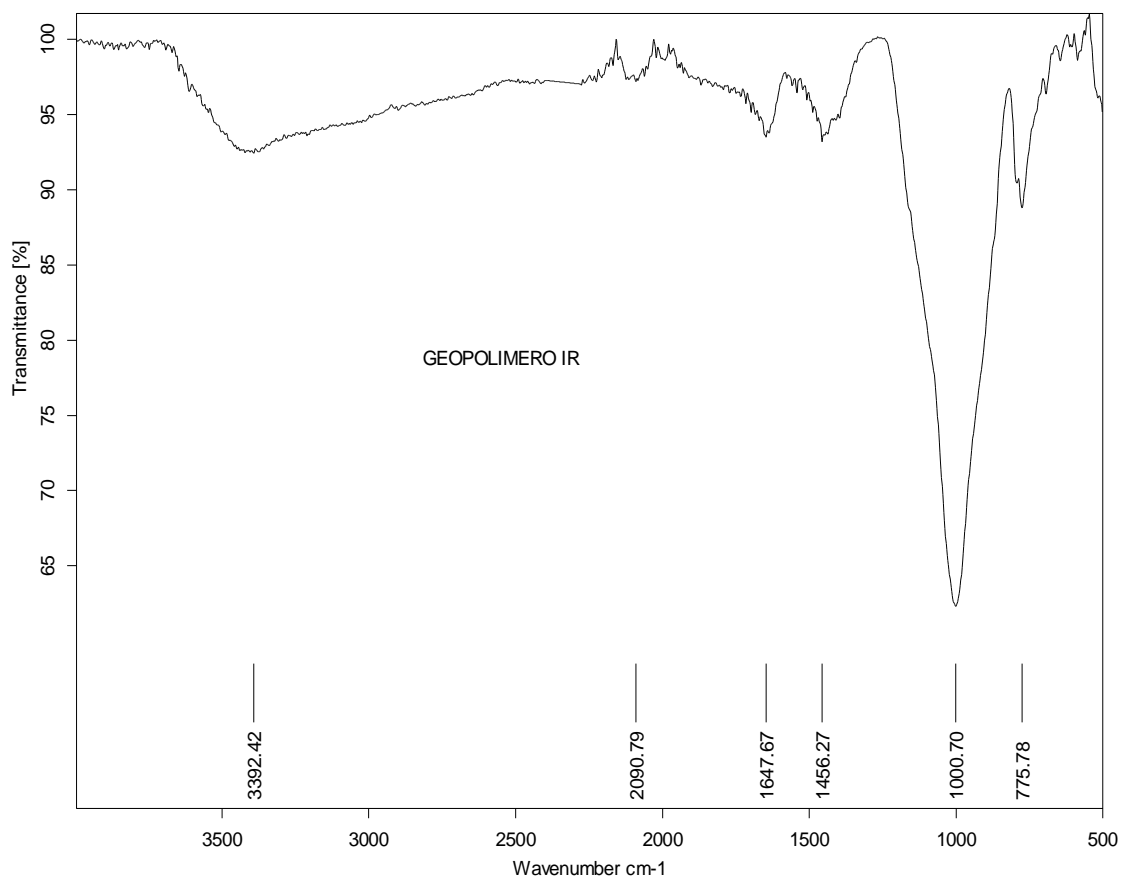
**4.3.2 Caracterización Por Espectroscopia Infrarroja Del Geopolímero.** En la grafica 28 se observa la banda ancha cercana a 3600 correspondiente a vibraciones de tensión del grupo enlazante OH del agua y muestran marcada evidencia de enlaces de hidrogeno; además de una banda en 1600 que corresponde a la vibración por deformación del enlace H-OH, ya que el alto contenido de álcalis en la red polimérica disminuye el tamaño del poro, evitando así la evaporación del agua. La aparición e intensificación de las bandas aproximadamente centradas en  $1400\text{ cm}^{-1}$  puede atribuirse a la formación de carbonatos de sodio, producidos debido al alto contenido de Na, el cual puede encontrarse libre y disponible para reaccionar con el  $\text{CO}_2$  del medio ambiente y formar fases carbonatadas. Las bandas ubicadas en la región entre  $600\text{ cm}^{-1}$  y  $800\text{ cm}^{-1}$  están relacionadas a las vibraciones de tensión del enlace Al-O, específicamente para iones Al con coordinación 4. Las bandas ubicadas en la región  $600\text{ cm}^{-1}$  aproximadamente, se pueden asociar a vibraciones por deformación del enlace Si-O-Si y Al-O-Si. Estos resultados se pueden corroborar observando el anexo E.

**Tabla 13. Tabla de las bandas características del geopolimero**

<b>ASIGNACIÓN</b>	<b>INTERVALO (cm-1)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>OH</b>	~ 3392,42	Vibraciones de tensión del grupo enlazante -OH del agua
<b>H-OH</b>	~ 1647,67	Vibración por deformación
<b>C-O</b>	~ 1456,27	Vibraciones del C-O
<b>Oxido de Al y Si</b>	~ 1000,70	Vibraciones de los óxidos del Al y Si
<b>Si – O</b>	~ 1000,70 - 800	Vibraciones de flexión Si-O
<b>Al – O</b>	~ 800 - 600	Vibraciones de tensión Al-O
<b>Si-O-Si y Al-O-Si</b>	~ 600 - 500	Vibraciones por deformación del enlace Si-O-Si y Al-O-Si

**Fuente:** autor

**Figura 28. Espectro infrarrojo del geopolimero**



**Fuente:** autor

El análisis por IR del geopolímico obtenido evidencia la presencia del agregado inorgánico. La banda característica de las vibraciones producidas por los óxidos de Si y de Al se ha desplazado a valores más bajos ( $1028\text{ cm}^{-1}$ ). Este comportamiento se debe a la transformación que sufre el precursor aluminosilicato ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) a iónortosialato, por la presencia del agente alcalino.

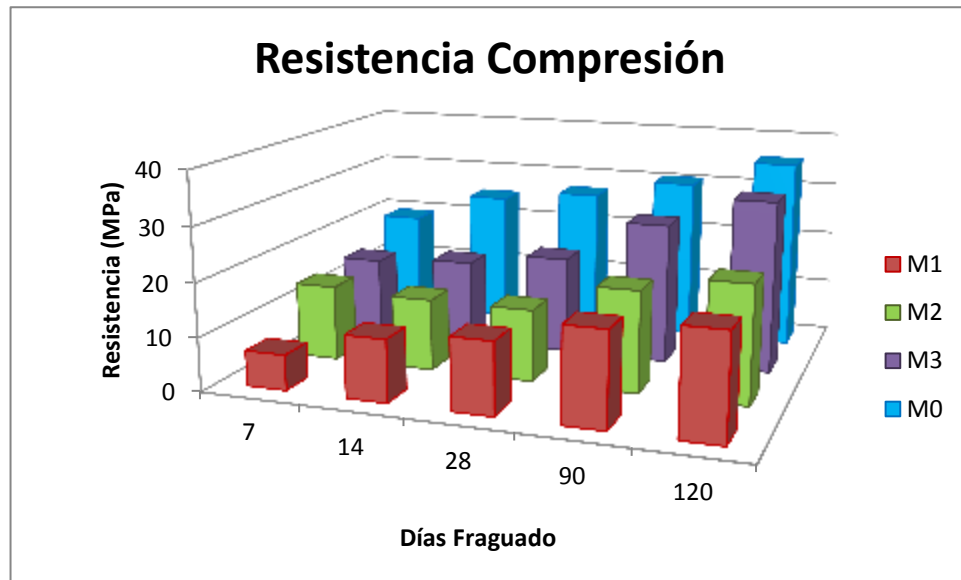
El proceso de geopolimerización de la fuente de aluminosilicatos puede ser comprobado a partir de la desaparición o modificación de algunas de las bandas

características de la bentonita (ver anexo F), particularmente la ubicada a  $1100\text{ cm}^{-1}$ . Esta señal presenta un corrimiento hacia menores frecuencias ( $1000\text{ cm}^{-1}$ ) luego de la incorporación de la solución activante y cuyo desplazamiento está asociado a la disolución ubicada alrededor de  $1400\text{ cm}^{-1}$  puede ser atribuida a vibraciones de tensión del C-O de carbonatos presentes en el geopolímero. La presencia de carbonatos posiblemente se debe como ya se mencionó, a la interacción del material con el  $\text{CO}_2$  del medio ambiente, en este caso para formar carbonatos de sodio.

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO**

**4.4.1 Resistencia a la compresión.** En la gráfica 29 se observan los valores de resistencia a la compresión obtenidos para las probetas de la primera parte del proyecto, elaboradas con las respectivas sustituciones de geopolímero por cemento en un 10% (M1), 20% (M2) y 30% (M3), así como los valores para las probetas de referencia (M0), después de 7, 14, 28, 90 y 120 días de fraguado, según norma ICONTEC 673 [46]. En donde se puede ver que todas las probetas mejoraron su resistencia en el tiempo mostrando un comportamiento similar. Los resultados de este análisis se expresan en unidades de esfuerzo (MPa).

**Figura 29. Resistencia a la compresión para las probetas con sustituciones de geopolimero y probetas de referencia**



**Fuente:** autor

Como se puede apreciar hay un condicionante de tipo químico que se encuentra controlando el desempeño de las probetas con geopolímero. Se puede observar que los mejores resultados de resistencia a la compresión se obtuvieron para las probetas sin adición de geopolimero. Sin embargo, en las probetas donde se hizo sustitución con geopolimero, las que tenían un 30% de este, el valor de resistencia fue más alto que con los demás porcentajes. Esto demuestra que el material sintetizado posee ciertas características cementantes. Comprobándose de esta manera que si se aumenta la sustitución de geopolímero en la probeta de concreto, se podrán obtener materiales con mayor resistencia mecánica.

Se observa que a medida que aumenta el tiempo de curado, aumenta también el valor de resistencia, mostrando un comportamiento casi lineal, debido a que en el concreto las reacciones de hidratación ocurren a una gran velocidad,

obteniéndose valores de resistencia máxima para las probetas ensayadas con 120 días de curado con y sin sustitución de geopolímero.

Este interesante comportamiento fue el principal argumento para evaluar el desempeño y durabilidad de las probetas con sustitución de geopolímero en las otras pruebas, como es el caso de la prueba eléctrica, resistencia a ataque con ácidos y sulfatos.

Por otra parte, las probetas que contienen geopolímero requieren de un mayor tiempo para que las reacciones se lleven a cabo, por lo que considera que entre los días 90 y 120 mejoraron notoriamente la resistencia a la compresión. De esta manera las edades de interés para obtener un valor alto de resistencia estarían desde 90 días en adelante.

La generación de silicatos de calcio hidratados, producidos a partir de la reacción del geopolímero con el agua, contribuye a densificar la microestructura del concreto, disminuyendo su porosidad y aumentando la resistencia.

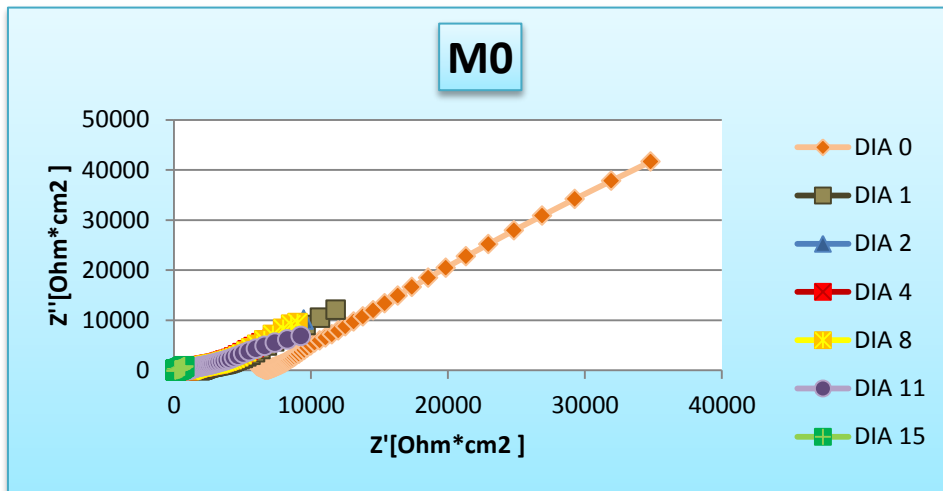
#### **4.4.2 Análisis Eléctrico**

**4.4.2.1 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.** Las figuras 30, 31, 32 y 33 muestran los diagramas de Nyquist del espectro de impedancia a diferentes tiempos de inmersión y de las distintas sustituciones de geopolímero.

Se puede observar que todos los diagramas presentan la misma tendencia al aumentar el tiempo de análisis, el valor de la resistencia disminuye favoreciendo de esta manera el proceso de corrosión que se presenta al exponer el acero a la solución de NaCl al 2%. A su vez se observó que al aumentar la sustitución del geopolímero en la matriz del concreto los valores de impedancia se hacen cada

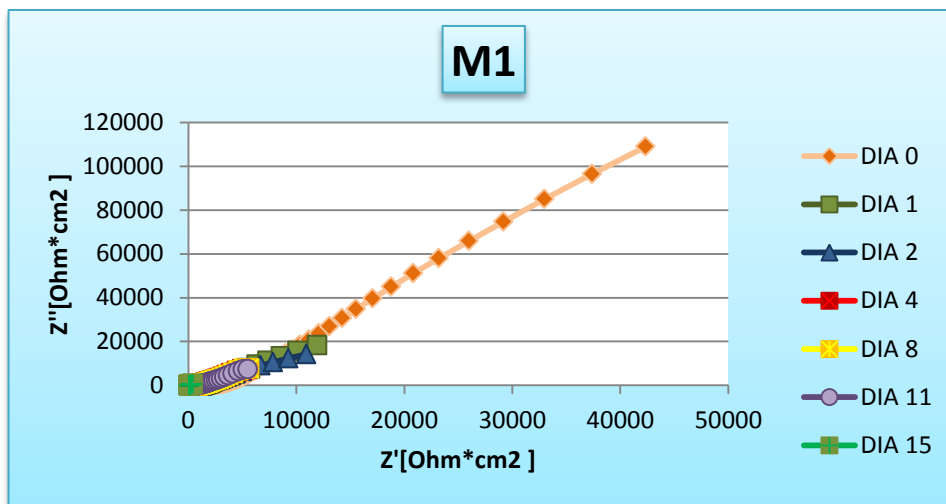
vez mayores, dejando claro lo mencionado anteriormente: a medida que se aumenta la sustitución del geopolimero disminuye la actividad superficial del material.

**Figura 30. Diagrama de Nyquist de la probeta M0 a diferentes tiempos de inmersión**



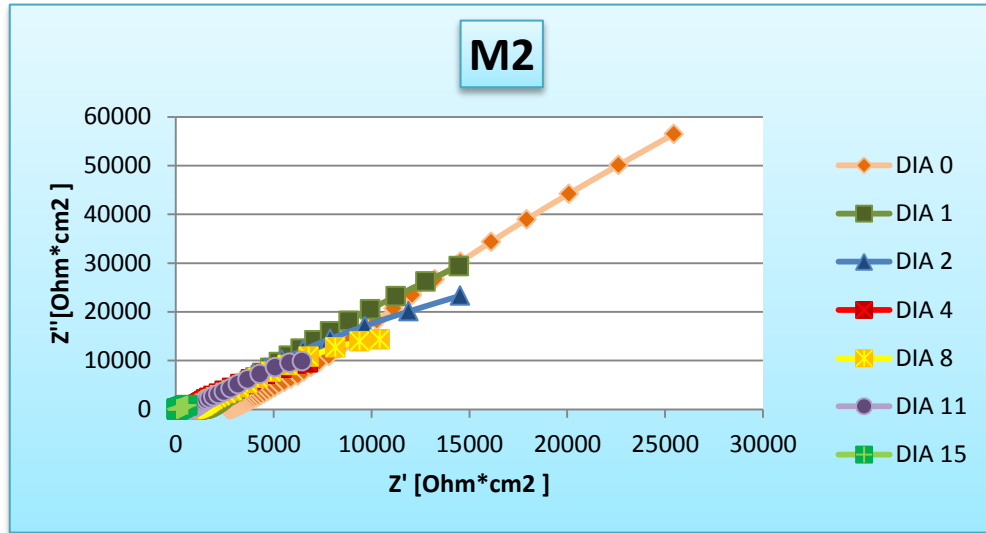
Fuente: autor

**Figura 31. Diagrama de Nyquist de la probeta M1 a diferentes tiempos de inmersión**



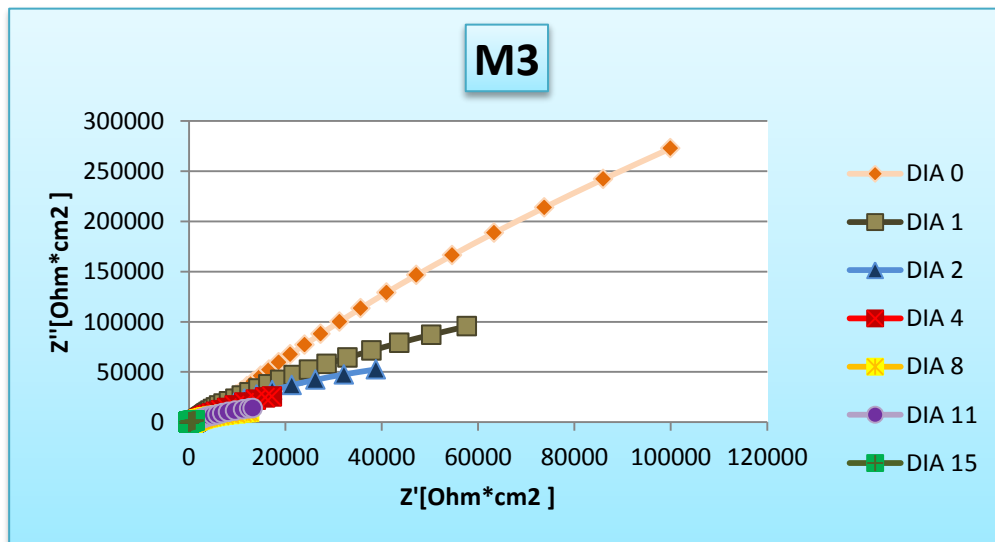
Fuente: autor

**Figura 32. Diagrama de Nyquist de la probeta M2 a diferentes tiempos de inmersión**



Fuente: autor

**Figura 33. Diagrama de Nyquist de la probeta M3 a diferentes tiempos de inmersión.**



Fuente: autor

En la muestra  $M_3$ , se evidencia menos corrosión debido a que hay menor transferencia de carga a la interfase metal-mezcla, presentando de esta manera un comportamiento electroquímico diferente para cada mezcla y tiempo.

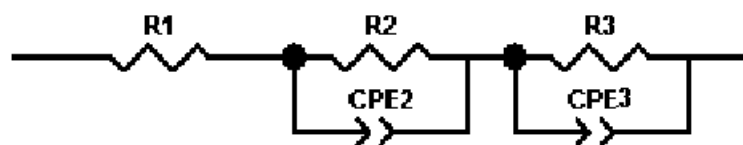
Sin embargo entre los días 8 y 11 de inmersión se presentó un aumento en el valor de la impedancia que luego disminuyó nuevamente para el día 15 de medición, siguiendo la misma conducta corrosiva que se presentó con el transcurrir del tiempo. Este cambio de comportamiento del material en el tiempo se atribuye a que la capa de óxido formado sobre la superficie del acero es de tipo protector (es un óxido que disminuye el intercambio de especies, desde la solución al material).

**4.4.2.2 Descripción del circuito equivalente propuesto.** Partiendo de los resultados obtenidos de las pruebas del comportamiento electroquímico observado en EIS; para esta sección se propusieron circuitos equivalentes válidos para las muestras  $M_0$  y  $M_3$ , en un tiempo de inmersión de 0 y 15 días, en el cual están involucrados todos los procesos en la respuesta eléctrica del sistema.

Los valores obtenidos para cada uno de los elementos del circuito se obtuvieron a partir de los datos experimentales utilizando para la simulación el software Zview 3.1C [38].

En la figura 34 se muestra el circuito equivalente simulado para las probetas  $M_0$  y  $M_3$  en el día 0 de inmersión.

**Figura 34. Circuito equivalente para las probetas  $M_0$  y  $M_3$  (día 0)**



Fuente: autor

El circuito describe el comportamiento electroquímico que se presentó en el sistema cuando la probeta no había sido expuesta al electrolito (solución de NaCl al 2%). El circuito consta de una resistencia R1 que representa la resistencia de la solución, seguida de la segunda resistencia R2, que es la resistencia del concreto, el cual se opone a el paso de los iones cloruro; en paralelo se encuentra CP2, que es la primera constante de fase encontrada en el sistema, originada por la capa de concreto, y por ultimo en serie con R2, se encuentra la tercera resistencia R3 que está dada por la resistencia del metal (acero) y que se encuentra en paralelo con CP3 que es la segunda constante de fase encontrada en el sistema, originada de la doble capa.

Los diferentes elementos fueron evaluados por el procedimiento de ajuste, y los datos obtenidos, tomados de la simulación se muestran en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14. Valores de resistencia y capacitancia para M3 día 0**

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
<b>R1 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	2.711E03
<b>R2 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	9.606 E02
<b>CPE2-T (F)</b>	1.992 E-04
<b>CPE2-p (F)</b>	4.729 E-01
<b>R3 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	1.806 E06
<b>CPE3-T (F)</b>	3.732 E-05
<b>CPE3-P (F)</b>	8.720E-01

**Fuente:** autor

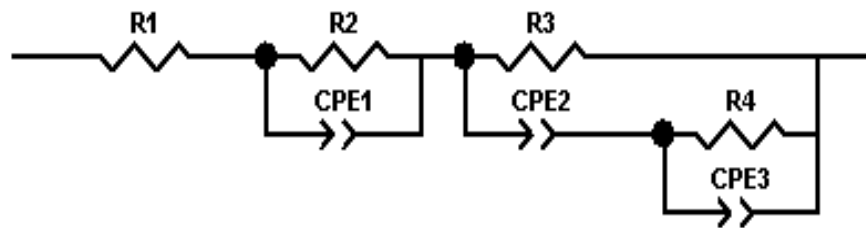
**Tabla 15. Valores de resistencia y capacitancia para M0 día 0**

Elemento	Valor
R1 (Ohm*cm <sup>2</sup> )	2.708E03
R2 (Ohm*cm <sup>2</sup> )	9.716 E02
CPE2-T (F)	2.015E-04
CPE2-p (F)	4.884E-01
R3 (Ohm*cm <sup>2</sup> )	1.805 E06
CPE3-T	3.732E-05
CPE3-P	8.721E-01

Fuente: autor

De las tablas 14 y 15, los valores de CPE2-p toman valores cercanos menores de 0.5, lo cual indica que la mezcla en las dos probetas se puede considerar como medios resistivos a la transferencia de cargas antes de ser sumergidas en la solución de NaCl al 2%; además podemos ver que el valor de las resistencias de R2 son similares lo cual confirma que tiene el mismo comportamiento.

**Figura 35. Circuito equivalente para el Dia 15 M3**



Fuente: autor

El circuito describe el comportamiento electroquímico que se presentó en el sistema cuando la probeta fue expuesta al electrolito (solución de NaCl al 2%), el circuito consta de una resistencia R1 que representa la resistencia de la solución, seguida de la segunda resistencia R2, que es la resistencia del concreto con y sin sustitución de geopolímero, el cual se opone a el paso de los iones cloruro. En paralelo se encuentra CP1, que es la primera constante de fase encontrada en el sistema, originada por la capa de concreto, en serie con R2 se encuentra la tercera resistencia R3 que está dada por la resistencia del metal (acero) y que se encuentra en paralelo con CP2 que es la segunda constante de fase encontrada en el sistema, originada de la doble capa metal-mezcla. Por último se encuentra la cuarta resistencia R4, que está dada por la resistencia que ofrece el sistema a la transferencia de carga (producto de oxidación), la cual esta paralela a CP3 que es la constante de fase del sistema que está constituida por la capacitancia de la película de oxido (productos de oxidación).

Los diferentes elementos fueron evaluados por el procedimiento de ajuste, y los datos obtenidos, tomados de la simulación se muestran en las tablas 16 y 17.

**Tabla 16. Valores de resistencia y capacitancia para M3 día 15**

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
<b>R1 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	7.671E01
<b>R2 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	7.223 E02
<b>CPE1-T (F)</b>	6.6213 E-04
<b>CPE1-p (F)</b>	9.5964 E-01
<b>R3 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	1.2977 E05
<b>CPE2-T (F)</b>	3.2245E-03
<b>CPE2-P (F)</b>	7.3342E-01
<b>R4 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	2.693E02
<b>CPE3-T (F)</b>	1.2123E-03
<b>CPE3-P (F)</b>	3.0824E-01

**Fuente:** autor

**Tabla 17. Valores de resistencia y capacitancia para M0 día 15**

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
<b>R1 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	7.571E01
<b>R2 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	1.451E01
<b>CPE1-T (F)</b>	2.4943E-04
<b>CPE1-p (F)</b>	4.3542E-01
<b>R3 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	7.543E03
<b>CPE2-T (F)</b>	2.0006E-04
<b>CPE2-P (F)</b>	7.5486E-02
<b>R4 (Ohm*cm<sup>2</sup>)</b>	1.186 E01
<b>CPE3-T (F)</b>	2.7475E-03
<b>CPE3-P (F)</b>	8.3593E-01

Fuente: autor

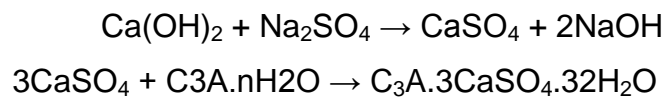
Como se puede observar para los sistemas descritos en las tablas 16 y 17, el comportamiento resistivo R1 (resistencia de la mezcla) van disminuyendo con el tiempo de exposición en la solución electrolítica, como consecuencia de la adsorción por parte del metal y contaminantes, lo cual demuestra que no está impidiendo el paso a la transferencia de cargas. Lo anterior indica el paso de agentes agresivos, desde la solución a la superficie; pero también se puede observar que el valor de resistencia para M3 es mayor que para M0, lo que evidencia menos corrosión debido a que hay menor transferencia de carga a la interfase metal-mezcla. Se establece entonces que las probetas con geopolímeros de 30% de sustitución, presentan valores de resistencia a la corrosión más altos a comparación de las probetas de referencia (sin sustitución).

#### **4.4.3 Análisis Químico**

**4.4.3.1 Resistencia a los Sulfatos.** Después del procedimiento descrito en la parte experimental de ataque a sulfatos, se pesaron todas las muestras tras los días de exposición. Los datos encontrados se consignan en la tabla 18. Se puede

observar como disminuye la masa debido a la interacción fisicoquímica entre los minerales de la pasta de cemento y los iones sulfato del medio, teniendo como consecuencia la expansión, agrietamiento, desintegración de la muestra y una exudación de apariencia blanquecina.

El sulfato de sodio reacciona primero con el hidróxido de calcio presente en el concreto generado durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricalcico, presente en el cemento formando etringita, (apariencia blauecina). Estas reacciones van acompañadas de una considerable expansión, que ocasionan esfuerzos de tracción internos y que culminan con agrietamiento y rompimiento de la masa de concreto.



**Tabla 18. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Día	M <sub>1</sub> %	M <sub>2</sub> %	M <sub>3</sub> %	M <sub>0</sub> %
4	6.15	22.31	6.60	6.43

**Fuente:** autor

Las tasas de pérdida de peso de las 4 muestras para el ensayo de resistencia a los sulfatos se muestran en la tabla 18, la cual muestra que después de ser sumergidas en una solución de sulfato de sodio, las probetas que contienen 10% y 30% de sustitución de geopolímero demostraron índices más bajos de pérdida de peso, pero la probeta que tenía 20% de sustitución tuvo mayor tasa de pérdida de peso.

**Figura 36. Muestras de probetas desgastadas por la solución saturada de sulfato de sodio**



**Fuente:** autores

**4.4.3.2 Resistencia a Ácidos.** Las muestras que se expusieron a la solución de  $H_2SO_4$  pH 1, mostraron con el tiempo desgastes en el material, disminuyendo su peso y fragmentándose.

Siendo el concreto químicamente básico con un pH del orden de 13, puede ser atacado por medios ácidos con pH menor de 7, los cuales reaccionan con el hidróxido de calcio de la pasta produciéndose compuestos de calcio solubles en agua.

El concreto expuesto al ácido, resultó afectado debido a que la solución ácida reacciona en primer lugar con hidróxido de calcio y luego con hidrosilicatos e hidroaluminatos de calcio del cemento endurecido para formar sales de calcio.

Otra causa del deterioro del concreto por la acción del ácido, es la carbonatación producida por la introducción del  $CO_2$  de la atmósfera en la estructura porosa del concreto, originando el descenso del pH; el proceso es más intenso cuanto mayor es la permeabilidad y por tanto la durabilidad del concreto disminuye.

**Tabla 19. Porcentaje de pérdida de peso por el ataque con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

<b>Día</b>	<b>M<sub>1</sub> %</b>	<b>M<sub>2</sub> %</b>	<b>M<sub>3</sub> %</b>	<b>M<sub>0</sub> %</b>
4	3.04	4.20	49.98	8.89

**Fuente:** autor

La pérdida de peso de las muestras para el ensayo de resistencia al ácido se muestran en la tabla 19 ; las muestras que contienen el 10% y 20% de geopolímero demostraron índices más bajos de peso, pero la muestra que contenía 30% se desintegró y tuvo la mayor tasa de pérdida de peso. Por lo tanto, la probeta que tiene 10% de geopolímero tiene la mejor resistencia a los ácidos.

**Figura 37. Muestras de probetas desgastadas por la solución ácido sulfúrico.**



**Fuente:** autor

## 5. CONCLUSIONES

- La fuente de aluminosilicatos empleada en el trabajo presentó una elevada reactividad en la presencia de un medio altamente alcalino donde un óptimo proporcionamiento de la solución activante permitió obtener materiales geopoliméricos con buenas resistencias mecánicas, eléctricas y químicas.
- La Geopolimerización es una manera viable para procesar y agregar valor a los aluminosilicatos dando lugar a materiales con elevados valores de resistencia mecánica y alta inercia química.
- La disolución de la fuente de aluminosilicatos puede ser vista a través de los cambios de los difractogramas XRD y espectros IR de la fuente primaria (bentonita) y el geopolímero obtenido, los cuales presentan estructuras vítreas (amorfas) fundamentalmente; las nuevas fases observadas en el geopolímero aportan al material, características cementantes.
- El comportamiento de las probetas con sustitución de geopolímero en los diferentes ensayos de desempeño y durabilidad (como lo fueron las pruebas de resistencia a la corrosión, resistencia a ataques con ácidos y sulfatos) fue mucho mayor frente a los materiales que fueron elaborados con materiales cementantes rutinarios. En este sentido, se pudo dar valor agregado a los minerales ricos en aluminosilicatos.
- Con los resultados obtenidos en las diferentes pruebas experimentales, se demuestra que los geopolímeros a base de minerales los cuales son recursos renovables, representan una alternativa viable como materias primas en la fabricación de materiales cementantes. De esta manera se podría pensar en la posibilidad de promover un material amigable (en términos ambientales), de

bajo costo de producción y con altas resistencias físicas y químicas, en el largo plazo.

- Las probetas M1, presentan menos desgaste que el patrón cuando están sumergidas en las soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de sodio. Esto se atribuye a la modificación de la estructura porosa, disminuyendo de esta manera, la permeabilidad de los sulfatos y ácidos sobre en concreto geopoliméricos.
- La reacción de geopolimerización es un procedimiento efectivo de bajo costo y sencillo que permite obtener materiales estables, con un gran potencial de aplicabilidad en la industria.
- De acuerdo a los datos obtenidos para los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica, se afirma que el porcentaje de sustitución de geopolimero influye significativamente en el comportamiento del concreto, indicando que a mayor remplazo de geopolimero, aumenta la resistencia a la corrosión.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Continuar la investigación realizando variaciones en las condiciones de reacción como: cambiar la temperatura de reacción a temperatura ambiente y utilizar un silicato de sodio neutro.
- La caracterización estructural del mineral y el geopolímero; y el estudio de corrosión puede ser complementada con análisis descriptivos un poco más profundos (como por ejemplo la aplicación de un análisis por Microscopía SEM), lo cual haría un poco más fácil la comprobación de la presencia y/o ausencia de una fase cristalina y el tipo de corrosión presente en la varilla de acero.
- Aumentar la sustitución de geopolímero por cemento, en la preparación de las probetas de concreto, y así determinar la sustitución límite para obtener un máximo valor en la resistencia a la compresión.
- Extender el tiempo de fraguado de las probetas geopoliméricas, para obtener mayores valores de resistencia a la compresión.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1]. SOARES, P., Pinto, A., Ferreira, V., Labrincha, J. “Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros” Geopolymerization of lightweight aggregate waste.
- [2]. DAVIDOVITS J. “Chemistry of Geopolimeric Systems, Terminology”. Presented at the Geopolymer 99 International Conference. France 1987. 37. 1633 – 1656.
- [3]. MUÑIZ. M, MANZANO A. “Desarrollo de un polímero inorgánico, geopolímero, para un desarrollo sustentable”. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Querétaro, México.
- [4]. SANCHEZ D. Tecnología del concreto y del mortero. Segunda edición, 1993, Bhandar Editores Ltda, p. 27-56.
- [5]. ASOCRETO. “Generalidades del concreto” Bogotá, Colombia; fondo editorial de Asocreto. 2002
- [6]. GARCIA A. MARTINEZ R. “Diseño y prueba de formaleas de acero para paredes y columnas a partir del vaciado de concreto en la construcción de obras civiles”. 2007. Universidad tecnológica de Pereira.
- [7]. SKOOG, Douglas A., F. James Holler and Timothy Nieman. Principles of Instrumental Analysis. Fifth Edition. New York. 1998. pp. 905–908.
- [8]. XU H., VAN DEVENTER J. and LUKEY G. “Effect of alkali metals on the preferential Geopolymerisation of stilbite/kaolinite mixtures”. Industrial and Engineering chemistry research. Vol. 40 (2001) p. 3749-3756.

- [9]. VAN JAARSVELD J. and VAN DEVENTER J. "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers". Industrial and Engineering chemistry research. Vol. 38 (1999) p. 3932-3941.
- [10]. XU H. and VAN DEVENTER J. "Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM". Cement and Concrete Research. Vol. 32 No. 11 (2002) p. 1705-1716.
- [11] GATES R. J, "Fabricación del cemento portland en: Parker Albert .Contaminación del aire por la industria". Barcelona diciembre de 2001. Edición en español. P 561-585.
- [12]. MEJIA, R. and BERNAL, S. "Nuevos concretos para el aprovechamiento de un subproducto industrial". Centro De Excelencia En Nuevos Materiales (CENM). Cali, Mayo 22 de 2006
- [13] CASTRO, Diana. "Obtención Y Caracterización De Geopolímeros, Sintetizados A Partir De Ceniza Volante Y Piedra Pómez, Utilizados Para El Desarrollo Y Mejoramiento Del Concreto". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2010.
- [14]. SINDHUNATA, PROVIS J., LUKEY G., XU H. and VAN DEVENTER J.S.J. "Structural Evolution of Fly Ash Based Geopolymers in Alkaline Environments". Industrial Engineering Chemistry Research. Vol. 47 No. 9 (2008) p. 2991-2999.
- [15] CÁRDENAS M, MEJÍA C. y GARCÍA F. "La Industria Del Cemento En Colombia". Presentado en Workingpapers series como documento de trabajo. Investigadora de Fedesarrollo. 2007.

- [16]. GUTIERREZ F. GORETTA K. ROUTBORT J. DOMINGUEZ A. "Deformación plástica a altas temperaturas de geopolímeros". Universidad de Sevilla. España.
- [17]. Cemex. Historia del cemento y concreto, El origen del producto ([http://www.cemexcolombia.com/in/in\\_hc.html](http://www.cemexcolombia.com/in/in_hc.html)), consultado el (2/2/2011).
- [18]. Usando Aditivos para mejorar la Resistencia Química del Concreto. (<http://www.imcyc.com/revista/1999/junio/quimica1.htm>).
- [19]. MENDOZA. J, DURAN. ROMERO, GENESCA. J. "Espectroscopia De Impedancia Electroquímica En Corrosión". Universidad Autónoma de México. México.
- [20]. Centro de investigación para la investigación de la corrosión (CIC) EVALUACIÓN DE LA CORROSIVIDAD DEL CEMENTO CONDUCTOR CELEC. Junio de 2007.
- [21]. Deyán, C. Estudio de una arcilla bentonita venezolana, pilareada y activada con ácido como catalizador en la deshidratación de alcoholes. Trabajo de Grado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná. 2005.
- [22]. Hermann E.;Kunze C.;Gatzweiler R.;Kiebig G. y Davitovits J. Proc of Geopolymers. 1999. 211.
- [23]. Palomo, A., Grutzeck, M. W. y Blanco, M. T. Cem. Concr. Res. 1999. 29:8. 1323-1329
- [24]. Gonzales, L. Jose Manuel. Las arcillas como minerales industriales: caolines, bentonitas y arcillas especiales.Discurso de ingreso leído por D. José Manuel González López en la Academia de ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza.(2000)

<http://www.unizar.es/acz/AcademicosNumerarios/Discursos/Gonzalez.pdf>

[25]. BARBOSA V., MACKENZIE K. and THAUMATURGO C. Synthesis and characterisation of materials base on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.

[26]. Fuente: SÁNCHEZ D., Tecnología del Concreto y el Mortero, 1996

[27]. BUNG Hwan Oh, SEUNG Yup Jang. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. Cement and Concrete Research 37, 47 – 53. 2007.

[28]. CLIMENT Miguel A. ,et al. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete.Cement and concrete Research 32. 113 – 1123. 2002.

[29]. CORDELO Mariela, Estudio de la Vida Útil de Estructuras de Hormigón pretensando frente a Corrosión por Cloruros, Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.

[30]. ASTM C94 /C 94M – 09: Standerd Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM – American SocietyforTesting and Materials.

[31]. VÁZQUEZ J. Empleo de la Técnica de Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas para la Caracterización de Biomateriales. Aplicación a una Aleación Biomédica de Co-Cr-Mo. Universidad Politécnica De Valencia. 2007.

[32]. Purdon. O. The action of alkalis on blast-furnace slag, J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun. 59. (1940). pp191–202.

[33]. Gluchovskij V.D. (1959) " Gruntosilikaty" Gosstrojizdat Kiev, Patent USSR 245 627 (1967), Patent USSR 449894 (Patent appl. 1958, filled 1974).

[34]. SKVARA F., JILEK T. and KOPECKY L. Geopolymer materials based on fly ash En: ceramics-silikaty. Vol.49 (2005) p. 195-204.

[35]. ORREGON Jorge. Estudio de la Estructura de Cinco Carbones Colombianos por Espectroscopia Fotoacústica en el Infrarrojo medio. Bucaramanga 2008. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

[36]. DURAN E. Correlación Entre El Contenido De Agua Del Concreto, La Resistencia A La Compresión Y La Velocidad De Pulso Ultrasónico. Universidad Industrial De Santander. Bucaramanga. 2010.

[37]. Coronado Fabiola. Florez Paola. Estudio comparativo de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros utilizando granito y residuos de la industria ladrillera como materias primas alternativas al cemento portland tipo 1. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga. 2010

[38]. Juan Mendoza. Rubén Duran. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en Corrosión. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México 2009.

[39].Martinez, F. Analisis y evaluación nano, micro y macro estructural de nanocementoshíbridos: cemento portland – geopolimero de fragado rápido para ultra thincompositespavements (etapa cero). Facultad de ingeniería civil. UMSNH. Morelia, Michoacan. Febrero de 2011.

[40]. Davidovits J. J. Therm. Anl. 1991. 37. 1633 – 1656

[41]. Hermann E.; Kunze C.; Gatzweiler R.; Kiebig G. y Davitovits J. Proc of Geopolymers. 1999. 211.

[42]. Palomo, A. y Glasser, F. P. British Ceram Trans J. 1992.107-112

[43]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, INCONTEC 321, Especificaciones químicas del cemento portland

[44]. TECNOCONCRETOS S.A. Normas Técnicas Diseños de mezclas. Bogotá: Tecboco.

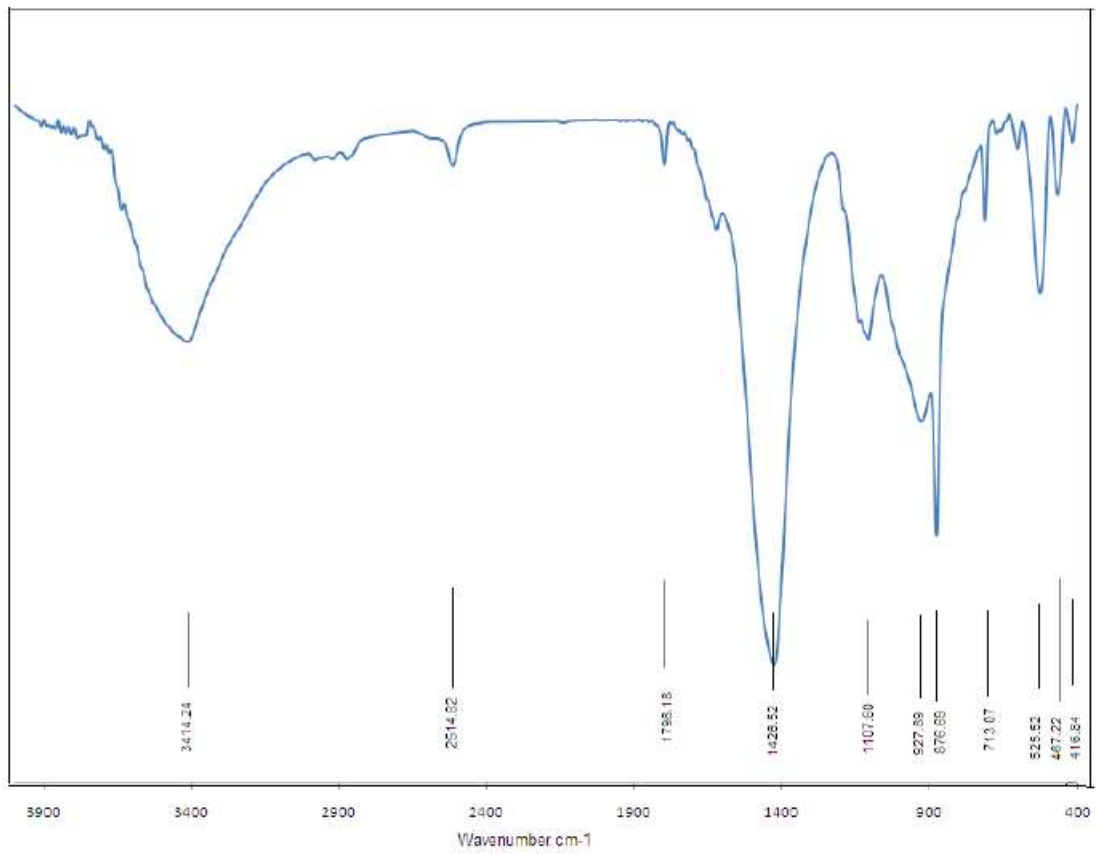
[45]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, INCONTEC, Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377.

[46]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, INCONTEC, Concretos. Ensayos de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC 673.

[47]. ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, I.N.V, Instituto Nacional de Vías, 2007. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. I.N.V.E-220-07.

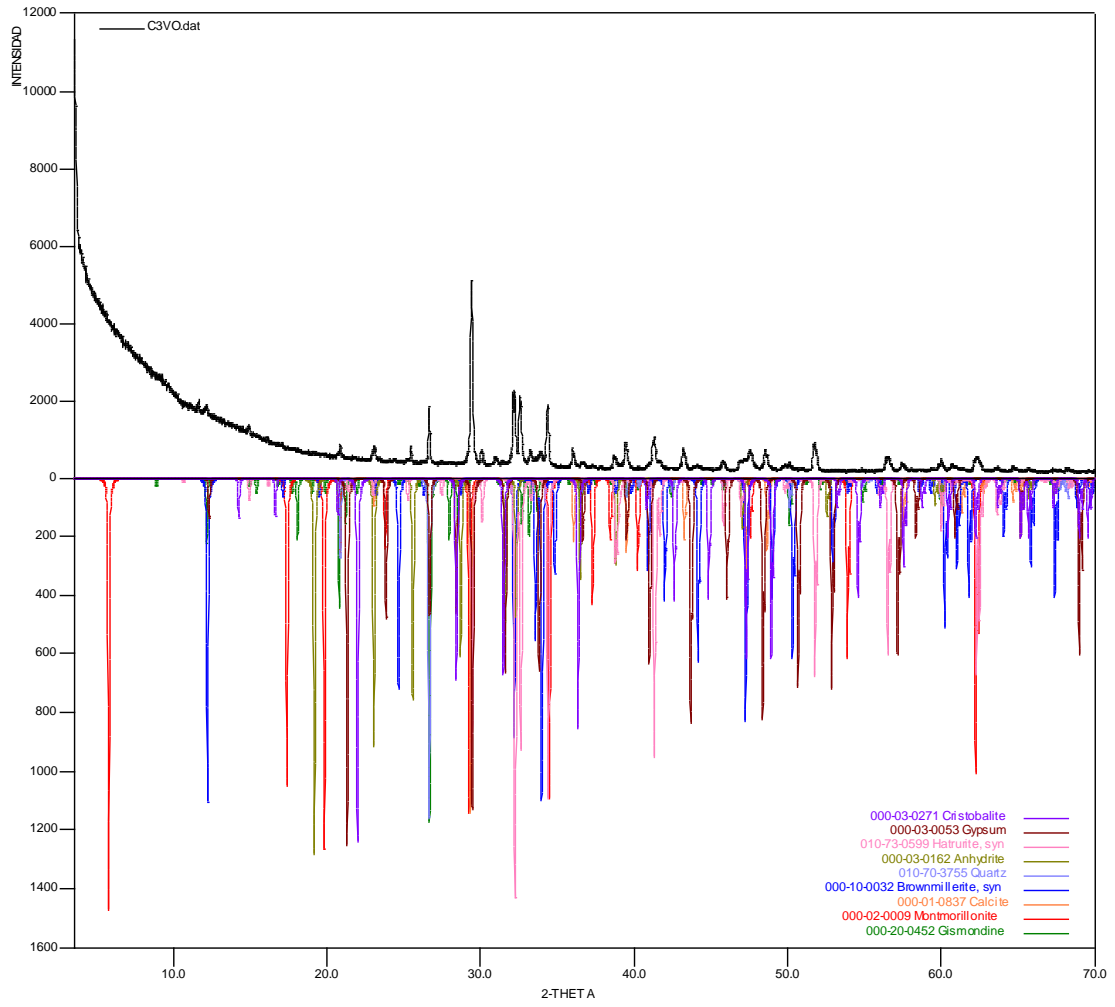
## **ANEXOS**

### **ANEXO A. ESPECTRO IR DEL CEMENTO**



## ANEXO B. DIFRACTOGRAMA DEL CEMENTO

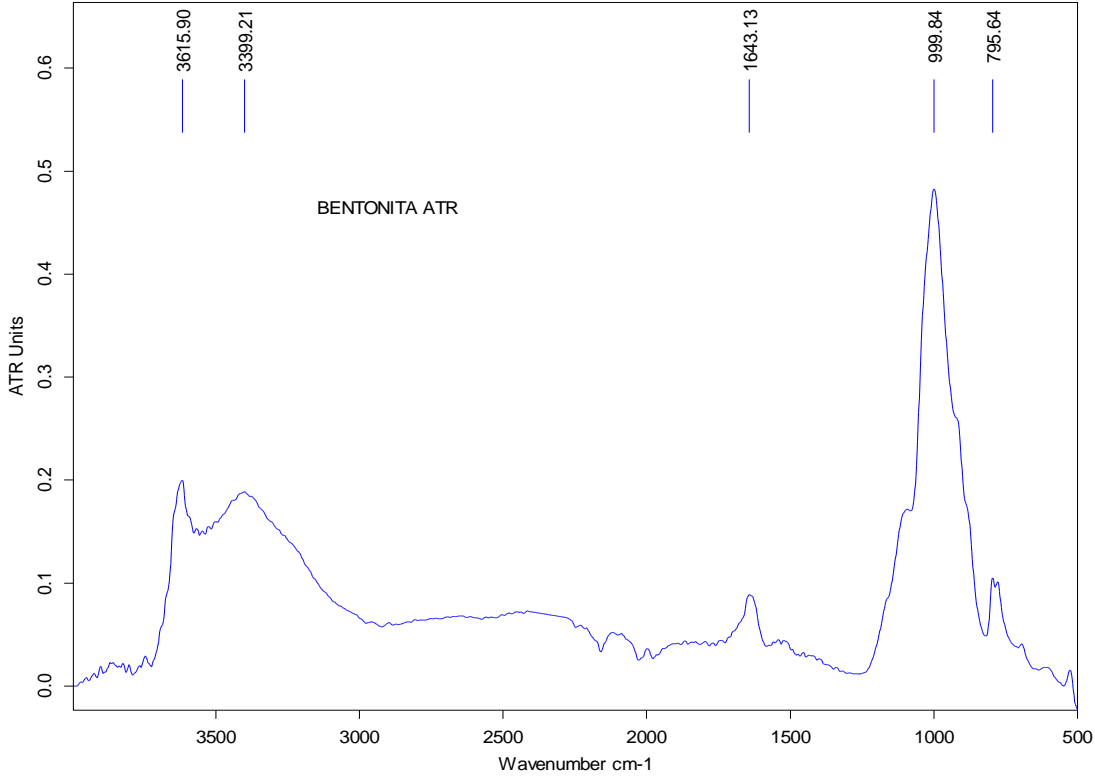
MUESTRA 3



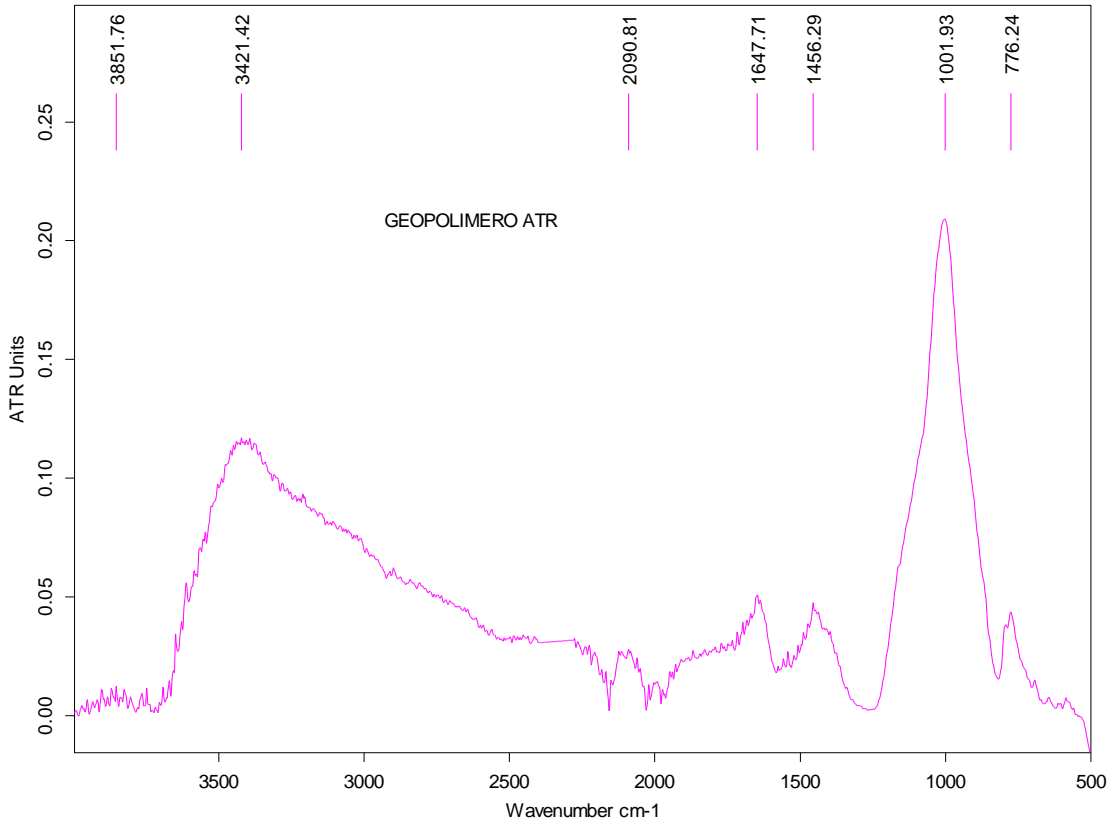
**ANEXO C. TABLA DE LOS MINERALES ENCONTRADOS EN EL CEMENTO.**

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
<b>Cristalinos</b>	$\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	000-03-0053	Yeso
	$\text{Ca CO}_3$	000-01-0837	Calcita
	$\text{Si O}_2$	010-70-3755	Cuarzo
	$\text{Si O}_2$	000-03-0271	Cristobalita
	$\text{Si}_{3.74} \text{Al}_{2.03} \text{Fe}_{0.03} \text{Mg}_{0.02} \text{O}_{11}$	000-02-0009	Montmorillonita
	$\text{Ca}_3 (\text{Si O}_4)_2 \text{O}$	010-73-0599	Hatrurita
	$\text{Ca SO}_4$	000-03-0162	Anhidrita
	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	000-20-0452	Gismondina
	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{Fe}_2 \text{O}_{10}$	000-10-0032	Browmillerita

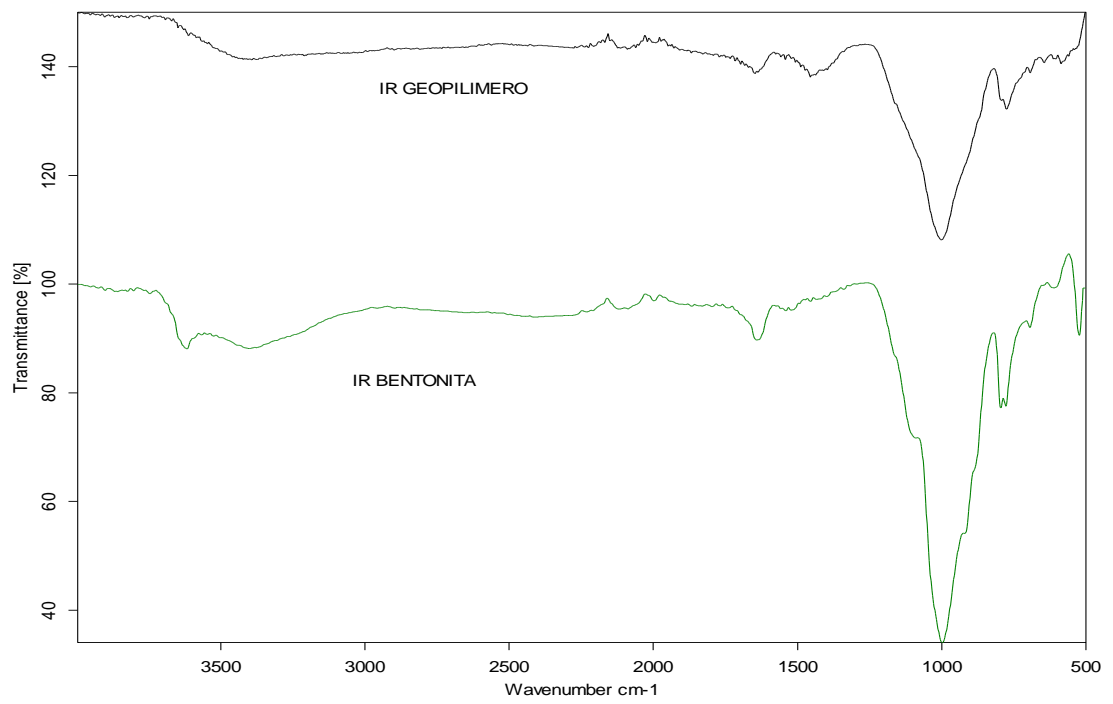
**ANEXO D. ESPECTRO ATR DE LA BENTONITA.**



# ANEXO E. ESPECTRO ATR DEL GEOPOLIMERO



## ANEXO F. ESPECTRO DE LA BENTONITA Y EL GEOPOLIMERO



## Agradecimientos

A papito DIOS que me dio la salud, la fe, la fortaleza y la sabiduría para finalizar esta etapa de mi vida.

A mi mamita hermosa, este gran logro espera ti por el gran esfuerzo, por todos los sacrificios que hizo para darme todas las cosas que necesite y enseñarme a ser valiente, gracias por todos los regaños ahora entiendo por que lo hacias, sencillamente eres LA MEJOR MAMÁ DEL MUNDO. TE AMOOOOO...

A mis hermanos Mileydi y Ivan por su gran apoyo durante toda mi carrera y a mi linda sobrina por hacerme la tía mas feliz de mundo, por esa sonrisa que siempre tienes te amo lokita hermosa.

A Oscar triana por ser el mejor novio del mundo, gracias por tu apoyo incondicional, por las cosas positivas que has impartido en mi vida, por las sonrisas que me logras sacar con cada locura que haces y dices. Te amo

A mis amigos claudia, tita, mario, marcela acevedo, ludy, marcela perez; por todos estos años que compartimos, gracias por cada sonrisa, por cada lagrima, aprendi que es una verdadera amistad, los quiero mucho.