

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS INORGÁNICOS A PARTIR
DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE UN ALUMINOSILICATO**

ANDREA KATHERINE GONZÁLEZ CÁRDENAS

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

2016

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS INORGÁNICOS A PARTIR
DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE UN ALUMINOSILICATO**

ANDREA KATHERINE GONZÁLEZ CÁRDENAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Químico

Director

ÁNGELA MARCELA MONTAÑO

PhD en Química

Co-Director

CLAUDIA GONZÁLEZ CUERVO

PhD en Ciencias – Física

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza para llegar al final de esta primera etapa de mi vida profesional; a mi abuelo Jaime González y mi madre Adelaida Cárdenas por apoyarme incondicionalmente en todo momento de mi vida, principalmente cuando el camino a seguir presenta obstáculos, por creer en todo momento y hacer de mí una gran persona con sus sabios y amorosos consejos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este momento para agradecerles a las personas que de alguna u otra forma han contribuido para la realización de este proyecto y formación académica y profesional.

A la Dra. y amiga Ángela Marcela Montaña, por su ayuda incondicional en todo momento, además de colaborarme e incentivar me durante la realización de este proyecto. Por permitirme ser su auxiliar durante dos años y medio; y por los conocimientos aportados para esta investigación, a ella gracias por siempre estar con disposición en cualquier momento y por enseñarme a apreciar esta línea de investigación con todo el entusiasmo y dedicación.

A la Dra. Claudia Paulina González docente de la Universidad Pontificia Bolivariana por el apoyo, estímulo y aportes brindados a lo largo de esta investigación.

Al Dr. Carlos Alberto Ríos por su colaboración y donación de materia primas y por permitirme realizar los análisis en el Laboratorio de Microscopía, ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

Al Profesor José Carlos, por su apoyo y sus consejos de forma incondicional, gracias por su colaboración y sugerencias en todo momento por siempre estar disponible para cualquier inquietud; además de conseguirme implementos que probablemente hubieran sido imposibles sin su ayuda, gracias por enseñarme que la vida debe enfrentarse siempre con verraquera sin importar las circunstancias.

A la Dra. Verónica García, por las recomendaciones durante la evaluación de este proyecto.

A mi gran amiga Silvia Becerra quien ha sido mi cómplice en todo momento, por el apoyo incondicional en todas las situaciones; a ella gracias por su compañía en esas noches interminables de estudio y por permitirme ver más allá de lo que nos muestra la vida.

A mis compañeros Alba, Carlos y Kehila por las noches tan largas de estudio.

Al Dr. Daniel Molina y Dr. Juan Carlos Poveda por su colaboración en esta investigación.

A la Sra. Elizabeth Díaz por su gran colaboración en esta etapa universitaria.

A mi abuelo Jaime González por ser mi padre en todo momento, por brindarme una ayuda cuando siempre la necesite, gracias a él por ser mi ejemplo a seguir a pesar de las circunstancias de salud por las que está pasando siempre me ha demostrado que la vida se enfrenta y se sigue adelante con toda la actitud y a pesar de todo siempre la familia es lo más importante en el ser humano sin importar las dificultades.

A mi familia por siempre motivarme y ayudarme en toda situación principalmente a mi madre Adelaida Cárdenas quien ha sido mi fortaleza.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron desinteresadamente en la realización de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1 GEOPOLÍMEROS	22
1.1.1 Polisialatos	25
1.1.1.1 Sialato, Poli (sialato) Si:Al=1.	25
1.1.1.2 Sialato-Siloxo, Poli (sialato-siloxo) Si: Al =2	25
1.1.1.3 Sialato-Disiloxo, Poli (sialato- disiloxo) Si: Al =3.....	26
1.1.1.4 Enlace Sialato, Poli (Sialato-multisiloxo) Si: Al >3	27
1.2 REACCIÓN DE GEOPOLIMERIZACIÓN	27
1.1.2 Activación alcalina en la reacción de geopolimerización	30
1.1.3 Otros factores que afectan el desempeño de sistemas geopoliméricos	32
1.2 FUENTES PRIMARIAS - ALUMINOSILICATOS.....	33
1.2.1 Residuos industriales.....	33
1.2.1.1 Clinker	33
1.2.2 Arcillas	34
1.2.2.1 Piedra pómez.....	34
1.2.2.2 Bentonita	34
1.3 MORTEROS DE CEMENTO	36
1.3.1 Componentes de los morteros de cemento.....	36
1.3.1.1 Agua	36
1.3.1.2 Arena	36
1.3.1.3 Cemento	37
1.3.1.4 Concreto	38
1.4 FRAGUADO	38

1.5 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	39
1.6 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	39
1.6.1 Resistencia a la compresión	39
1.7 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	40
1.7.1 Ataque con sulfatos y Ácido Clorhídrico	40
2. PARTE EXPERIMENTAL	41
2.1 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO	41
2.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PRECURSORES Y PI SINTETIZADOS	46
2.2.1 Análisis por Difracción de Rayos X	46
2.2.2 Análisis por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (FTIR-ATR)	47
2.2.3 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	47
2.2.4 Análisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)	47
2.3 ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS	48
2.3.1 Diseño de la mezcla de Mortero.....	49
2.4 FRAGUADO	51
2.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ICONTEC 220.	52
2.6 RESISTENCIA QUIMICA DE MORTEROS, ICONTEC 489.....	52
2.7 RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS A LOS ATAQUES CON Na_2SO_4 ICONTEC 126	53
3. ANALISIS RESULTADOS	54
3.1. SINTESIS DE LOS PI	54
3.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	55
3.2.1 Difracción de Rayos X	55
3.2.1.1 Difracción de Rayos X de la BT y PI de BT	55
3.2.1.2 Difracción de Rayos X del CL y PI de CL	57
3.2.1.3 Difracción de Rayos X de la PP y PI de PP	59

3.2.1.4 Difracción de Rayos X del CP	61
3.2.2 Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (FTIR-ATR).....	62
3.2.2.1 Espectroscopia Infrarroja BT y PI de BT	63
3.2.2.2 Espectroscopia Infrarroja CL y PI de CL	65
3.2.2.3 Espectroscopia Infrarroja PP y PI de PP	66
3.2.2.4 Espectroscopia Infrarroja CP	67
3.2.3 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	68
3.2.4 Analisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)	72
3.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	76
3.3.1 Resistencia a la compresión	76
3.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	80
3.4.1 Resistencia Química	80
3.4.1 Resistencia a los sulfatos.....	84
4. CONCLUSIONES	87
4. RECOMENDACIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
BIBLIOGRAFIA.....	105
ANEXOS	119

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Configuración tetraédrica del sialato Si-O-Al-O, de acuerdo a Davidovits 1976.	22
Figura 2. Estructuras de los tipos de polisialatos ⁹	23
Figura 3. Estructura de Sialato, Poli (sialato) Si: Al=1 ²¹	25
Figura 4. Estructura del Sialato-Siloxo, Poli (sialato-siloxo) Si: Al =2 ²¹	26
Figura 5. Estructura de Sialato-Disiloxo, Poli (sialato- disiloxo) Si: Al =3 ²¹	26
Figura 6. Estructura del Enlace Sialato, Poli (Sialato-multisiloxo) Si:Al > 3 ²¹	27
Figura 7. Reacciones químicas en un sistema geopolimérico en ausencia de cationes Ca ⁺² . ²⁶	29
Figura 8. Diagrama de la estructura de la bentonita. ⁴⁸	35
Figura 9. Representación esquemática del desarrollo experimental	44
Figura 10. Mezcla de Mortero en la mezcladora	50
Figura 11. Resistencia Química de los agregados a los ataques con Na ₂ SO ₄	53
Figura 12. Mecanismo de reacción de la geopolimerización ⁶¹	54
Figura 13. XRD de la BT y PI de BT	56
Figura 14. XRD de la CL y PI de CL	58
Figura 15. XRD de la PP y PI de PP	60
Figura 16. XRD del CP	62
Figura 17. FTIR de BT y PI de BT	64
Figura 18. FTIR de CL y PI de CL	65
Figura 19. FTIR de PP y PI de PP	66
Figura 20. FTIR de CP	67
Figura 21. SEM de la BT (izquierda) y PI de BT (derecha), con aumentos de 5000x y 4000 x respectivamente.	69
Figura 22. SEM del CL (izquierda) y PI de CL (derecha), con aumentos de 5000x.....	69

Figura 23. SEM del PP (izquierda) y PI de PP (derecha), con aumentos de 2000x.....	70
Figura 24. SEM del CP con aumento de 5000x	70
Figura 25. EDS de la BT	72
Figura 26. EDS del PI de BT.....	73
Figura 27. EDS del CL.....	73
Figura 28. EDS del PI de CL.....	74
Figura 29. EDS del PP.....	74
Figura 30. EDS del PI de PP	75
Figura 31. EDS del CP	75
Figura 32. Resistencia a la Compresión del PI del BT	77
Figura 33. Resistencia a la Compresión del PI del PP	78
Figura 34. Resistencia a la Compresión del PI del CL	79
Figura 35. % Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado de los PI (BT 10%, CL 10% y PP al 10%) y CP.....	81
Figura 36. Resistencia a la compresión a partir de la norma ICONTEC 489.....	83
Figura 37. % Pérdida de masa según la norma ICONTEC 126	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores que determinan la geopolimerización	29
Tabla 2. Compuestos del Cemento Portland (CP)	37
Tabla 3. Clasificación del Cemento Portland (CP). ⁵²	37
Tabla 4. Materias primas empleadas en la síntesis de los PI.....	41
Tabla 5. Propiedades químicas y físicas de Na ₂ SiO ₃ suministrado por Conquímica S.A.....	42
Tabla 6. PI sintetizados	45
Tabla 7. Condiciones de trabajo para la toma de datos de DRX.....	46
Tabla 8. Parámetros para el diseño de mezcla de los morteros de 50 x 50 x 50 mm de lado. ³	48
Tabla 9. Total de Morteros de 50 x 50 x 50 mm realizados	49
Tabla 10. Construcción de morteros de acuerdo a la norma ICONTEC 119 y 220.	50
Tabla 11. Fraguado de los cubos de mortero.....	51
Tabla 12. Fases mineralógicas de la bentonita	56
Tabla 13. Fases mineralógicas del PI de BT	57
Tabla 14. Fases mineralógicas del CL	58
Tabla 15. Fases mineralógicas del PI de CL.....	59
Tabla 16. Fases mineralógicas del PP.....	60
Tabla 17. Fases mineralógicas del PI de PP.....	61
Tabla 18. Fases mineralógicas del CP.....	62
Tabla 19. Bandas características de minerales silicoaluminosos y materiales activados alcalinamente.....	63
Tabla 20. Promedio aritmético de la resistencia a la compresión de cada mezcla.	77
Tabla 21. Resistencia Química de Morteros al 10% de PI	82

Tabla 22. Resistencia a la Compresión posterior al ataque con ácido. ⁷⁶	83
Tabla 23. Pérdida de masa de acuerdo al ataque con Na ₂ SO ₄ ^{77, 78}	85
Tabla 24. Comparación de CP con los PI al ataque con Na ₂ SO ₄	85

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Hipótesis y objetivos.....	119
Anexo B. Problema.....	121
Anexo C. Justificación	123
Anexo D. Estado del arte	125
Anexo E. Difracción de Rayos X.....	128
Anexo F. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (ATR)	130
Anexo G. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	132
Anexo H. Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X.....	133
Anexo I. Trituración y molienda de la PP	135
Anexo J. Resistencia Química ICONTEC 489	139
Anexo K. Certificados del XIV Seminario Latinoamericano de Análisis por Técnicas de Rayos X.....	141
Anexo L. Certificados del Congreso Internacional de ingeniería Mecánica y Ciencias de la Agricultura.	142

LISTADO DE ABREVIATURAS

PP	Piedra Pómez
CL	Clinker
BT	Bentonita
XRD	Difracción de Rayos X
FTIR-ATR	Infrarrojo con transformada de Fourier con celda ATR
EDS	Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X
GIC	Grupo de Investigación en Corrosión
PTG	Parque Tecnológico Guatiguará
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
PI	Polímero Inorgánico
SARX	Seminario Latinoamericano de Análisis por Técnicas de Rayos-X
CIIMCA	Congreso Internacional de ingeniería mecánica y ciencias de la agricultura
RC	Resistencia mecánica a la Compresión
RQ	Resistencia Química
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	Ferrito aluminato tetracálcico
PS	Polisialato
PSS	Polisialato-siloxo
PSDS	Polisialato-disiloxo
CBC	Cementos portland de bajo calor de hidratación

DIVULGACIONES

Algunos apartes de esta investigación fueron presentados en el XIV Seminario Latinoamericano de Análisis por Técnicas de Rayos-X (SARX-2014) con el trabajo titulado “Caracterización estructural de nuevos polímeros inorgánicos con aplicación cementante”, el cual fue presentado en modalidad póster. Dicho evento se llevó a cabo del 3 al 7 Noviembre de 2014 en la ciudad de Carlos Paz (Córdoba) Argentina (Anexo K).

Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Agricultura (CIIMCA-2013) con el trabajo titulado “Synthesis and characterization of inorganic polymers from the alkali activation of a aluminosilicate”, el cual fue presentado en la modalidad poster. Dicho evento se llevó a cabo del 9 al 11 de Octubre de 2013, en el municipio de Floridablanca, Santander en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). El certificado de asistencia es mostrado en el Anexo L.

Materials Science and Engineering 59 (2014) doi:10.1088/1757-899X/59/1/012001, Gran Bretaña, IOP Conf. Series con el título “Synthesis and characterization of inorganic polymers from the alkali activation of a aluminosilicate”.

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE NUEVOS POLÍMEROS INORGANICOS CON APLICACIÓN CEMENTANTE*

AUTOR: ANDREA K. GONZÁLEZ CÁRDENAS**

PALABRAS CLAVES: Aluminosilicatos, Polímero inorgánico, Silicato de sodio.

En este trabajo se presentan los resultados de la síntesis, caracterización: estructural y mecánica de los polímeros inorgánicos (PI) de aluminosilicatos: piedra pómez (PP), bentonita (BT) y clinker (CL). La síntesis de PI se llevó a cabo por dos métodos diferentes: en el método 1 se emplearon dos temperaturas: ambiente y 80 ± 5 °C, utilizando como medio acuoso silicato de sodio de grado comercial (Na_2SiO_3). En el método 2 se utilizó como solución activante una relación equimolar 2:1 de silicato de sodio analítico e hidróxido de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/ 3,7$ y 12 M NaOH). Una vez evaluados los parámetros de temperatura y alcalinidad del silicato de sodio a través de las metodologías descritas anteriormente, se concluyó que la síntesis de los geopolímeros solamente fue posible mediante el método 1, realizando calentamiento a 80 ± 5 °C. En los demás procedimientos realizados, no se observó la disolución de los precursores y por lo tanto no se presentó formación de la matriz polimérica.

Los polímeros obtenidos se caracterizaron estructuralmente mediante Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (FTIR-ATR), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) y Difracción de Rayos X (XRD). Los resultados de FTIR-ATR, DRX y EDS permiten comprobar que la reacción de geopolimerización fue llevada a cabo en el medio de reacción, a través de una activación alcalina, que implica un reordenamiento estructural en los aluminosilicatos (PP, CL y BT), debido a la formación del enlace Si-O-Al en cada PI sintetizado. *Finalmente, con los resultados de SEM se concluye que no toda la materia prima se polimeriza.*

Para evaluar el comportamiento de la resistencia a la compresión y durabilidad de los PI sintetizados se realizaron pruebas de resistencia a la compresión según la norma ICONTEC 220.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Química; Director: Ángela Marcela Montaña, Co-Director: Claudia González Cuervo

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF NEW INORGANIC POLYMERS WITH APPLICATION OF CEMENT*

AUTOR: ANDREA K. GONZÁLEZ CÁRDENAS**

KEY WORDS: Aluminosilicate, Inorganic polymer, sodium silicate.

This document presents the results of the synthesis and structural and mechanical characterization of inorganic polymers (PI) of aluminosilicates: stone pumice (PP), bentonite (BT) and clinker (CL). PI synthesis was carried out by two different methods; in method 1 two temperatures were used, ambient temperature and 80 ± 5 °C, using commercial grade aqueous silicate (Na_2SiO_3). On the other hand, in method 2 was used as activating solution an equimolar ratio 2:1 of analytical sodium silicate and sodium hydroxide ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/ 3, 7$ y 12 M NaOH). After being evaluated the parameters of temperature and alkalinity of sodium silicate through the methodologies described above, it was concluded that the synthesis of the geopolymers was only possible by method 1, performing heating at 80 ± 5 °C. In the other procedures, the dissolution of its precursors wasn't observed and therefore the formation of the polymer matrix wasn't submitted.

The materials were structurally characterized by infrared spectroscopy with Fourier transformed, of attenuated reflectance (FTIR-ATR), scanning electron microscopy (SEM), energy disperse spectroscopy of X ray (EDX) and X ray diffraction (XRD). The results of FTIR-ATR, DRX and EDS enable to check that the geopolymerization reaction was carried out in the means of reaction, through an alkaline activation, involving a structural rearrangement in aluminosilicates (PP, CL y BT), due to the formation of the Si-O-Al bond for each synthesized PI. Finally, with the results of SEM is concluded not all raw material is polymerized.

To evaluate the behavior of resistance to compression and durability of the synthesized PI, were carried out some tests to the compression according to the nom ICONTEC 220 compression strength.

* College thesis

** Faculty of Science, School of Chemistry, Directed by: Angela Marcela Montaña, Co-Directed by: Claudia González Cuervo

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del desarrollo socioeconómico y el aumento poblacional la demanda del *Cemento Portland* (CP) como material de construcción ha incrementado. Su producción anual se estima alrededor de 1.8×10^9 toneladas a nivel mundial, cifra que va en progreso.¹

El proceso de fabricación del CP es una de las prácticas más contaminantes, debido a que el 6 al 7% de las emisiones de CO₂ del planeta corresponden a la industria cementera. Esta junto con grupos de investigación buscan soluciones para la conservación y protección de los recursos no renovables mediante el desarrollo de nuevas materias primas que mejoren los procesos de producción y calidad del cemento alcanzando la sostenibilidad.

De forma que la sustitución parcial o total de CP por diferentes materiales, como las arcillas y residuos industriales en las mezclas cementantes, ha dado lugar a los cementos compuestos, cementos portland de bajo calor de hidratación (CBC) y los geopolímeros. Estos últimos consisten en polímeros inorgánicos (PI) que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización, donde la materia prima son los aluminosilicatos, los cuales son fuente de óxido de silicio y aluminio que son activados por un agente oxidante, estos pueden ser utilizados como material cementante debido a que presentan características similares al cemento; además de contribuir en la disminución en las emisiones de grandes volúmenes de sustancias en estado gaseoso (CO₂, NO_x, SO_x) producidas en el proceso de clinkerización.²

En el presente trabajo se presentan los resultados de la síntesis de geopolímeros a partir de la activación alcalina de arcillas: bentonita, piedra pómez, y un residuo industrial: clinker, para la obtención de un nuevo material con propiedades

similares a las del CP. La evaluación como material de construcción en obras civiles de los PI sintetizados se realiza mediante tres análisis; el primero de ellos estructural, mediante Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) y Difracción de Rayos X (XRD). El segundo análisis mediante una caracterización mecánica por medio de la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma ICONTEC 220 aplicada a los morteros de CP, con sustituciones de PI al 10 y 30%, medidas a 1, 3,7, 14, 28, 41, 90 y 120 días de curado. Por último se realiza un análisis químico, de acuerdo a la norma ICONTEC 126 para evaluar la resistencia de los agregados poliméricos a los ataques con sulfato de sodio (Na_2SO_4) según la norma ICONTEC 489.³

1. MARCO TEORICO

1.1 GEOPOLÍMEROS

El termino geopolímero se introdujo en 1979 por Joseph Davidovits, para la designación química de polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos procedentes de la reacción química conocida como geopolimerización.^{4, 5} La estructura de los geopolímeros está conformada por una red polimérica de sialatos (Si-O-Al) constituida por tetraedros de SiO_4 y AlO_4^- enlazados alternativamente con átomos de Oxígeno. El Aluminio al tener un número de coordinación de cuatro (Al^{IV}) con relación al Oxígeno crea una carga negativa desbalanceada y por lo tanto, la presencia de cationes como el K^+ , Na^+ y Ca^{2+} es esencial para mantener la neutralidad en la matriz. El metal alcalino contribuye a la disolución de la sílice y alúmina y a la vez actúa como catalizador de la reacción de condensación.⁶

Figura 1. Configuración tetraédrica del sialato Si-O-Al-O, de acuerdo a Davidovits 1976.



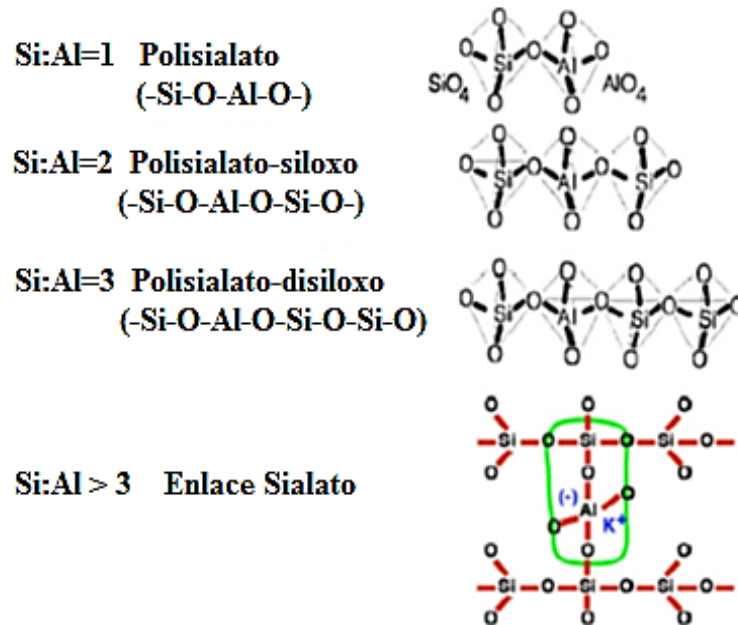
Fuente: YEPES GAVIRIA Olga Nallive BEDOYA MONTOYA Carlos Mauricio GÓMEZ EUSSE Juan David. Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. del bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de tierra con geopolímeros (BTG). Colombia (2012). P: 240-247.

Los polisialatos son anillos o cadenas poliméricas con Si^{4+} y Al^{3+} en número de coordinación IV con el oxígeno, cuya fórmula empírica puede ser descrita como⁷:



Donde w puede tomar valores de números enteros, z toma solo los valores entre 1, 2 o 3, M es un catión monovalente tal como el potasio y el sodio (K^+ o Na^+) y n es el grado de policondensación o polimerización. De acuerdo a lo anterior los tipos de geopolímeros han sido agrupados como: polisialatos (Si-O-Al-O-), polisialato-siloxo (Si-O-Al-O-Si-O-) y polisialatos-disiloxo ($\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}$), teniendo en cuenta la relación Si/Al, la cual puede variar de 1 a 3.⁸

Figura 2. Estructuras de los tipos de polisialatos⁹



Fuente: Yunsheng ZHANG; Wei SUN; Zongjin LI. *Applied clay science*. Volume 47 (2010) 271-275.

Si la relación de Si:Al es menor, como es el caso del polisialato (PS), sus aplicaciones son para el aislamiento térmico y para la resistencia al fuego, mientras que si la relación es mayor, como ocurre con el polisialato-siloxo (PSS) se utiliza en cementos de alto rendimiento, residuos tóxicos y como refractarios para la fundición de aluminio; aunque si la relación es de tres se trata de polisialato-disiloxo (PSDS), el cual se emplea como material para herramientas en el rango de temperatura entre 600-1000°C, ya que posee propiedades fisicoquímicas superiores en comparación con el PS y el PSS.^{10,11}

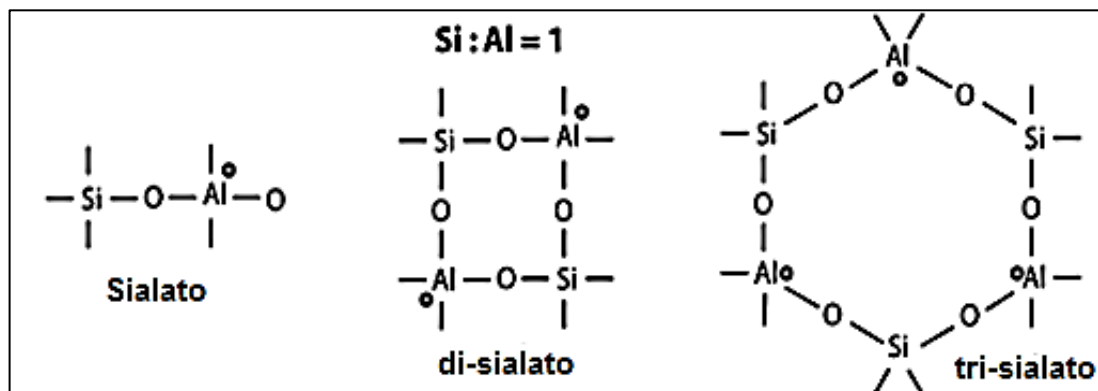
Se debe tener en cuenta que las propiedades de estos geopolímeros dependen también de la selección de las materias primas y las condiciones de procesamiento, además su formación está influenciada por parámetros tales como la temperatura de curado, concentración alcalina, contenido de sílice y otros.^{12,13} Sin embargo presentan grandes beneficios tales como: una excelente resistencia al ácido, resistencia al fuego, fácil procesamiento, baja densidad, bajo costo y baja conductividad térmica, que le permiten tener un efecto sustancial sobre las propiedades finales del cemento, razón por la cual se pueden utilizar como posibles materiales cementantes; además no solo su producción requiere menos energía y pocas emisiones, sino que las matrices hidratadas del cemento geopolimérico tienen unas propiedades ingenieriles únicas que las distinguen de otros conglomerantes. Por ejemplo, el cemento geopolimérico puede tener una docilidad excelente mientras alcanza una resistencia a compresión a temprana edad y una durabilidad a largo plazo frente a diversos tipos de agresivos elevados comparado con las matrices hidratadas tradicionales del CP.^{14,15}

Su síntesis implica reacciones de policondensación con óxidos de aluminosilicatos, tales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos industriales, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales, los cuales son combinados con un activador alcalino ($\text{NaOH} / \text{Si}_2\text{O}_3$) a bajas temperaturas (inferiores a 200 °C) para generar enlaces poliméricos de tipo Si-O-Al.^{16,17,18}

1.1.1 Polisialatos Sialato, es una forma de abreviar el álcali de silicio-oxo-aluminato (Si-O-Al), el álcali es sodio-potasio-litio-calcio y el término poli (sialato) cubre todos los geopolímeros que contienen al menos una unidad de sialato (Na, K, Li, Ca) (Si-O-Al) de acuerdo a Davidovits, 1976. Se muestran algunos ejemplos de estructuras moleculares sialato; las cuales implican al menos cuatro unidades elementales clasificadas de acuerdo a la relación de los átomos de Si: Al.^{19, 20}

1.1.1.1 Sialato, Poli (sialato) Si:Al=1. (-Si-O-Al-O-) es de cadena y el anillo es el resultado de la policondensación del monómero, orto-sialato (OH)₃-Si-o-Al-(OH)₃.

Figura 3. Estructura de Sialato, Poli (sialato) Si: Al=1²¹

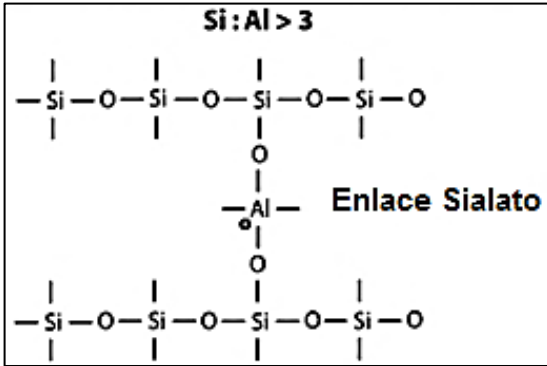


Fuente: JOSEPH DAVIDOVITS. Geopolymer chemistry and applications. Second Edition (2008).France. Pp: 19-31.

1.1.1.2 Sialato-Siloxo, Poli (sialato-siloxo) Si: Al =2. (-Si-O-Al-O-Si-O-) puede considerarse como el resultado de la condensación ortosialato con el ácido ortosilícico Si(OH)₄. Son tres isomorfos, un lineal (-Si-O-Si-O-Al-O-), mono-siloxo-sialato y 3 ciclos.

1.1.1.4 Enlace Sialato, Poli (Sialato-multisiloxo) Si: Al >3. Se designa el enlace Si-O-Al entre dos cadenas de poli (siloxano), poli (silano) o poli (sialato).

Figura 6. Estructura del Enlace Sialato, Poli (Sialato-multisiloxo) Si:Al > 3²¹



Fuente: JOSEPH DAVIDOVITS. Geopolymer chemistry and applications. Second Edition (2008).France. Pp: 19-31.

1.2 REACCIÓN DE GEOPOLIMERIZACIÓN

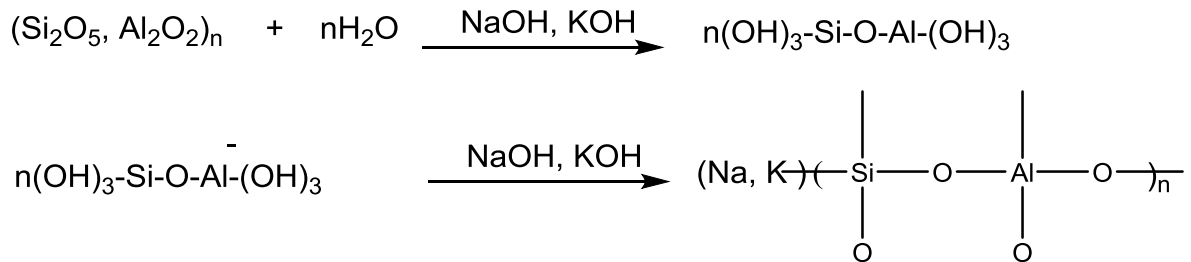
La geopolimerización es una reacción química de minerales, cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alúmina (silicoaluminatos), y presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina (sustancia activante), la cual debe estar constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica.²¹ 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 monómeros inorgánicos en la solución y luego ser policondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales.^{22,23}

Dicha síntesis se lleva a cabo por tres mecanismos que pueden ocurrir simultáneamente y son reversibles en cierta medida, la cinética de cada una de

estas etapas varía según la selección de las materias primas, concentración del silicato de sodio, relación sólido/líquido (fuente de aluminosilicatos/solución activadora de silicato de sodio e hidróxido de sodio), contenido de agua; las etapas correspondientes son:

- Disolución/ hidrólisis: La geopolimerización comienza con la hidrólisis de H^+ con cationes monovalentes (Na^+ , K^+) en la superficie sólida del aluminosilicato, luego se lleva a cabo la disolución continua del precursor de aluminosilicato, el producto es la formación de monómeros de silicato ($Si(OH)_4$) y aluminato ($Al(OH)_4^-$) los cuales continúan la geopolimerización.
- Reestructuración: En la solución los precursores de aluminio se orientan para obtener un estado más estable termodinámicamente antes de la policondensación.
- Policondensación: En este paso las unidades tetraédricas forman una estructura amorfa tridimensional de aluminosilicato, correspondiente al geopolímero, como producto secundario se obtiene agua. Posteriormente el fraguado y endurecimiento a causa de la condensación de geles, formando redes tridimensionales y con un alto grado de amorficidad permiten la transformación al estado sólido de los geles de aluminosilicatos.^{24,25}

Figura 7. Reacciones químicas en un sistema geopolimérico en ausencia de cationes Ca^{+2} .²⁶



Fuente: PAVEL ROVNANIK; Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer; construction and building materials; 24 (2010) 1176–1183.

Las anteriores reacciones indican que cualquier material rico en silicio o aluminio se puede tomar como material de partida para dicha reacción.¹⁶ En el proceso de síntesis, el agua desempeña un papel importante, haciendo parte de las reacciones de disolución, hidrólisis y policondensación, produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O.²⁷

Teniendo en cuenta la importancia de las materias primas, así como los activadores alcalinos se ha identificado los parámetros que intervienen en el proceso de geopolimerización y propiedades del producto final mostrados en la Tabla 1.²⁸

Tabla 1. Factores que determinan la geopolimerización

Fuente Primaria	1. Composición Química
	2. Mineralogía
	3. Microestructura
	4. Distribución de tamaño de partícula
Activador Alcalino	1. Alcalinidad

	2. Tipo y naturaleza
	3. Relación Si / Catión
	4. Relación especies iónicas

Se debe tener presente que para la producción de materiales geopoliméricos, se dispone de una gran variedad de materias primas y de activadores alcalinos, que son útiles como fuentes de partida en la reacción de geopolimerización.

Dicha reacción está basada en la química de la activación alcalina de cementos, la cual fue presentada inicialmente por Purdon O, quien propuso que el mecanismo de endurecimiento de silicoaluminatos activados involucra la disolución de Si y Ca en presencia de NaOH y precipitación de silicato cálcico hidratado (C-S-H) o aluminatos hidratados. La aplicación industrial de este tipo de reacción alcalina con la caolinita tuvo sus inicios en la industria cerámica con Olsen N. en 1970. A partir de esta fecha y en especial en la década del 90 se conformaron grupos de investigación con el objetivo de profundizar en el conocimiento de estos procesos y generar nuevos materiales y/o aplicaciones tecnológicas. De tal manera que el desempeño mecánico de 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. Permitiendo brindar la alternativa de controlar la nanoestructura, porosidad y propiedades de los materiales geopoliméricos.^{29, 30}

1.1.2 Activación Alcalina en la reacción de Geopolimerización La influencia de la solución activante en la cinética de la geopolimerización, es una variable que contribuye para obtener materiales con una resistencia mecánica más elevada. De manera que el tipo y concentración de este, es fundamental en esta reacción, para solubilizar el aluminosilicato seleccionado como materia prima la cual depende de la concentración del ion hidróxido y así favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta.^{14, 31}

Los cationes alcalinos juegan un papel importante en la primera etapa de dicha geosíntesis, ordenando las moléculas de agua y más tarde las especies de silicato solubles para iniciar el proceso de nucleación y así formar una estructura geopolimérica. En esta etapa, el catión determina la estructura final y sirve como modelo para direccionar y controlar la capacidad, tan rápido como sea posible, de la policondensación y crecimiento estructural. El tamaño del catión afecta la morfología de la estructura. De esta manera, el catión potasio K^+ parece ser el responsable de un mayor grado de condensación y resistencia mecánica del producto final en comparación al Na^+ , cuando son incorporados bajo las mismas condiciones. Este ión metálico K^+ presenta una mayor basicidad y mayor tamaño, permitiendo una velocidad más alta de disolución y con ello se promueve de forma eficiente la reacción de policondensación, para obtener estructuras más resistentes y densas. Aunque se ha encontrado cierta controversia al respecto, ya que algunos investigadores aseguran que el NaOH permite obtener un mayor grado de disolución de minerales naturales teniendo una capacidad más alta de liberar monómeros de silicato y aluminato de la fuente de aluminosilicatos, comparado con el KOH. Además, la utilización de soluciones alcalinas con silicatos solubles de sodio o potasio genera cinéticas de reacción más altas frente a soluciones con hidróxidos alcalinos, para producir estructuras más compactas.³²

Se debe tener en cuenta que la solución activante puede ser de dos tipos: hidróxidos alcalinos y silicatos disueltos en el activador básico; tales como hidróxidos (ROH , $R(OH)_2$), sales de ácido débil (R_2CO_3 , R_2S , RF), sales de ácido fuerte (Na_2SO_4 , $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y sales silícicas del tipo $R_2O(n)SiO_2$ donde R es un ión alcalino del tipo Na, K o Li. Los más utilizados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos.³³ De tal forma que las propiedades físicas de los geopolímeros pueden ser mejoradas mediante el incremento de silicatos solubles, presentes en el activador alcalino y por consiguiente obtener diferentes propiedades mecánicas.^{34, 35}

1.1.3 Otros factores que afectan el desempeño de sistemas geopoliméricos

Los factores que afectan la reacción de geopolimerización a parte de la solución activante es la temperatura, tiempo de la reacción, composición y concentración del medio alcalino o de la solución activante.

Tales factores afectan la cinética de la reacción, teniendo en cuenta que en el caso de la temperatura, al incrementar esta, se acelera la velocidad de la reacción, favoreciendo la disolución de las materias primas, con lo cual se pueden obtener mejores valores de resistencia mecánica del geopolímero. Sin embargo, temperaturas entre 30° y 90 °C permiten aumentar los valores de resistencia a la compresión de los productos geopoliméricos. Aunque si esta es mayor a 150 °C y el tiempo de la reacción es muy prolongado puede ocasionar un cambio en los valores de resistencia mecánica siendo estos no muy buenos debido a la deshidroxilación y contracción de la estructura amorfa dentro de la matriz polimérica, generando el crecimiento de grietas en la geopolímero por la contracción del material.^{36, 37}

Otro factor a tener en cuenta es el agua, porque hace parte de la disolución, policondensación y endurecimiento del geopolímero, siendo un parámetro que influye en la resistencia mecánica de este. En el caso del metacaolín uno de los aluminosilicatos más investigados, al tener un tamaño de partícula muy pequeño pero una superficie alta necesitara mayores cantidades de agua, lo cual puede generar dificultades en el secado y agrietamiento del mismo.

Finalmente, se debe tener presente que los factores anteriormente mencionados, influyen en la velocidad de la reacción, así como la distribución del tamaño de partícula, debido a que una molienda más fina de la materia prima permitirá entrar en contacto con mayor facilidad a las sustancias implicadas en la reacción para una mejor activación química, que permita obtener mejores materiales poliméricos con una resistencia mecánica mayor.³⁸

1.2 FUENTES PRIMARIAS - ALUMINOSILICATOS

Para la obtención de materiales geopoliméricos se pueden emplear materias primas como minerales que sean fuentes de óxido de silicio y aluminio con cationes monovalentes y divalentes como: sodio, potasio, calcio, magnesio, entre otros.¹⁴ Estas fuentes incluyen desechos industriales (cenizas volantes, clinker y diferentes tipos de escorias) y minerales naturales (arcillas) ricos en aluminosilicatos, los cuales pueden presentar diferente grado de reactividad como es el caso de la piedra pómez y la bentonita.³⁹⁻⁴¹

1.2.1 Residuos industriales Los residuos industriales se obtienen a partir de la combustión del carbón, generando varios subproductos como las cenizas volantes y el clinker que presentan aplicabilidad en el cemento.⁴²

1.2.1.1 Clinker El clinker hace referencia a las rocas sedimentarias alteradas térmicamente por la combustión espontánea de los mantos de carbón del subsuelo, formado cuando los elementos no combustibles contenidos en el carbón, tales como el hierro, calcio, silicio, aluminio y sodio interactúan con el carbón a altas temperaturas. El clinker está conformado principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , MnO .

El proceso de formación del CL es oxidativo, debido a que ocurre por la exposición del carbón a diferentes condiciones atmosféricas causadas por la erosión o la minería a cielo abierto y por contacto con el oxígeno, bien sea introducido por profundidad o por la presencia de agua en el sistema. (Lyman, 2001). La oxidación natural "in situ" del carbón se acelera rápidamente generando el autocalentamiento y posterior autocombustión. El proceso de combustión se da cuando entra en contacto con el oxígeno.^{43, 44}

El CL puede encontrarse de color rojo, gris, negro, crema o blanco, estas rocas tienen características comunes que han sido reportadas alrededor del mundo, pero por su contenido de sílice lo hacen una fuente eficaz para la síntesis de nuevos materiales. El clinker utilizado para este trabajo proviene de la termoeléctrica de Zipaquirá, Colombia.

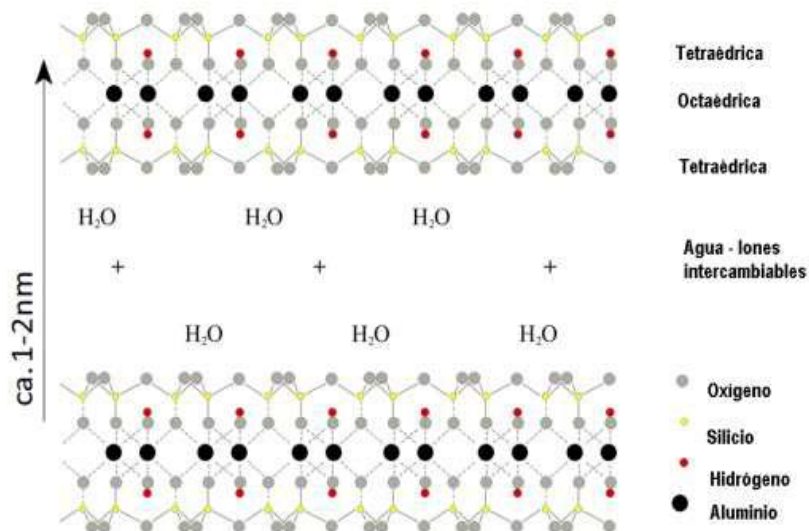
1.2.2 Arcillas Las arcillas son agregados de aluminosilicatos, cuya fórmula corresponde a $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, estas se caracterizan por adquirir plasticidad al estar mezcladas con agua por lo que son utilizadas en procesos industriales tales como la producción del cemento.

1.2.2.1 Piedra Pómez La piedra pómez conocida también como pumita, corresponde a un silicato volcánico de aluminio con un alto contenido de sílice superior al 50 %, su estructura está compuesta por partículas vítreas que poseen varias formas predominando las alargadas y angulosas. Debido a su origen volcánico presenta una gran cantidad de poros que dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo y un bajo peso unitario, presentando también resistencia al fuego y frío. Sus aplicaciones son principalmente en las industrias de construcción para la fabricación de morteros destinados a mejorar las condiciones térmicas. La piedra pómez utilizada para este trabajo proviene de Geopómez Sabaneta-Antioquia, Colombia.⁴⁵

1.2.2.2 Bentonita La bentonita es una roca del grupo de las arcillas esmectitas, el cual es el nombre genérico que recibe un grupo de filosilicatos cuyas composiciones corresponden a la de silicatos alumínicos y/o magnésicos de Na, Ca, Mg, Fe y Li, hidratados. Esta es muy suave y fina, compuesta principalmente de montmorillonita $-(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})^-$. Además de contener otras arcillas minerales (caolinita, illita, beidellita).⁴⁶

La montmorillonita es conocida por su capacidad adsorbente para muchas sustancias (aguas, aceites, otros productos químicos, etc.); además de su alcalinidad y acidez variable, su hinchamiento interno luego del contacto con el agua, alta plasticidad, habilidad de ligamiento, capacidad de intercambio iónico y buena capacidad de insertar especies voluminosas orgánicas e inorgánicas en los espacios interlaminares. Su capa unitaria consiste de una capa octaédrica de Al^{3+} ubicada en medio de dos tetraédricas de Si^{4+} . La sustitución isomórfica de Al^{3+} por Si^{4+} en la capa tetraédrica y de Mg^{2+} o Zn^{2+} por Al^{3+} en la octaédrica, resulta en una carga neta negativa en la superficie de la bentonita. Este desequilibrio es compensado por cationes intercambiables, incluidos H^+ , Na^+ o Ca^{2+} , en la superficie de las capas. Su gran área superficial teórica de la montmorillonita es de más o menos $800 \text{ m}^2/\text{g}$ y la capacidad de intercambio catiónico depende de los cationes sustituyentes pero es generalmente del orden de 1 meq/g , por lo que se les denomina genéricamente “arcillas hinchables”.⁴⁷

Figura 8. Diagrama de la estructura de la bentonita.⁴⁸



Fuente: VILLAMIZAR SIERRA Martha Liliana. Adsorción de Cu^{2+} en solución acuosa mediante bentonita modificada. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Química. pp: 1-57.

Las bentonitas se dividen principalmente en cinco tipos corrientemente utilizadas en la industria: dos de bentonitas naturales, la sódica y la cálcica, y tres de bentonitas tratadas o activadas, la activada con alcalinos, la tratada con ácidos y la bentonita organofílica. El tratamiento de las bentonitas naturales mejora ciertas propiedades y produce materiales con una mayor diversidad de aplicaciones, como es el caso del CP. La bentonita utilizada para este trabajo proviene Químicos Campota – Bogotá, Colombia.

1.3 MORTEROS DE CEMENTO

Corresponde a la mezcla natural o artificial de elementos (arena, agua, cemento y/o aditivos) cuya característica principal es la plasticidad, proporcionando de esta manera una mayor resistencia mecánica.⁴⁹

1.3.1 Componentes de los morteros de cemento Los componentes de los morteros de cemento corresponden a: agua, arena y cemento, su descripción se encuentra a continuación.

1.3.1.1 Agua Corresponde a uno de los componentes del mortero, el cual desempeña un papel muy importante en el proceso de curado, su cantidad debe ser suficiente para la hidratación del cemento y mojado de la arena, no debe contener agentes dañinos que afecten las propiedades de corrosión del mortero.²²

1.3.1.2 Arena Los requisitos para su uso en morteros está determinado de acuerdo a su granulometría, forma, propiedades físicas y químicas, según la norma ASTM C144 - 11, la cual establece un tamaño máximo de partícula de 4.75 mm para los áridos de uso en morteros.⁵⁰

1.3.1.3 Cemento El cemento es un material inorgánico, no metálico, compuesto principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Los cuales interactúan en el horno rotatorio de producción, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar. Los componentes más importantes del cemento son cuatro que se evidencian en la tabla 2.⁵¹

Tabla 2. Compuestos del Cemento Portland (CP)

Nombre del Compuesto	Formula	Abreviatura
Silicato Tricálcico (Alita)	3 CaOSiO_2	C_3S
Silicato dicálcico (Belita)	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico (Celita)	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF

Este es utilizado en la fabricación del concreto, denominándose cemento hidráulico, el cual presenta propiedades de fraguar y endurecer al mezclarse con agua, arena, grava u otros materiales, está compuesto por silicatos, aluminatos de calcio y se pueden clasificar como: cementos naturales, cementos portland y cementos de alto contenido de alúmina. El más destacado es el cemento portland el cual se subdivide en siete tipos, tabulados a continuación:

Tabla 3. Clasificación del Cemento Portland (CP).⁵²

TIPO	USO
Cemento Portland tipo 1	Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
Cemento Portland tipo 2	Es el destinado en general a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a las obras donde se requiera moderado calor de hidratación.
Cemento Portland tipo 3	Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
Cemento Portland tipo 4	Es el que se desarrolla bajo calor de hidratación.

TIPO	USO
Cemento Portland tipo 5	Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
Cemento Portland tipo 6	Es el que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca.
Cemento Portland tipo 7	Son aquellos que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.

1.3.1.4 Concreto El concreto es una mezcla de cemento portland, agregado fino (arenas naturales) de tamaño de partícula que puede llegar hasta los 10 mm, agregado grueso con tamaño de partícula de 19 mm o 25 mm, y agua. Para llevar a cabo su preparación es indispensable seleccionar el cementante apropiado y una relación agua/cemento, que asegure la calidad de la matriz cementante, la cual constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto; mientras que los agregados constituyen el 60 a 75% del volumen total del concreto.⁵³

1.4 FRAGUADO

El fraguado hace referencia al cambio del estado plástico, al estado endurecido de una pasta de cemento. El cemento al mezclarse con agua forma una pasta plástica, que cambia a través del tiempo hasta perder su viscosidad y elevar su temperatura, el tiempo transcurrido desde la adición del agua se llama fraguado inicial, indicando que el cemento esta hidratado y semiduro. Posteriormente la pasta sigue fraguando hasta que deja de ser deformable y se vuelve rígida llegando al máximo de temperatura, este es el tiempo de fraguado final en donde el cemento se encuentra más hidratado y la pasta es dura. A partir de este momento el cemento fraguado va adquiriendo resistencia mecánica.⁵⁴

En el fraguado, influyen los siguientes factores:

- La finura del cemento
- La composición química del cemento
- Mientras mayor sea la cantidad de agua de amasado más rápido es el fraguado.
- A menos temperatura ambiente más lentamente ocurren las reacciones de hidratación a temperaturas por debajo de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ el cemento no fragua.
- A mayor temperatura ambiente más rápido ocurren las reacciones de hidratación pero los $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ se puede observar un efecto inverso.

1.5 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Las materias primas y los PI se caracterizaron estructuralmente por Difracción de Rayos X XRD (Anexo E), Espectroscopia Infrarroja por reflectancia atenuada ATR (Anexo F), Microscopia electrónica de barrido SEM (Anexo G) y Espectroscopia de energía dispersiva EDS (Anexo H).

1.6 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

1.6.1 Resistencia a la compresión La resistencia a la compresión se puede definir como una medida primaria de la utilidad de un material usado en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción, porque es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. Es decir es la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto a un edad de 28 días y se designa por f_c expresada en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg / cm^2), megapascales (MPa).⁵⁵

Esta se calcula a partir de la ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) o

(MPa), en unidades SI los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 2500 psi (17 MPa) para concreto residencial hasta 4000 psi (28 MPa). Para realizar los ensayos de la resistencia a la compresión, se tienen en cuenta las normas 220 y 1784 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).³

1.7 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

1.7.1 Ataque con sulfatos y Ácido Clorhídrico Este se debe a la interacción fisicoquímica entre los minerales del cemento hidratado y los iones sulfatos del medio (solución saturada de Na_2SO_4) y cloruro (solución al 20% de HCl). Su consecuencia es el agrietamiento y desintegración del concreto. La resistencia a los sulfatos depende de varias variables, tales como la permeabilidad del concreto en donde el contenido de aluminato tricálcico es fundamental.

Se tienen en cuenta las normas Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) 126 y 489.³


2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 SINTESIS DEL GEOPOLÍMERO

La síntesis de los geopolímeros se realizó a partir de dos arcillas piedra pómez y bentonita; la primera adquirida de Geopómez Sabaneta - Antioquia y la segunda de Químicos Campota – Bogotá; y Clinker, residuo industrial de la termoeléctrica de Zipaquirá, Colombia.

Tabla 4. Materias primas empleadas en la síntesis de los PI.

Materia Prima		
Arcilla	Piedra Pómez	
	Bentonita	

Materia Prima			
Residuo Industrial	Clinker		

La solución alcalina activante empleada en dicha síntesis fue silicato de sodio Na_2SiO_3 de grado comercial adquirido en la empresa Conquímica S.A (tabla 5, propiedades químicas) y el silicato de Sodio Na_2SiO_3 de grado analítico fue suministrado por Aldrich.

Tabla 5. Propiedades químicas y físicas de Na_2SiO_3 suministrado por Conquímica S.A

PROPIEDAD	VALOR TÍPICO	VALOR DEL PRODUCTO
Fórmula Química		Na_2SiO_3
pH	14	12
Relación ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)	3,10	3,0 - 3,25
Densidad de Baumé (°Be)	42	40,5 - 43,5
Óxido de Sodio (%p/p Na_2O)	9,27	8,76 - 9,86
Óxido de Sílice (%p/p SiO_2)	28,74	27,39 - 30,27
Gravedad Específica	1,4078	1,4162

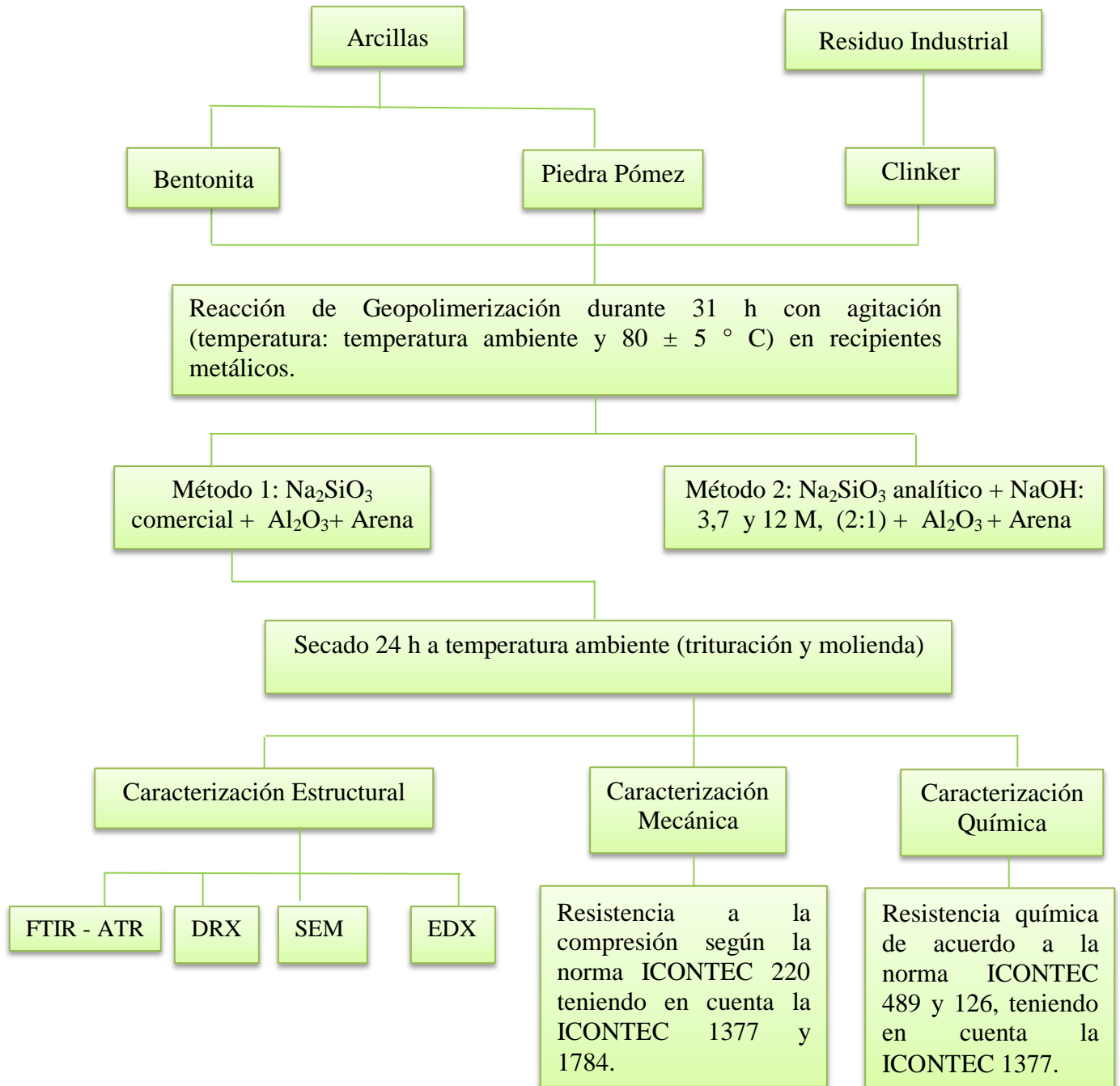
Fuente: Conquímica S.A.

En la figura 9, se presenta el diseño experimental usado para la síntesis de los PI. Los parámetros fijados para la obtención están en concordancia a los reportados en la literatura.^{30, 34, 38}

Inicialmente se realizaron unas pruebas preliminares de los aluminosilicatos (arcillas y residuo industrial) a utilizar en la sustitución del CP. El primer parámetro a tener en cuenta, fue el tamaño de partícula, el cual es de 120 μm (Tamiz No. 120), observándose que las materias primas BT y CL cumplían con este parámetro. Sin embargo, para la PP fue necesario utilizar la trituradora y el molino de bolas (Anexo I), para finalmente obtener 2 Kg de esta, cantidad utilizada de cada materia prima para la síntesis de los PI.

El segundo parámetro a tener en cuenta en la síntesis de los PI es la solución activante, de tal forma que esta se llevó a cabo por dos métodos diferentes a pequeña escala.⁵⁶ En el *método 1*, se empleó como medio acuoso silicato de sodio de grado comercial (Na_2SiO_3). Por otro parte, en el *método 2* se utilizó como solución activante una relación equimolar 2:1 de silicato de sodio analítico e hidróxido de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/ 3,7$ y 12 M NaOH), en ambos se utilizó arena en relación 1:1 de acuerdo a la materia prima utilizada y dos temperaturas: temperatura ambiente y $80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 9. Representación esquemática del desarrollo experimental









Cada una de las mezclas de reacción de acuerdo al método 1 ó 2, se dejó durante 31 horas con agitación vigorosa. Sin embargo no fue posible obtener la matriz polimérica por el método 2 debido a que no hubo reacción completa de las

materias primas con el agente activante, de tal forma que el método de síntesis aplicado para la obtención de los PI es el método 1 a temperatura de $80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, en donde la alcalinidad de la solución activante y la temperatura son parámetros que determinaron la cinética de la reacción de geopolimerización.⁵⁷

Una vez evaluados los parámetros de temperatura y alcalinidad del silicato de sodio a través de las metodologías reportadas en la literatura, en donde la concentración del álcali y el ion alcalino son las variables usadas en el proceso de geopolimerización, se obtuvo la síntesis los PI (tabla 6) realizando calentamiento a $80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ seguido de un secado por 24 horas.⁵⁸

Tabla 6. PI sintetizados

Materia Prima	Polímero Inorgánico	Materia Prima/ Polímero Inorgánico Triturado
Piedra Pómez		
Bentonita		
Clinker		

El producto final de cada PI, es triturado y molido en un molino de bolas de acuerdo a los parámetros del Anexo I, para obtener un tamaño de partícula de 4,77 mm según la norma ASTM C94 / C 94 M -09, para obtener finalmente 2 Kg de cada PI.

2.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PRECURSORES Y PI SINTETIZADOS

2.2.1 Análisis por Difracción de Rayos X Las muestras de PP, BT, CL y los PI sintetizados fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

La toma de datos de las muestras respectivas se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X en la Universidad Industrial de Santander en la Sede de Gautiguara. Las condiciones de trabajo para cada muestra se muestran a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de trabajo para la toma de datos de XRD

Parámetros	Datos
Radiación	CuK α 1
Voltaje	40 Kv
Corriente	30 mA
Rango de Medición	3.5 – 70° (2θ)
Tiempo de Muestreo	0.4 Segundos
Rendija de Divergencia	0.6 mm
Rendija Soller Primario	2.5 °
Muestreo	0.01526 ° (2θ)

Parámetros	Datos
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye

Fuente: Laboratorio de Difracción de rayos X, Universidad Industrial de Santander Sede Gautiguara (SG).

La caracterización de los precursores y de los PI, se realizó con el software Search-Match, en el cual se observaron los picos obtenidos en los difractogramas, y mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Center for Diffraction Data (ICDD), se identificaron las fases presentes en las materias primas y en los PI sintetizados.⁵⁹

2.2.2 Análisis por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (FTIR-ATR) El estudio espectroscópico se realizó en un espectrómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier marca Bruker modelo Tensor 27 con celda ATR (reflectancia total atenuada) a 31 scans y 2 cm^{-1} de resolución, el cual se encuentra en la Escuela de Química de La Universidad Industrial de Santander.

2.2.3 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) Las imágenes de SEM fueron obtenidos por microscopía electrónica de barrido, mediante el microscopio electrónico FEI QUANTA FEG 650; en donde las muestras fueron pulverizadas con anterioridad para colocarlas en el soporte del equipo para su medición. Las condiciones analíticas del equipo fueron HV: 5-20.5 kV, magnificación: 500-5000x, detector: ETD.

2.2.4 Análisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) El análisis elemental de cada uno de los precursores y de los PI sintetizados, se

realizó por espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) utilizando un microscopio electrónico FEI QUANTA FEG 650, en donde las muestras fueron pulverizadas con anterioridad para colocarlas en el soporte de este equipo para su medición, teniendo en cuenta que las condiciones analíticas del equipo utilizadas fueron: HV: 20.5 kV, Tilt: 0.00, Take-Off: 35.88, Amplitud: 14.4, Detector TYPE: APOLLO X SDD, Resolución: 127.02.

2.3 ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS

De acuerdo a la Norma Icontec 220 (Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50 mm de lado), se elaboraron los morteros para las pruebas de RC y RQ en los moldes del Laboratorio de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, teniendo en cuenta los parámetros indicados en la tabla 8, los cuales se establecen para 6 cuotas o morteros de ensayo. La arena utilizada es proveniente de pescadero y el CP es marca CEMEX, tipo I.

Tabla 8. Parámetros para el diseño de mezcla de los morteros de 50 x 50 x 50 mm de lado. ³

Parámetros	Descripción
Arena	1375 g
Cemento	500 g
Relación Arena/Cemento	2,75
Agua	~242,5 mL
Relación Agua /Cemento	0,485

En los ensayos de RC para cada tiempo de fraguado (7,14, 28, 41, 90 y 120 días) se elaboraron diez morteros de cada PI, 5 por cada porcentaje de sustitución del PI en el CP en la mezcla de mortero (10 y 30%), para un total de 240 morteros.

Ademas se montaron 5 morteros de referencia para cada tiempo de fraguado sin ninguna variación en el CP, para un total de 280 morteros.

De tal manera que los mejores resultados obtenidos de RC de acuerdo a la sustitución de cada PI en el CP, determinan la cantidad de morteros a realizar para los ensayos de resistencia química, los cuales solo se efectuaron para el 10% de sustitución, utilizándose 48 morteros para la resistencia a ácidos y 8 para la resistencia a sulfatos, incluyendo los de referencia de CP, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Total de Morteros de 50 x 50 x 50 mm realizados

Ensayo	No. Morteros 10% BT en el CP	No. Morteros 30% BT en el CP	No. Morteros 10% CL en el CP	No. Morteros 30% CL en el CP	No. Morteros 10% PP en el CP	No. Morteros 30% PP en el CP	No. Morteros de CP
Resistencia a la Compresión	40	40	40	40	40	40	40
Resistencia Química HCl	12	0	12	0	12	0	12
Resistencia Química Sulfatos	2	0	2	0	2	0	2
Total	54	40	54	40	54	40	54
Σ Total Morteros							336

2.3.1 Diseño de la mezcla de Mortero Las cantidades mencionadas en la tabla 8 para 6 cuotas de ensayo, son mezcladas de acuerdo a la norma ICONTEC 119 y 220, ³ teniendo en cuenta que la cantidad de CP establecida por la misma se sustituye en un 10 y 30% por cada PI. Posteriormente esta mezcla es adicionada de acuerdo al método de apisonamiento en cada molde de tres cuotas de ensayo,

el cual previamente es lubricado con ACPM (aceite comprimido para motor) para facilitar el desmolde de los mismos.

Figura 10. Mezcla de Mortero en la mezcladora



Al adicionar la mezcla a los moldes (figura 10), esta debe compactarse con un pistón (Tabla 10), dando unos leves golpes para asegurar la firmeza y dispersión de la mezcla y así eliminar las burbujas de aire.

Tabla 10. Construcción de morteros de acuerdo a la norma ICONTEC 119 y 220.

Construcción de los Morteros		
Molde	Morteros	

2.4 FRAGUADO

Los 280 morteros realizados para RC experimentan dos procesos de fraguado simultáneos, el primero de ellos es durante las primeras 24 horas y el segundo en donde los cubos de morteros se sumergen totalmente en una solución saturada de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ permitiéndole al cemento adquirir propiedades de compactación y durabilidad.

El fraguado de estos se realizó por 7, 14, 28, 41, 90 y 120 días,³ en el Laboratorio del Centro de Investigaciones Ambientales (CEIAM).

Tabla 11. Fraguado de los cubos de mortero.

Muestra de Mortero	Fraguado
Bentonita	
Clinker	
Piedra Pómez	



2.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ICONTEC 220.

Mediante la elaboración de cubos de mortero según la norma ICONTEC 220, se realizaron ensayos de compresión a los 1, 3, 7, 14, 28, 41, 90 y 120 días de fraguado³, en la maquina INSOLTEC UNIVERSAL, ubicada en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander; dicha medición se realizó para los 280 morteros elaborados para RC, además de los 8 morteros sometidos a la prueba de resistencia química de ácidos y 8 morteros a la prueba de sulfatos.

2.6 RESISTENCIA QUIMICA DE MORTEROS, ICONTEC 489

A partir de la norma ICONTEC 489, se determina la RQ para 48 morteros sustituidos al 10% de PI en el CP: 12 de BT, 12 de CL, 12 de PP y 12 de CP; los cuales quedaran sometidos a la acción de los agentes químicos lo que ocasionara un cambio en sus propiedades fisicoquímicas.

Después de preparar los especímenes y de ser removidos del molde, se deben pesar y secar a temperatura ambiente de 48 a 60 horas, luego ser tratados con una solución de ácido clorhídrico al 20% por 60 minutos, teniendo en cuenta que por cada mortero se adiciona 150 mL de esta.³ Posteriormente, se secan con una toalla de papel y son curados al aire por un periodo de 7 días a temperatura ambiente. Posteriormente al periodo de acondicionamiento, se vuelven a pesar todos los morteros.

2.7 RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS A LOS ATAQUES CON Na_2SO_4 ICONTEC 126

Esta norma determina la forma de evaluar el comportamiento de los agregados sometidos al ataque por una solución saturada de sulfato de sodio Na_2SO_4 .³ La prueba se realizó, para 8 morteros sustituidos al 10% de PI en el CP: 2 de BT, 2 de CL, 2 de PP y 2 de CP, como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Resistencia Química de los agregados a los ataques con Na_2SO_4



Después de preparar los especímenes y de ser removidos del molde, se sumergen en una solución saturada Na_2SO_4 (750 g Na_2SO_4 / L de H_2O) durante un periodo de 16 a 18 horas, teniendo la precaución de que la superficie de la solución quede por lo menos 15 mm por encima de la muestra. Se tapa el recipiente con el fin de reducir a un mínimo la evaporación y evitar el exceso de sustancias extrañas, el proceso se hace a temperatura ambiente.

Posteriormente se retiran las muestras, para someterlas a 105 y 110 °C en la estufa, se enfrían y son pesadas nuevamente.

Fuente: RODRÍGUEZ Erich; MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby; BERNAL Susan y GORDILLO Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales 2009; PP: 595-600.

Se debe tener en cuenta que en la matriz polimérica se ha creado una carga negativa por el aluminio con relación al oxígeno debido a su número de coordinación (Al^{IV}), la cual es compensada por el Na^+ del silicato de sodio para mantener la neutralidad de la matriz; a su vez, este catión alcalino actúa como catalizador de la reacción.

La síntesis de los PI solo fue llevada a cabo por el *método 1* debido a la alcalinidad de la solución activante, en donde los silicatos disueltos en esta son más reactivos que los activadores tipo hidróxido. De igual forma la adición de sílice en la mezcla de reacción modifica la relación Si/Al que forma el gel de aluminosilicato.

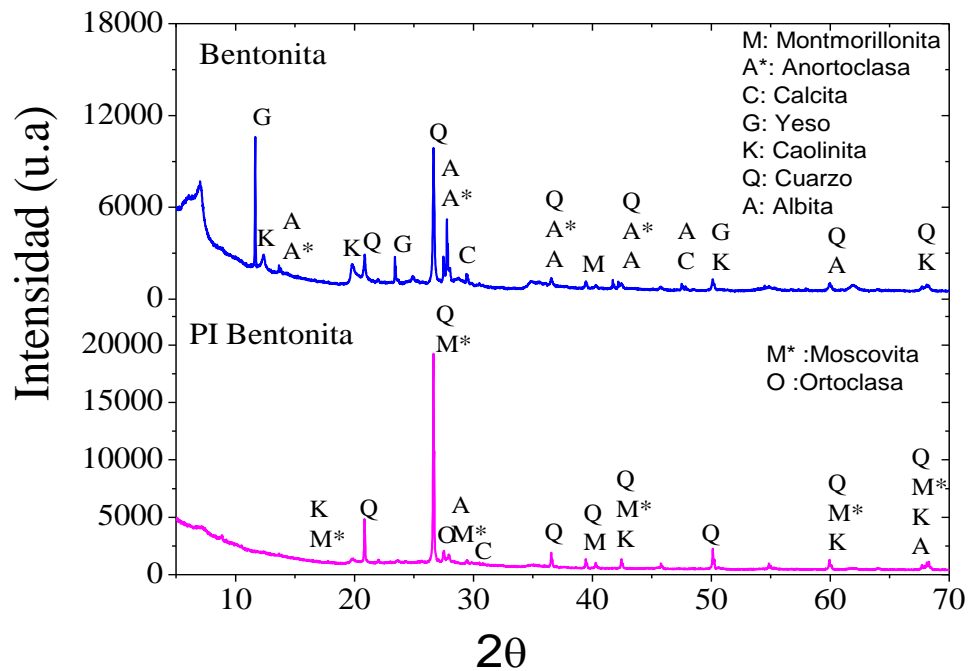
La temperatura fue otro parámetro de síntesis a tener en cuenta, la cual debe ser mayor que la temperatura ambiente para acelerar su cinética y así favorecer la disolución de las especies activas; sin embargo debe encontrarse en el intervalo de 30-90°C para aumentar los valores de RC, la utilizada fue de 80 ± 5 °C, para no generar la contracción del material.⁶²

3.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

3.2.1 Difracción de Rayos X

3.2.1.1 Difracción de Rayos X de la BT y PI de BT En la figura 13, pueden observarse los patrones de difracción obtenidos para la BT y el PI de BT. Se puede apreciar las diferentes fases cristalinas encontradas en cada material.

Figura 13. XRD de la BT y PI de BT



Las fases minerales principales de BT son cuarzo, albita, yeso, calcita, anortoclasa, caolinita y montmorillonita; mientras que en el PI de BT por activación alcalina aparecen la ortoclasa y la moscovita en vez de yeso y anortoclasa. Se destaca el aumento en la intensidad y de la resolución de los picos para los PI particularmente para el cuarzo, el cual en el BT presenta una intensidad de 10300 u.a a 27° aumentando a 19000 ua en el mismo ángulo θ para el PI de BT.

Para el caso de BT, en la tabla 12 se reportan las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase.

Tabla 12. Fases Mineralógicas de la bentonita

Fase	Formula	2θ (°)
Cuarzo	Si O ₂	21;27;37;39;50;60
Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	28;37;39;42;47;60

Yeso	$\text{Ca S O}_4 \cdot 2 \text{ H}_2 \text{ O}$	12;21;23
Calcita	$\text{Ca (C O}_3 \text{)}$	29; 32
Anortoclasa	$(\text{ Na , K }) (\text{ Si}_3 \text{ Al }) \text{ O}_8$	27;28
Caolinita	$\text{Al}_2 (\text{ Si}_2 \text{ O}_5) (\text{ O H })_4$	12;68
Montmorillonita	$(\text{Na, Ca})_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{ Si}_4 \text{ O}_{10} (\text{ O H })_2 \cdot x \text{ H}_2 \text{ O}$	40

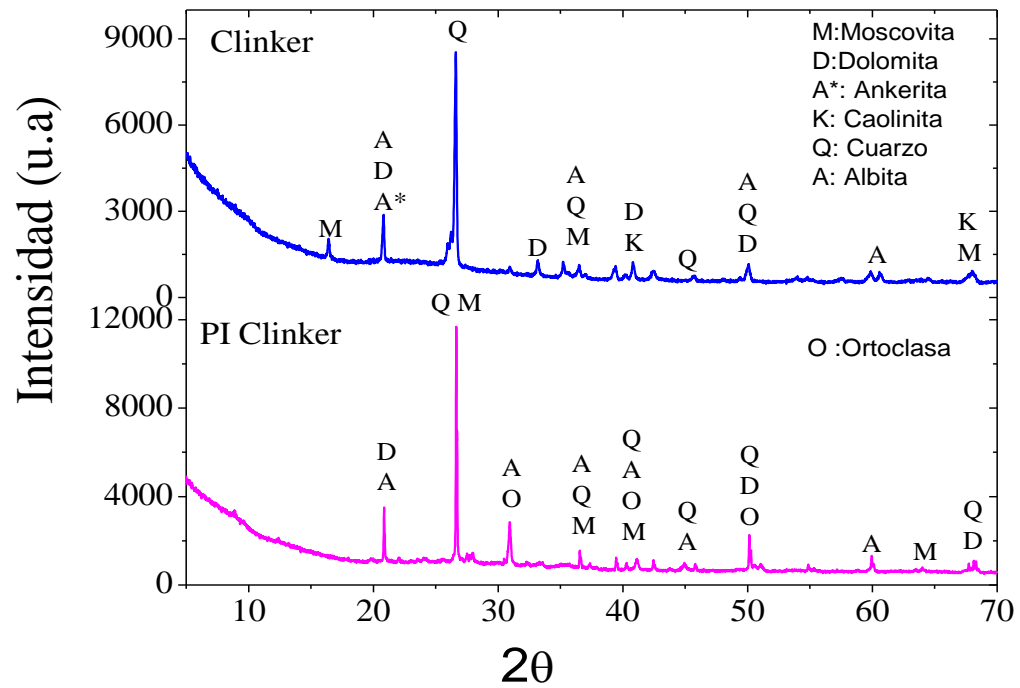
Para el PI de BT, en la tabla 13 se reportan las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase.

Tabla 13. Fases Mineralógicas del PI de BT

Fase	Formula	2 θ (°)
Cuarzo	Si O_2	21;27;37;42;50;55;68
Albita	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8 \text{)}$	28;39;46;67
Calcita	$\text{Ca (C O}_3 \text{)}$	32
Caolinita	$\text{Al}_2 (\text{ Si}_2 \text{ O}_5) (\text{ O H })_4$	12;20;68
Montmorillonita	$(\text{Na, Ca})_{0.3} (\text{Al, Mg})_2 \text{ Si}_4 \text{ O}_{10} (\text{ O H })_2 \cdot x \text{ H}_2 \text{ O}$	40
Moscovita	$\text{K Al}_2 (\text{ Al Si}_3 \text{ O}_{10}) (\text{ O H })_2$	20; 28; 60
Ortoclasa	$\text{K (Al , Fe) Si}_2 \text{ O}_8$	24;27

3.2.1.2 Difracción de Rayos X del CL y PI de CL En la figura 14, pueden observarse los patrones de difracción obtenidos para la CL y el PI de CL, en donde se aprecian las diferentes fases cristalinas encontradas en cada material.

Figura 14. XRD de la CL y PI de CL



Para el caso de CL, en la tabla 14 se reportan las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase.

Tabla 14. Fases Mineralógicas del CL

Fase	Formula	2θ (°)
Cuarzo	Si O ₂	27; 37;39;45
Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	22;24;28;33;36;50;60
Dolomita	Ca Mg (C O ₃) ₂	22; 31;34;41;51;68
Ankerita	Ca _{1.01} Mg _{0.45} Fe _{0.54} (C O ₃) ₂	22;31;50
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (O H) ₄	12;42;54;68
Moscovita	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (O H) ₂	18;37;68

Para el PI de CL, en la tabla 15 se reportan las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase.

Tabla 15. Fases Mineralógicas del PI de CL

Fase	Formula	2 θ (°)
Cuarzo	Si O ₂	27;37;39;42;45;50; 68
Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	22;28;37;42;60
Dolomita	Ca Mg (C O ₃) ₂	22;31;34; 50;68
Ortoclasa	K Al Si ₃ O ₈	31;42;50
Moscovita	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (O H) ₂	27; 42;37;68

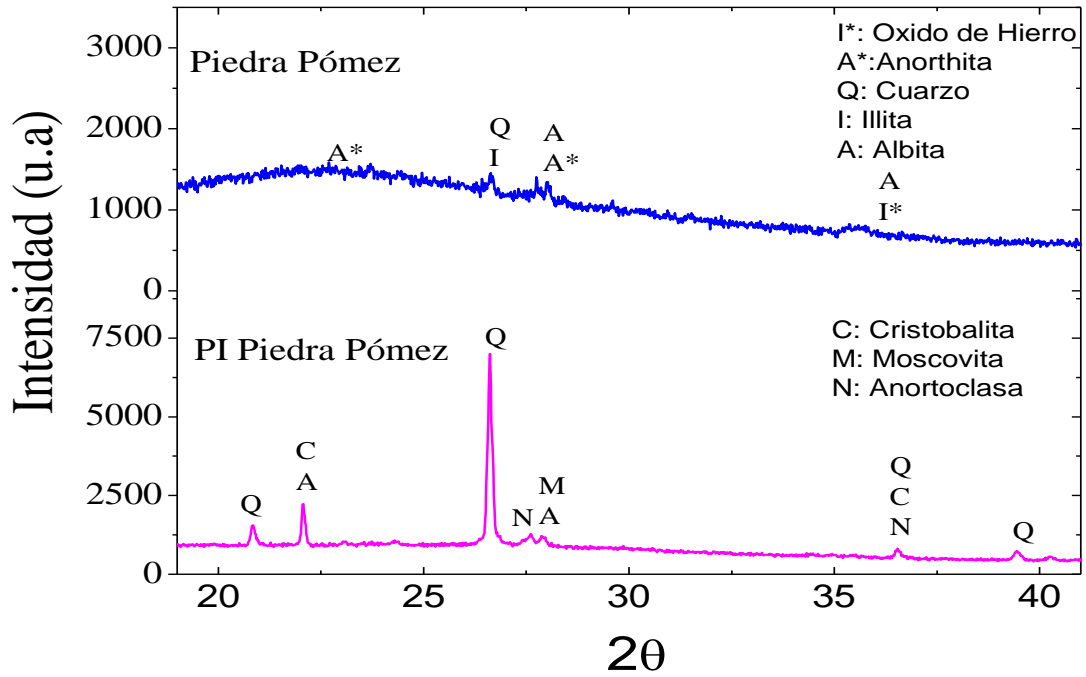
Las fases minerales para el CL son: moscovita, dolomita, ankerita, caolinita, cuarzo y albita; mientras que para el PI de CL no se encuentra presente la fase mineralógica de ankerita y caolinita pero aparece la fase de ortoclasa, debido a la modificación en su estructura, por los cambios estructurales que sufre el CL al formar la red de aluminosilicatos Si-O-Al.

Es importante, destacar el aumento en las intensidades y resolución de las fases de moscovita, dolomita y albita a 37° y 22° respectivamente, pero principalmente de la fase de cuarzo a 27 ° en donde el CL presenta una intensidad de 8500 u.a y el PI de CL 12000 u.a.

3.2.1.3 Difracción de Rayos X de la PP y PI de PP En la figura 15, pueden observarse los patrones de difracción obtenidos para la PP y el PI de PP.

Se muestran los difractogramas obtenidos de PP y del PI de PP, se señalan las fases principales para la PP que son cuarzo, albita, anortita, illita y óxido de hierro, mientras que para el PI sintetizado se encuentran ausentes las fases de anortita, illita y óxido de hierro por la activación alcalina del aluminosilicato empleado; aparecen las fases de cristobalita y moscovita que le proporcionan mayor grado de cristalinidad a la PP.

Figura 15. XRD de la PP y PI de PP



Para el caso de PP, en la tabla 16 se reportan las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase.

Tabla 16. Fases Mineralógicas del PP

Fase	Formula	2θ (grados)
Cuarzo	Si O ₂	27
Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	28;36
Anortita	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈	23;28
Illita	(K , H ₃ O) Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (O H) ₂	27
Óxido de Hierro	Fe _{2.962} O ₄	36

La tabla 17 resume las fases mineralógicas y la posición de las reflexiones más intensas de cada fase halladas en PI y PP.

Tabla 17. Fases Mineralógicas del PI de PP

Fase	Formula	2θ (grados)
Cuarzo	Si O ₂	21;27;36;39
Albita	Na (Al Si ₃ O ₈)	28;36
Cristobalita	Ca _{0.05} ((Al _{0.1} Si _{1.9}) O ₄)	22;37
Moscovita	K Al ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (O H) ₂	28
Anortoclasa	(Na _{0.75} K _{0.25}) (Al Si ₃ O ₈)	27;37

La PP al tener una estructura porosa y estar compuesta por partículas vítreas que de diversas formas principalmente alargadas y angulosas presenta amorficidad en su estructura, la cual al activarse alcalinamente mediante un reordenamiento estructural de los tetraedros de Si y Al induce al sistema un grado de cristalinidad, evidenciándose en la aparición de otras fases mineralógicas y en el aumento en la intensidad de las mismas, como es el caso del cuarzo y la albita a 27°, 28° y 36° θ respectivamente.

3.2.1.4 Difracción de Rayos X del CP En la figura 16, se muestran los patrones de difracción del CP. En donde se observan las fases mineralógicas principales correspondientes a: cuarzo, calcita, hatrurita, anhidrita, yeso y grosularia, características de los silicatos de calcio hidratados que se forman al reaccionar con el agua; sin embargo, se debe destacar que este presenta mayor cantidad de cuarzo que de calcita lo cual no sucede con otros tipos de cementos, donde la cantidad de calcita es mayor que la de cuarzo.

Figura 16. XRD del CP

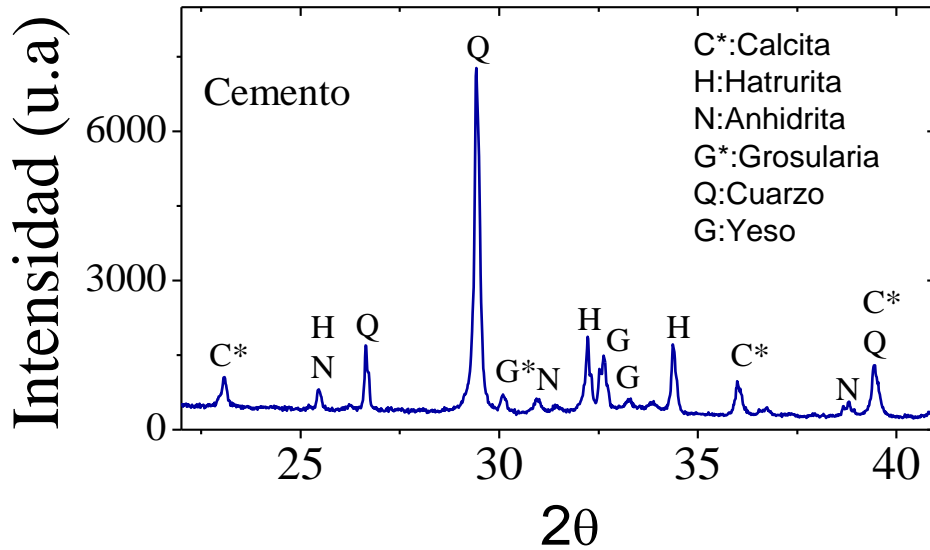


Tabla 18. Fases Mineralógicas del CP

Fase	Formula	2θ (grados)
Cuarzo	Si O ₂	21; 27;29;39
Calcita	Ca (C O ₃)	23;36;39
Hatrurita	Ca ₃ (Si O ₄) O	25;30;34
Anhidrita	Ca (S O ₄)	25;31;39
Yeso	Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂	32;33
Grosularia	(Ca _{2.869} Fe _{0.131}) (Al _{1.89} Fe _{0.11}) (Si O ₄) ₃	30

Para todos los PI sintetizados a partir de las diferentes fuentes de aluminosilicatos, se presenta el cuarzo como fase común con el CP, la cual aparece con mayor intensidad para los PI a 27° θ que en el CP a 29° θ; lo que indica que estos presentan en su estructura mayor cantidad de SiO₂ que el CP.

3.2.2 Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (FTIR-ATR) En las figuras 17 a la 19, se muestran los espectros FTIR de los precursores de aluminosilicatos: BT, CL y PP además de los geopolímeros sintetizados a partir de cada uno de ellos. Para el análisis de los resultados se

tiene en cuenta las bandas características de minerales silicoaluminosos reportados en la literatura, los cuales se reportan en continuación en la Tabla 19.

63-65

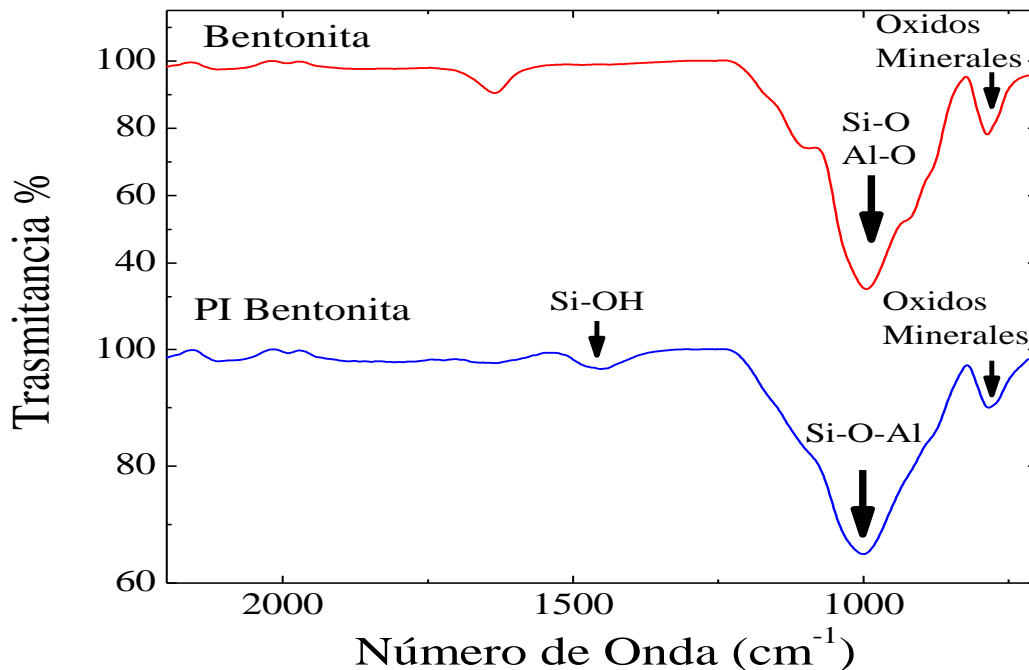
Tabla 19. Bandas características de minerales silicoaluminosos y materiales activados alcalinamente.

	Frecuencia (cm^{-1})*	Asignación
Bandas de vibración de Silicatos	920-1250 (f)	Tensión asimétrica (Si-O-Si y Al-O-Si)
	1165 (h)	Tensión asimétrica (Si-O-Si), Q ⁴
	1150-1140 (h)	Tensión asimétrica (Si-O-Si y Al-O-Si), Q ³ .
	1077 (f)	Tensión asimétrica (Si-O-Si y Al-O-Si). Q ²
	950 – 980 (h)	Tensión de enlace (Si-O (Si-O-M+) Q ¹ lineal
	924	Tensión asimétrica de los enlaces Si-O Q ⁰ .
	882 (f)	Tensión de enlace Si-O-H y deformación enlace OH (Si-OH)
	798 (m)	Tensión simétrica (Si-O-Si)
	727 (h)	Tensión simétrica (Si-O-Si y Al-O-Si)
	620 (h)	Tensión simétrica (Si-O-Si y Al-O-Si)
	561 (f)	Tensión simétrica (Al-O-Si)
466 (f)	Deformación (Si-O-Si y O-Si-O)	
Banda de vibración de Carbonatos	1440 (f)	Tensión asimétrica de los enlaces O-C-O de grupos CO ₃ ²⁻
	1420-1480	Tensión C-O
	1064	Tensión simétrica CO ₃ ²⁻
	873	Deformación de Enlaces C-O-C de grupos CO ₃ ²⁻
	470 y 421	Deformación CO ₃ ²⁻
	1600-1700	Agua Molecular
	1650-1655	Deformación H-O-H adsorbido

(f): Fuerte; (m): Medio; (h): hombro

3.2.2.1 Espectroscopia Infrarroja BT y PI de BT En la Figura 17, se muestran los espectros infrarrojos para la BT y el PI de BT sintetizado. En ambos casos se logró identificar las bandas de absorción significativas de cada material, las cuales son remarcadas con una flecha negra en la figura y reportadas en la tabla 19.

Figura 17. FTIR de BT y PI de BT



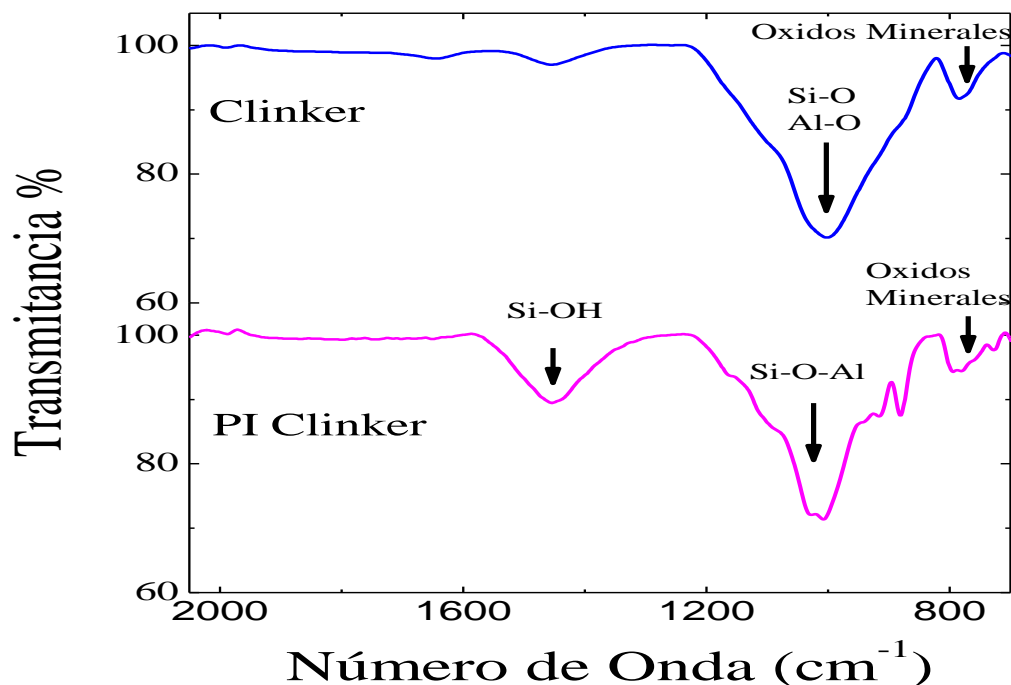
En los espectros FTIR para la bentonita, se observa la vibración, característica de la tensión simétrica de los enlaces Si-O-Si a 783 cm^{-1} y una vibración asimétrica de los enlaces Si-O y Al-O a 996 cm^{-1} , además de evidenciarse la presencia de óxidos de minerales en la región de 1600 cm^{-1} , observándose también que esta arcilla se encuentra hidratada, lo cual explica la banda en 3600 y 3700 cm^{-1} .

Mientras que en el PI de BT, se observa un corrimiento a menores números de onda de los óxidos de minerales debido posiblemente a que la BT sufre una transformación como consecuencia de una reorganización microestructural en los tetraedros de Si y Al de la PP para la formación del gel polimérico, obteniéndose las especies de silicato $\text{Si}(\text{OH})_4$ y aluminato $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ formando el monómero correspondiente de la policondensación para la formación de la matriz polimérica. En el PI de BT se destaca una banda amplia que también es presentada por la

materia prima, ubicada entre 900 y 1200 cm^{-1} , la cual se encuentra a mayores números de onda en el PI, atribuido posiblemente al ordenamiento de corto alcance de los tetraedros de Si y Al.

3.2.2.2 Espectroscopia Infrarroja CL y PI de CL En la figura 18, se muestran los espectros infrarrojos para el CL y el PI de CL sintetizado. En ambos casos se logró identificar las bandas de absorción significativas de cada material, las cuales son remarcadas con una flecha negra en la figura y reportadas en la tabla 19.

Figura 18. FTIR de CL y PI de CL

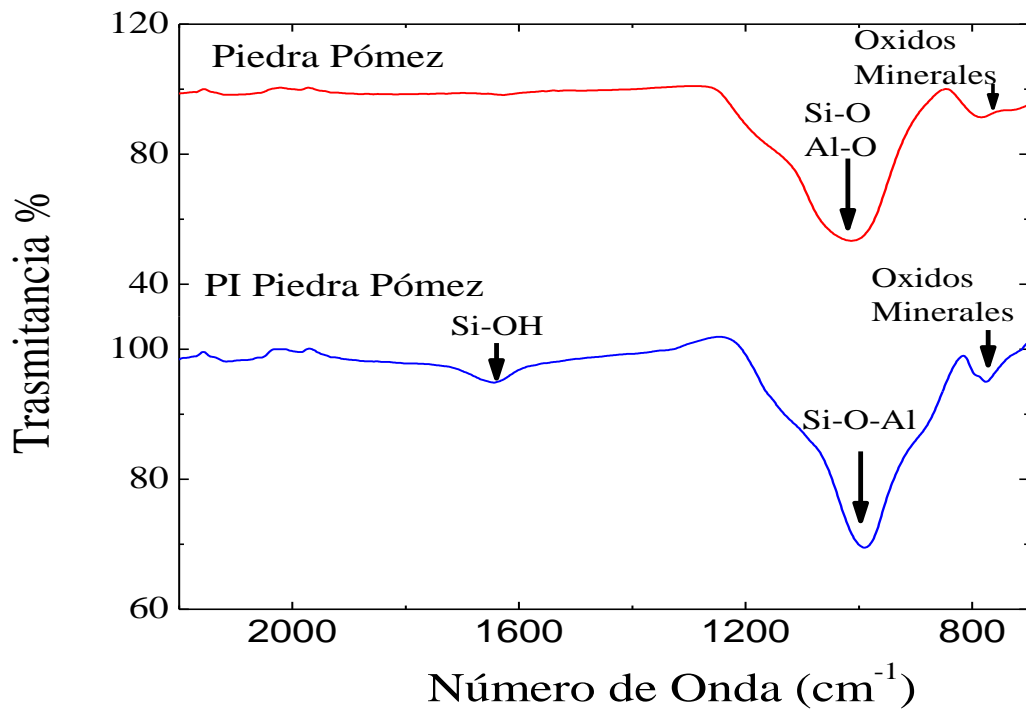


En el espectro de CL aparece una amplia banda entre 1000 y 1100 cm^{-1} , atribuida a la tensión asimétrica de los enlaces de Si-O y Al-O, además en 771 cm^{-1} una tensión simétrica de los óxidos de minerales; de igual forma se observó en el PI de CL, un corrimiento a mayores números de onda de la amplia banda ubicada entre 1000 y 1100 cm^{-1} atribuida a la tensión asimétrica de los enlaces Al-O-Si. Esto ocurre como consecuencia de un reordenamiento microestructural de los

tetraedros de Si y Al por la hidrolisis del CL con la solución activante para la formación del ion ortosialato y posterior policondensación del gel polimérico a 80 ± 5 °C.

3.2.2.3 Espectroscopia Infrarroja PP y PI de PP En la figura 19, se muestran los espectros infrarrojos para PP y el PI de PP sintetizado. En ambos casos se logró identificar las bandas de absorción significativas de cada material, las cuales son remarcadas con una flecha negra en la figura y reportadas en la tabla 19.

Figura 19. FTIR de PP y PI de PP



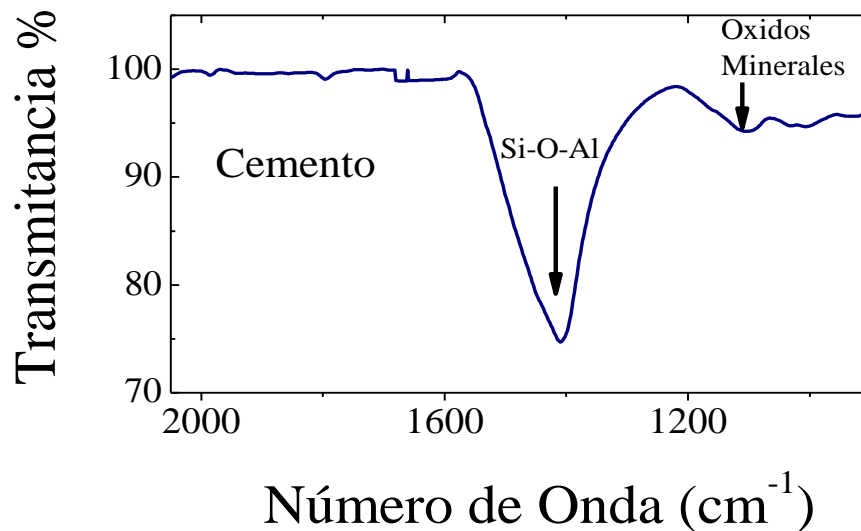
Se identifica en el espectro de PP una amplia banda entre 900 y 1100 cm⁻¹, atribuida a la vibración interna de los tetraedros TO₄ (donde T hace referencia a Si o Al). En donde el amplio rango de la banda se atribuye fundamentalmente a la naturaleza amorfa de la PP, así como al ordenamiento de corto alcance de los tetraedros de Si y Al. De igual manera, esta banda se encuentra presente en el PI

de PP a menor número de onda debido a la deformación de los enlaces T-O-T de la materia prima PP por la solución activante, evidenciándose una tensión asimétrica de Al-O-Si.

En los PI sintetizados las bandas de absorción significativas de cada materia prima se mantienen inalteradas; sin embargo es evidenciable el corrimiento de algunas vibraciones a mayor y/o a menor número de onda, debido al reordenamiento estructural de los tetraedros de Si y Al para la formación de la matriz polimérica.

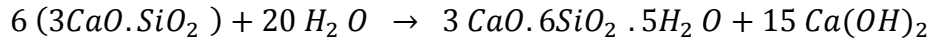
3.2.2.4 Espectroscopia Infrarroja CP En la figura 20, se muestra el espectro infrarrojo para CP, en donde se identifican las bandas de absorción significativas de este.

Figura 20. FTIR de CP



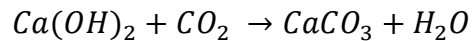
Se identifican el espectro IR del CP, en donde se evidencia una banda a 3600 cm⁻¹ debido a la vibración de los grupos OH de la portlandita (Ca (OH)₂), ion que se

produce por la hidratación del silicato tricálcico (C₃S) y en menor proporción por la del silicato dicálcico (C₂S), de acuerdo a la siguiente reacción: ⁶⁶



Además en 1600 cm⁻¹, se encuentra una banda atribuida al agua, debido a los compuestos formados por la hidratación, tales como los sulfoaluminatos de calcio.

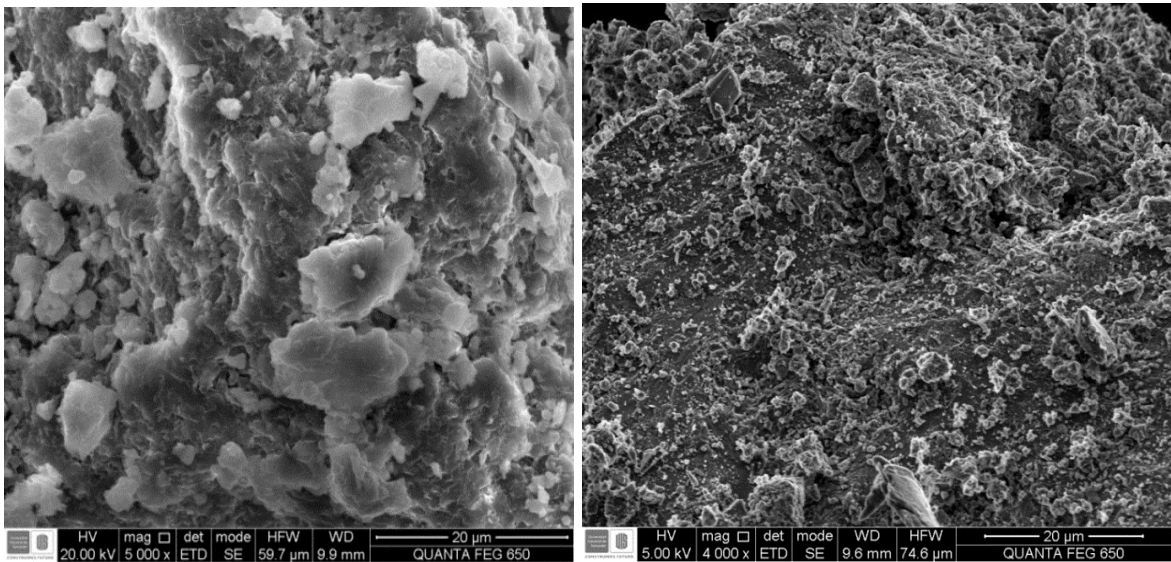
En la región de 1400 cm⁻¹ aparece una banda ancha, resuelta en dos máximos hacia 1420 y 1500 cm⁻¹, ambos corresponden a la vibración del ion (CO₃)⁻² formado por la acción del CO₂ atmosférico sobre la portlandita, de acuerdo a la siguiente reacción:



Finalmente, hacia 1100 y 900 cm⁻¹ aparece una banda asimétrica, originada por la vibración de los tetraedros de SiO₄ y la vibración del Al-OH.

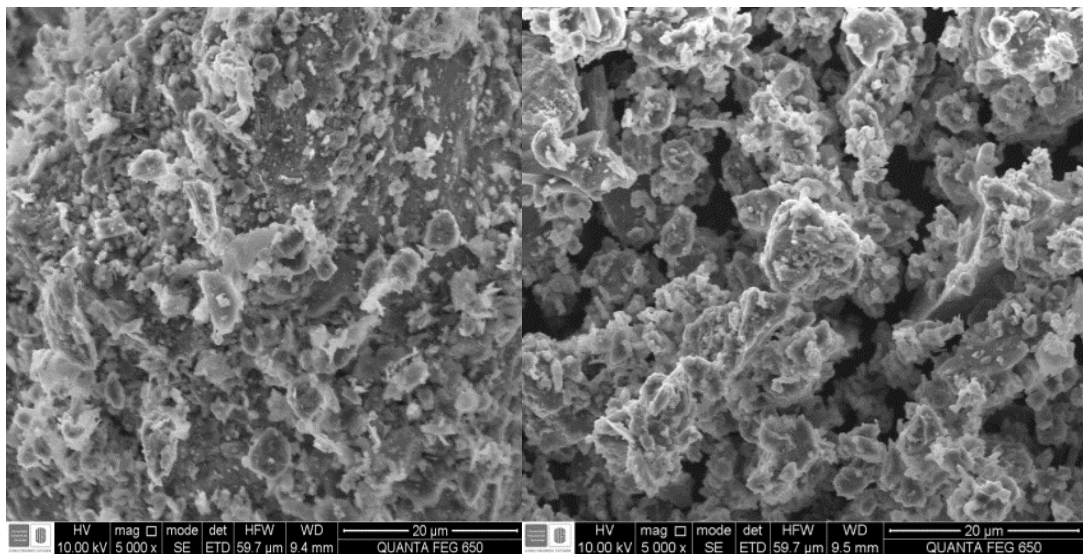
3.2.3 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) En las figuras 21 a la 24, se observan las micrografías de las materias primas BT, CL y PP además de los PI sintetizados de las mismas y el patrón de referencia el CP.

Figura 21. SEM de la BT (izquierda) y PI de BT (derecha), con aumentos de 5000x y 4000 x respectivamente.



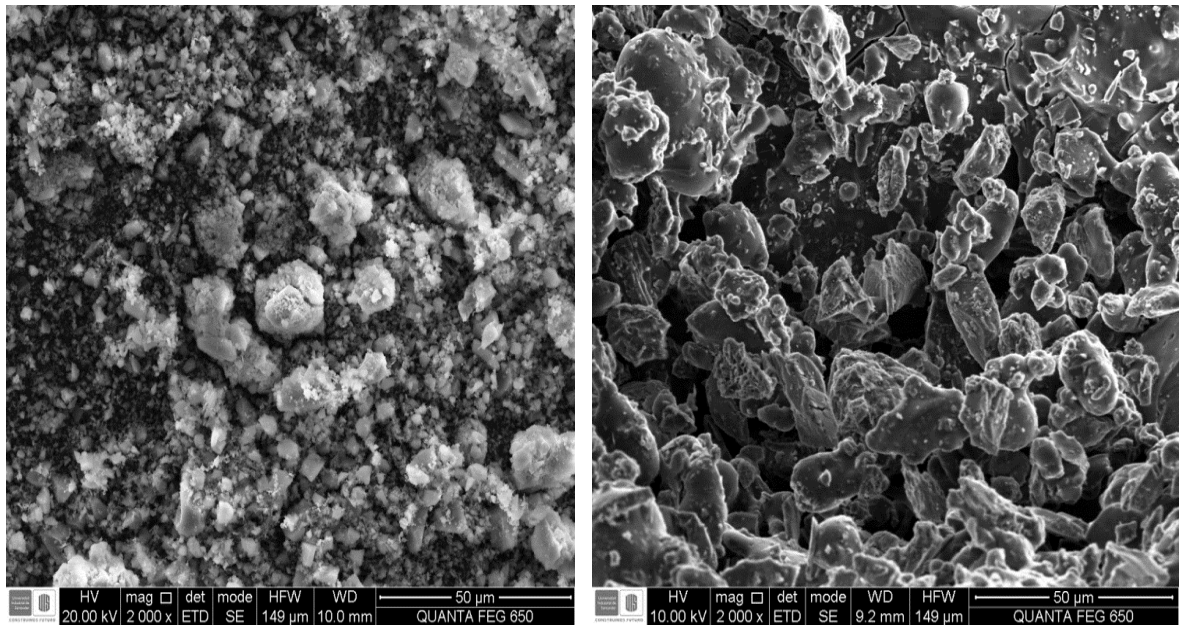
Fuente: Andrea Katherine González Cárdenas. Micrografías tomadas en el QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía PTG.

Figura 22. SEM del CL (izquierda) y PI de CL (derecha), con aumentos de 5000x.



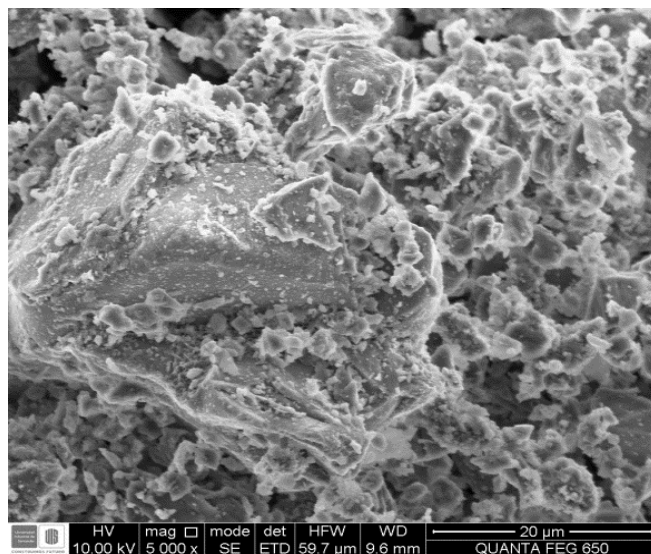
Fuente: Andrea Katherine González Cárdenas. Micrografías tomadas en el QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía PTG.

Figura 23. SEM del PP (izquierda) y PI de PP (derecha), con aumentos de 2000x.



Fuente: Andrea Katherine González Cárdenas. Micrografías tomadas en el QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía PTG.

Figura 24. SEM del CP con aumento de 5000x



Fuente: Andrea Katherine González Cárdenas. Micrografías tomadas en el QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía PTG.

Se observan en las micrografías de los tres precursores de la reacción de geopolimerización BT, CL y PP una morfología homogénea y un tamaño similar para los mismos. Mientras que para los PI sintetizados, se evidencia una conformación diferente, evidenciándose las materias primas no polimerizadas, inmersas en una matriz polimérica (PI BT, PI CL, PI PP), atribuido probablemente a que la activación alcalina no se lleva a cabo de manera uniforme en el gel geopolimérico, variando de un punto a otro en la matriz dependiendo de la distribución del tamaño de partícula, así como del tipo y concentración del activador.

Las arcillas utilizadas como materia prima (BT y PP) presentan una elevada reactividad como consecuencia de su naturaleza vítrea, en el caso de la PP al estar conformada por partículas que poseen varias formas predominando las alargadas y angulosas presenta una gran cantidad de poros como se evidencia en la figura 23 (izquierda), mientras que para la BT al ser una arcilla que presenta un hinchamiento interno así como un intercambio iónico por la sustitución isomórfica del Al^{+3} por Si^{+4} en la capa tetraédrica y de Mg^{+2} por Al^{+3} en la octaédrica, se evidencia un mayor tamaño de partícula (figura 21, izquierda); mientras que para el residuo industrial CL el tamaño de partícula es irregular (figura 22, izquierda) al igual que el CP (figura 24). Estas materia primas al ser activadas de forma alcalina gran parte de las partículas se disuelven y otras no, las partículas que se disuelven forman una matriz que contiene los productos de la reacción, cuando solidifica el material, tal como se evidencian en las figuras 21 al 24.⁶⁷

De manera que diversas morfologías pueden existir en la pasta geopolimérica como partículas sin reaccionar, partículas semi-reaccionadas atacada por la solución activante y los productos de reacción como se evidencian en las micrografías respectivas.

Finalmente, se observa que el tamaño de las partículas es claramente más pequeño para los IP sintetizados que para las arcillas BT y PP; y el residuo industrial CL; lo cual es debido a la compactación de los materiales en la mezcla de cemento, que presenta una mejor organización molecular lo que conlleva la cristalinidad a cada geopolímero.^{68,69}

3.2.4 Analisis por Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)

Las mediciones de EDS para las materias primas de aluminosilicatos: BT, CL y PP (figuras 25, 27 y 29) y los geopolímeros sintetizados (figuras 26, 28 y 30), se realizaron en el equipo FEI QUANTA FEG 650, teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente, los resultados se muestran a continuación:

Figura 25. EDS de la BT

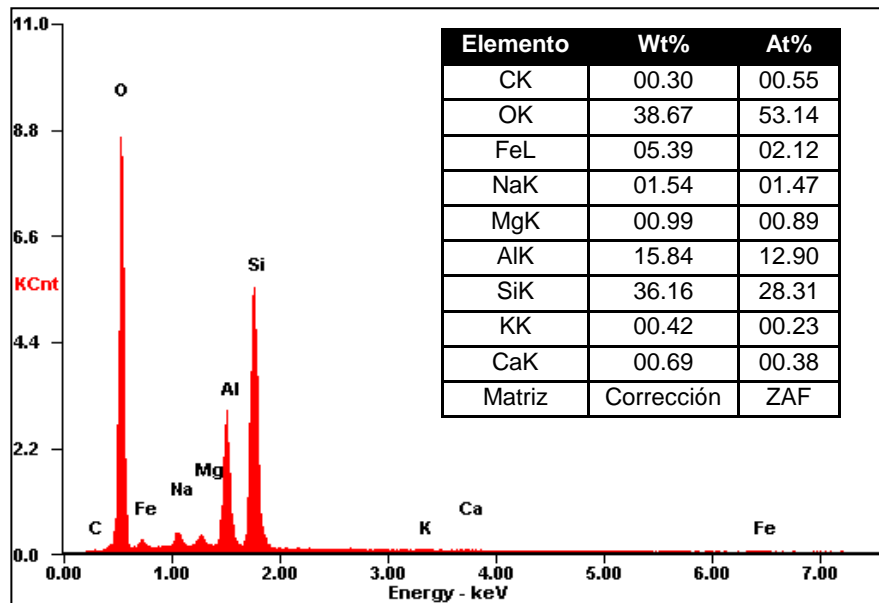


Figura 26. EDS del PI de BT

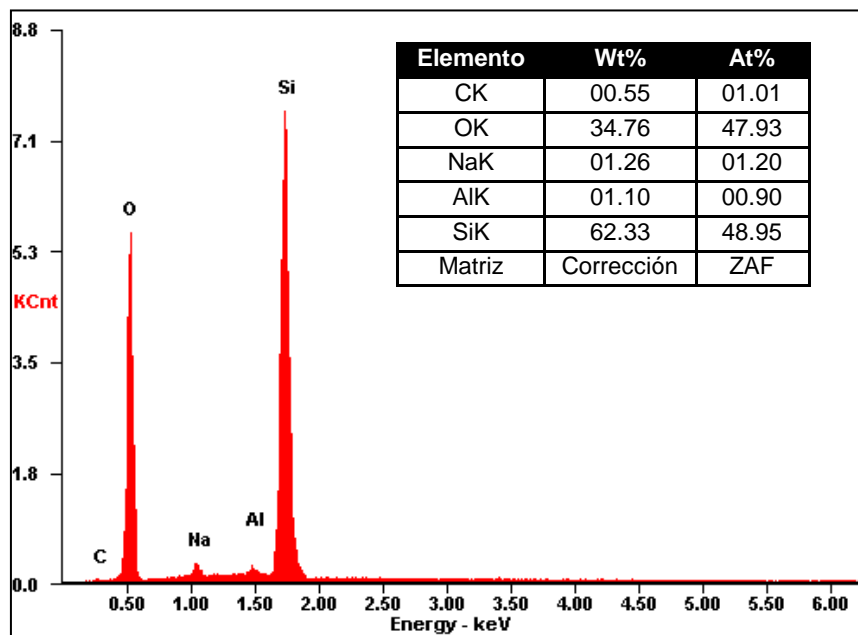


Figura 27. EDS del CL

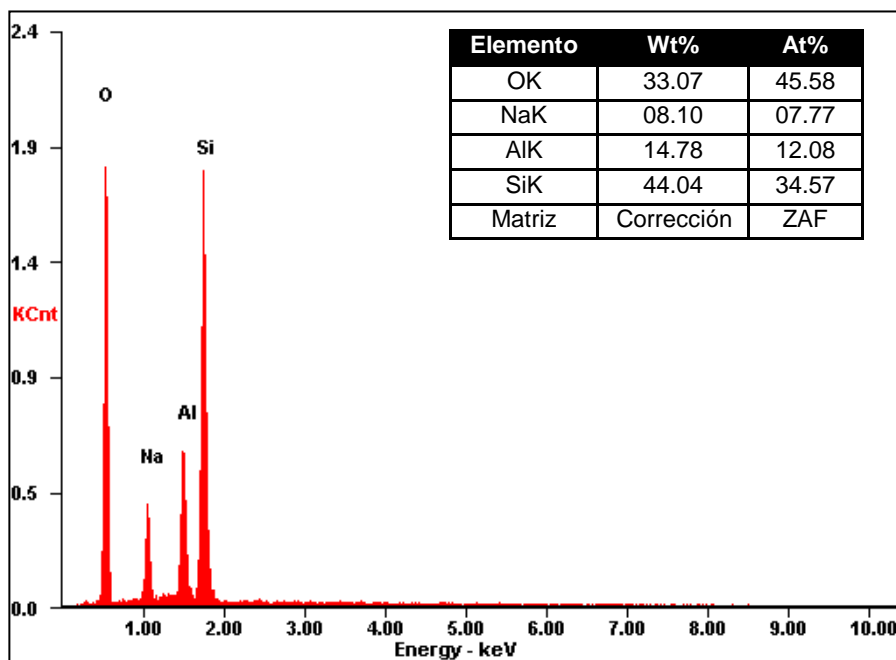


Figura 28. EDS del PI de CL

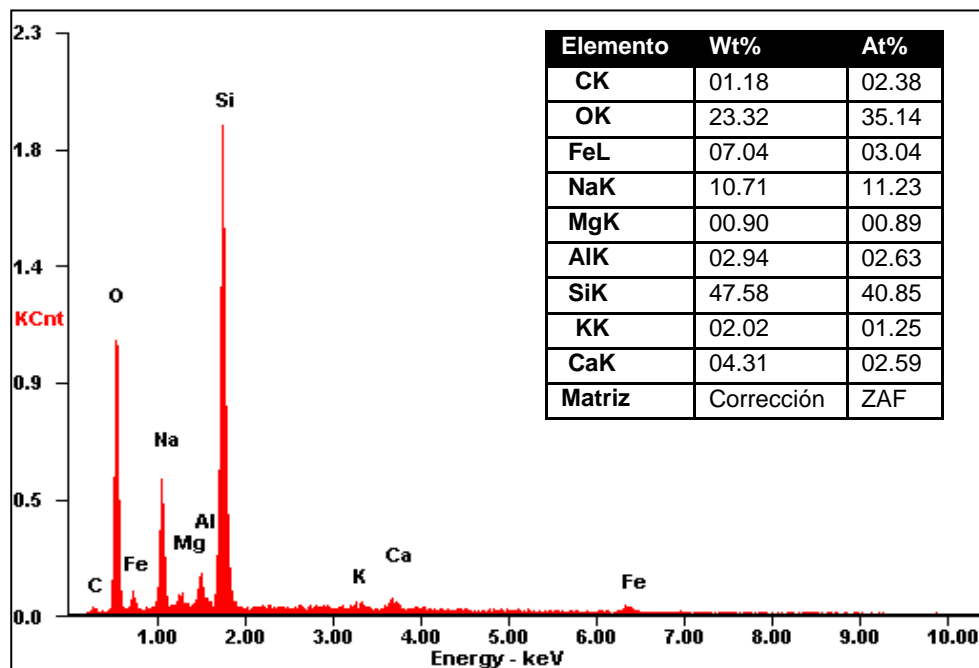


Figura 29. EDS del PP

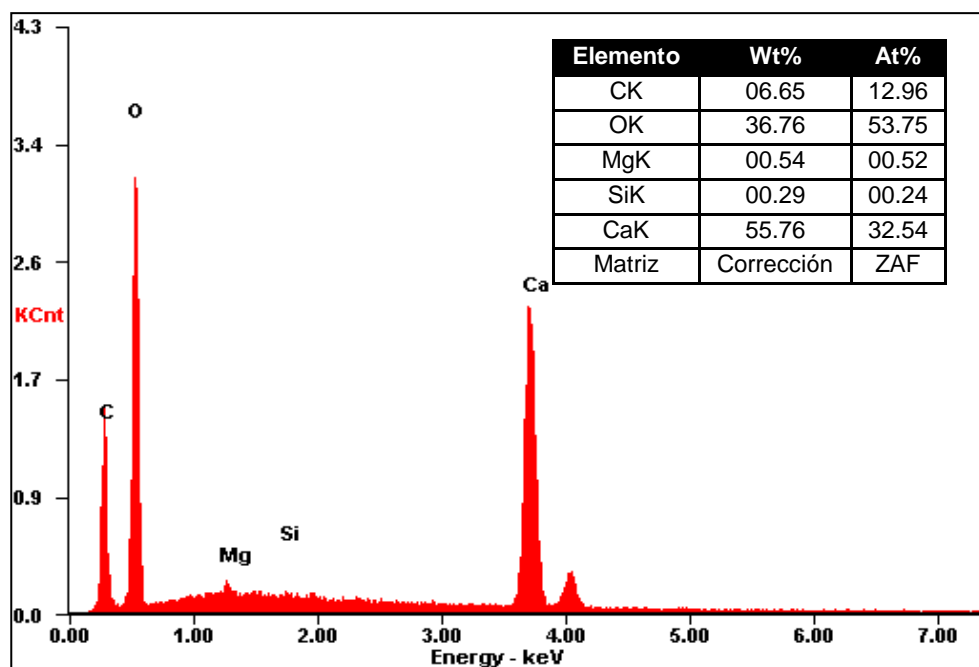


Figura 30. EDS del PI de PP

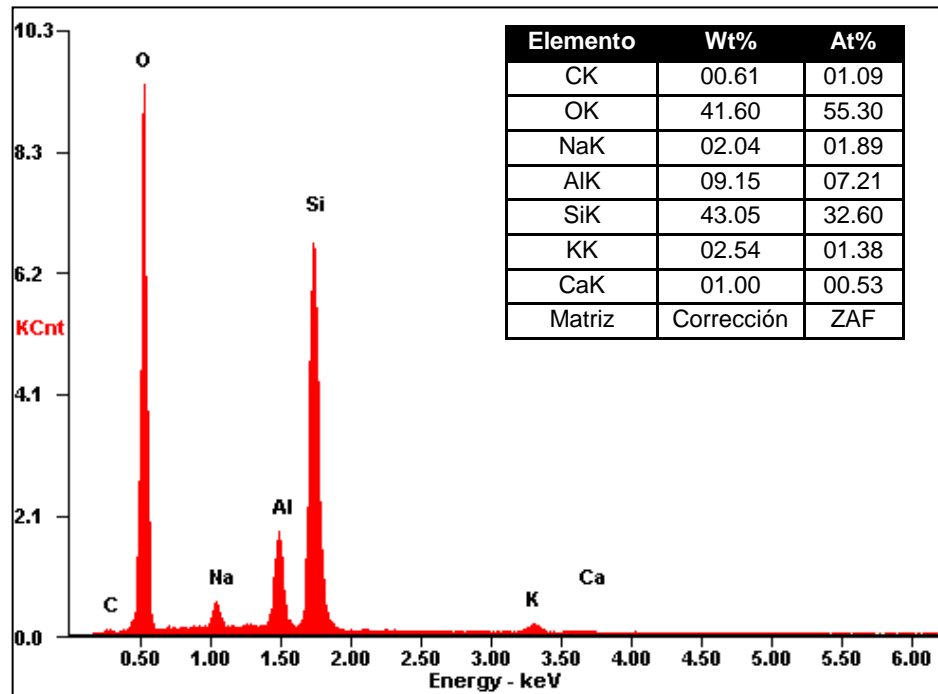
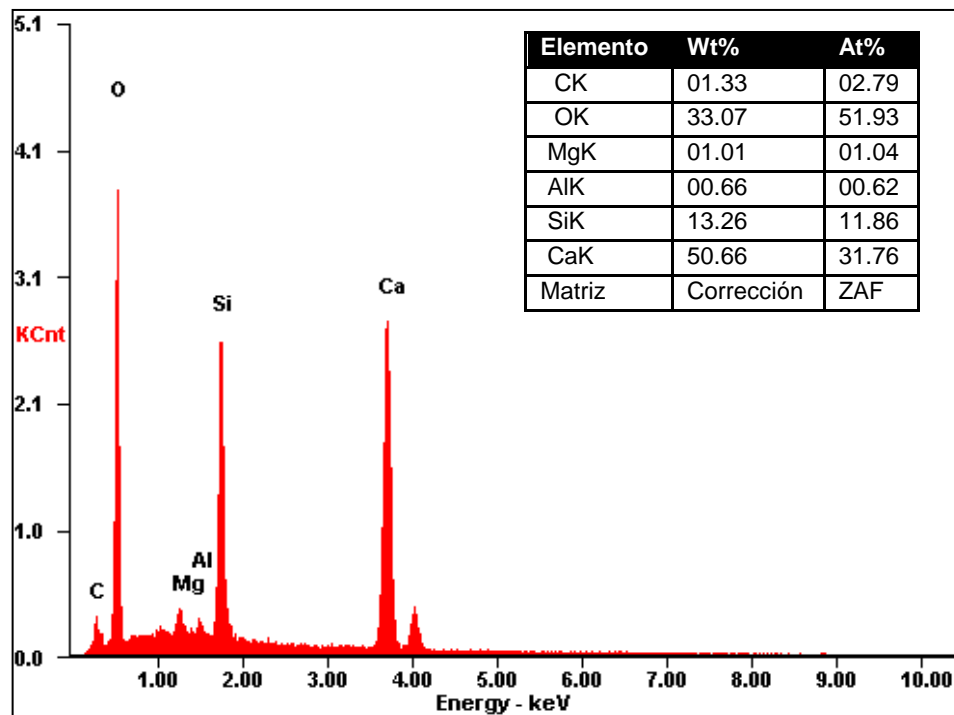


Figura 31. EDS del CP



Con base en los resultados obtenidos en el análisis EDS (figuras 25 al 31), es posible determinar que los geopolímeros están constituidos principalmente por Na-Si-Al y algunas trazas de Ca y K como es el caso del PI de PP y CL; además de encontrarse Fe y Mg para este último. Estas trazas son provenientes de las impurezas de las materias primas, pudiendo estar presentes de forma dispersa y aleatoria en la microestructura, debido a que no se encuentran disueltos en la matriz geopolimérica.^{69,70}

Los resultados encontrados mostraron, que el contenido de Si, Al y Na de los PI, difieren de los valores iniciales de las fuentes de aluminosilicatos (BT, CL y PP), como consecuencia de la activación alcalina con el Na_2SiO_3 ; encontrando que el PI de BT presenta más contenido de Si al igual que el PI de PP mayor contenido de Al en comparación con el CP, el cual presenta mayor contenido de calcio por los sulfoaluminatos generados en su hidratación.

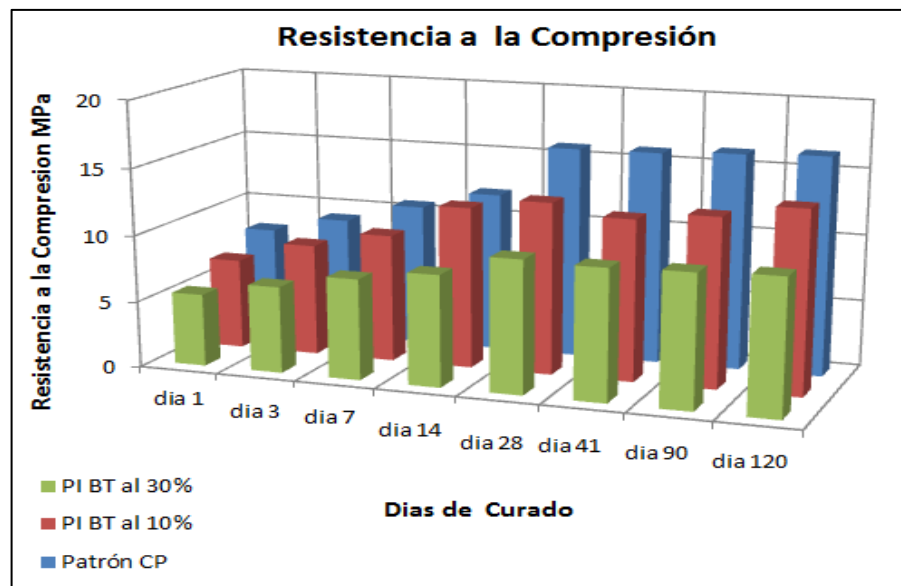
3.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

3.3.1 Resistencia a la compresión La resistencia a la compresión en MPa, se determinó de acuerdo a la norma ICONTEC 220 a las edades de curado de 1,3,7,14,28,41,90 y 120 días, para cada uno de los morteros sustituidos al 10 y 30% en el CP por cada PI (BT,CL y PP). Los resultados obtenidos se consignan en la tabla 20 y para tener una mejor visión de los resultados obtenidos se realizaron los diagramas de barras, los cuales se muestran en las figuras 32 a la 34; es importante anotar que los valores tabulados resultan del promedio aritmético de tres ensayos para cada tiempo de curado y cada sustitución respectivamente.^{3, 50}

Tabla 20. Promedio Aritmético de la resistencia a la Compresión de cada mezcla.

Días de Curado	Resistencia a la Compresión (Mpa)						
	BT 10%	BT 30%	CL 10%	CL 30%	PP 10%	PP 30%	CP
1	6,8	5,4	7,3	3,6	7,5	6,5	8
3	8,4	6,5	8,4	6,5	8,5	7,9	9,2
7	9,6	7,6	11,1	8,1	10,3	9,6	10,7
14	12,1	8,4	12,3	8,7	13,6	10,8	12
28	12,9	10	15,5	8,8	15,2	16	15,9
41	12,1	9,9	13,7	8,8	15,6	16,4	15,9
90	12,7	10	15,2	9	18,3	16,8	16,2
120	13,7	10,2	15,4	9,2	18,8	17,2	16,4

Figura 32. Resistencia a la Compresión del PI del BT



De acuerdo a los resultados obtenidos de RC, en donde se evidencia que los morteros que presentaron mejores desempeños mecánicos de los PI sintetizados son los de PP al 10%, en comparación con el CP, este último presenta mayores valores de RC solo a 1,3 y 7 días de curado; sin embargo el PI de PP al 10% aumenta su RC después de este periodo de envejecimiento presentando mejores valores y siendo estos muy cercanos a los del CP, lo cual infiere que puede

utilizarse como posible agente cementante, siendo un sustrato económico que a su vez favorece al medio ambiente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, además de requerir menor energía en su proceso de fabricación en comparación con el CP, obteniéndose de esta manera un concreto verde con mejores propiedades fisicoquímicas.

Figura 33. Resistencia a la Compresión del PI del PP

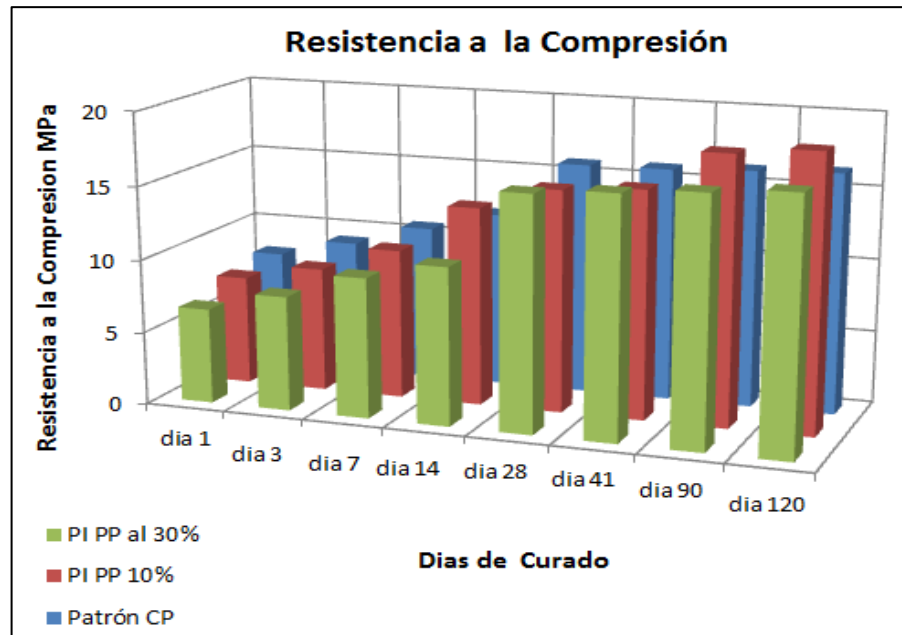
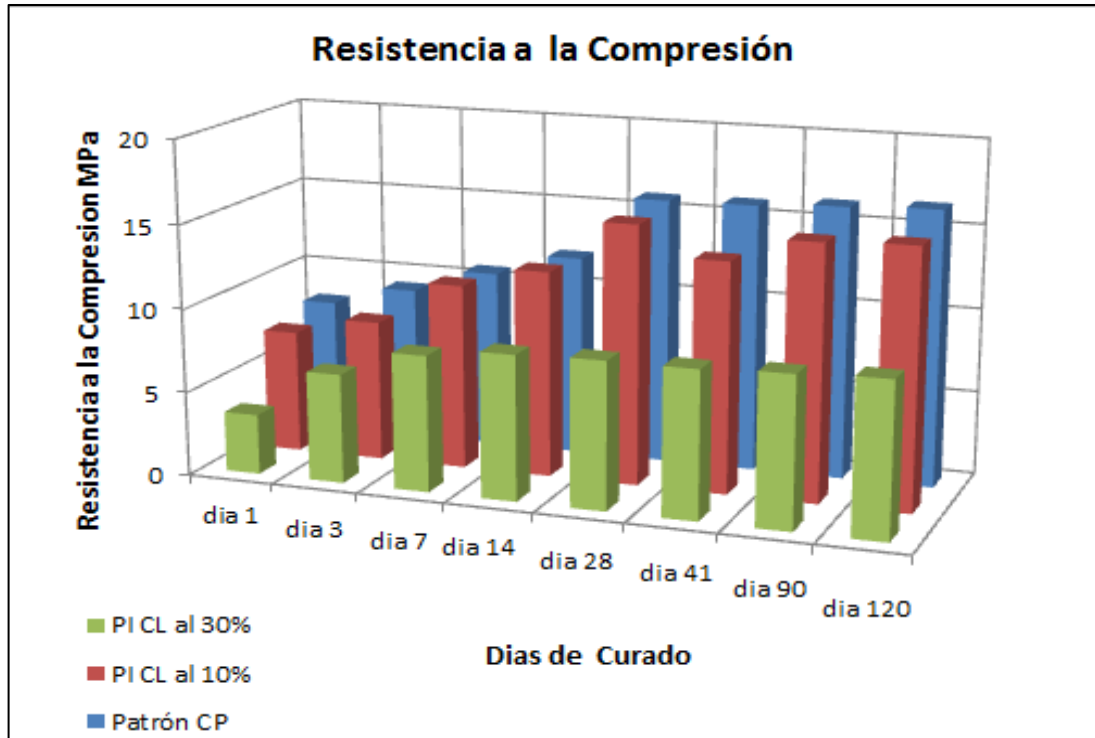


Figura 34. Resistencia a la Compresión del PI del CL



Por otro lado, se evidencia que en los casos de la BT al 10 y 30% y el CL al 10% los mejores valores de resistencia mecánica corresponden a los 28 días de curado en comparación con las otras sustituciones de PI y el CP, en donde a mayor tiempo de exposición mayor rendimiento mecánico. De igual forma, se aprecia una diferencia notable en los valores de RC para las sustituciones de 10% en comparación con las del 30% de cada PI en el CP, en donde a menor porcentaje de sustitución en el CP mayor resistencia mecánica, lo cual es el parámetro para evaluar la resistencia química a los ácidos y sulfatos de esta sustitución.

Por otra parte, se observa que los resultados de RC son casi lineales hasta los 28 días de curado para todos los morteros en donde alcanzan su mayor tiempo de hidratación y al aumentar el tiempo de curado este incrementa pero de forma constante exceptuando el CL al 10%, lo cual es debido a que en el concreto las

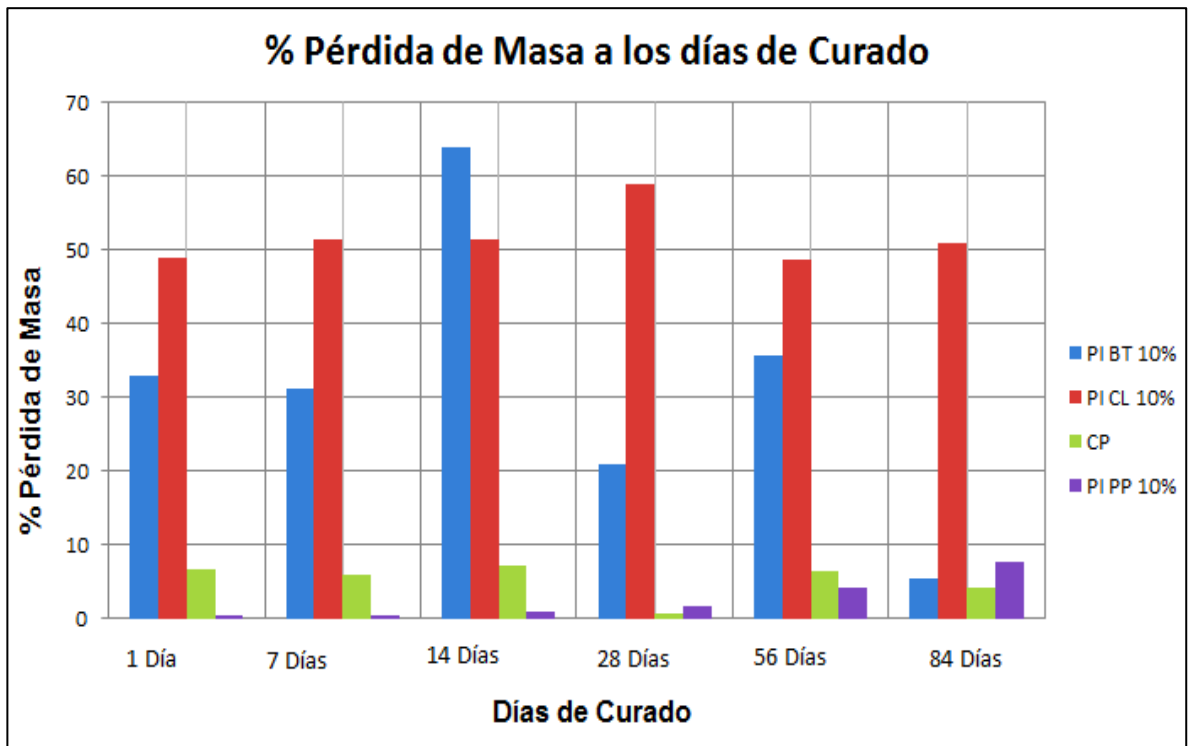
reacciones de hidratación ocurren a gran velocidad, generando silicatos de calcio hidratados que contribuyen a aumentar la resistencia mecánica y disminuir la porosidad de los mismos. Sin embargo, los resultados obtenidos son inferiores frente a otros reportes, en donde las RC son mayores a 21 MPa a 91 días de curado, para morteros de Cenizas volantes (bajas en CaO y Fe₂O₃) activadas con silicato de sodio.^{71 - 73}

3.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

3.4.1 Resistencia Química De acuerdo a los resultados obtenidos para la RC, se determinó la resistencia química de acuerdo a la norma ICONTEC 489 para 48 morteros sustituidos al 10% en el CP con cada PI: 12 de BT, 12 de CL, 12 de PP y 12 de CP.

Se sumergieron los morteros en una solución al 20% de HCl, para posteriormente observar su cambio en la masa y determinar la RC a 1, 7, 14, 28, 56 y 84 días de curado. En el Anexo J, se muestra la variación en la masa de las muestras antes de iniciar el ensayo y después de efectuarlo además del porcentaje de pérdida de los mismos, en la figura 35 se evidencia dichos resultados.³





Figura 35. % Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado de los PI (BT 10%, CL 10% y PP al 10%) y CP.



Se evidencia las pérdidas de masa de cada uno de los morteros a los diferentes tiempos de curado, para la BT, se observa mayor pérdida de masa a los 14 días de curado y una menor a los 28 días, mientras que para el CL es a los 28 y 56 días respectivamente, entre tanto para la PP presenta una menor variación en la masa en comparación con el BT y el CL, solo a los 14 días de curado es apreciable siendo esta mayor a los 84 días.

De manera que el PI de PP, presenta mayor resistencia a los ácidos en comparación con los otros PI sintetizados, lo cual se explica por el mayor contenido de Al en la matriz geopolimérica. En la tabla 21, se muestran algunos morteros después del ataque con ácido.

Tabla 21. Resistencia Quimica de Morteros al 10% de PI

Muestra de PI	Resistencia Quimica de Morteros al 10% de PI
Bentonita	
Clinker	
Piedra Pómez	
CP	

Los morteros expuestos al 20 % de HCl, resultaron afectados debido a que la solución de ácido reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para producir sales de calcio, generando un desgaste en cada uno, acompañado de una pérdida de masa y una posible fragmentación generada para algunas muestras de CL, teniendo presente que la introducción del CO_2 de la atmósfera en la estructura porosa del concreto origina además un descenso en el pH ocasionando que la durabilidad de este sea menor aumentando también su permeabilidad.^{74,75}

Posteriormente, se evaluó la RC para los diferentes tiempos de curado según la norma, obteniéndose los valores de la tabla 22 y la figura 36.

Figura 36. Resistencia a la compresión a partir de la norma ICONTEC 489

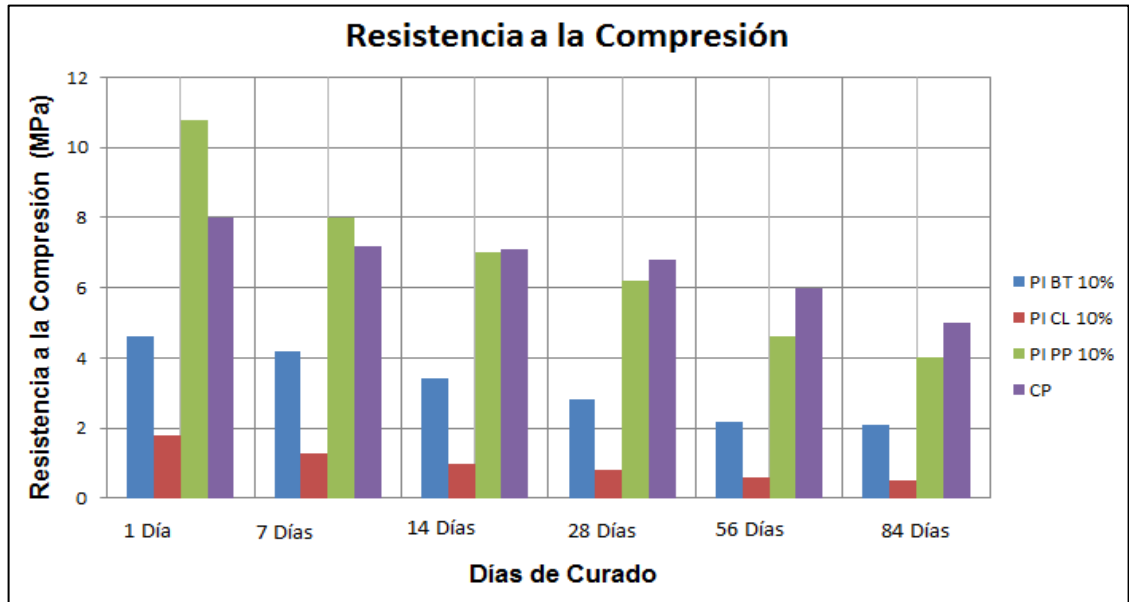


Tabla 22. Resistencia a la compresión posterior al ataque con ácido. ⁷⁶

Días de Curado	Resistencia a la Compresión (Mpa)			
	BT 10%	CL 10%	PP 10%	CP
1	4,6	1,8	10,8	8
7	4,2	1,3	8	7,2
14	3,4	1,0	7	7,1
28	2,8	0,8	6,2	6,8
56	2,2	0,6	4,6	6,0
84	2,1	0,5	4,0	5,0

De acuerdo a los resultados obtenidos para RC posterior al ataque con ácido, se obtiene un mayor desempeño mecánico para los morteros sustituidos al 10% de PP, comprobándose que al presentar una menor variación en el cambio de su masa a través del tiempo de curado presenta un mayor RC, lo cual no ocurre con el CL al 10%.

De manera que el PI de PP presenta un mejor desempeño a los ataques con ácido mientras ocurre lo contrario con el PI de CL. Sin embargo, los resultados obtenidos son inferiores frente a los del CP, lo que indica que esta continua teniendo un mejor desempeño a estas condiciones.

3.4.1 Resistencia a los sulfatos De acuerdo a los resultados obtenidos para la RC, se determinó la resistencia a los sulfatos de acuerdo a la norma ICONTEC 126 para 8 morteros sustituidos al 10% en el CP con cada PI: 2 de BT, 2 de CL, 2 de PP y 2 de CP.

Estos se sumergieron en una solución saturada de Na_2SO_4 , para después del secado evidenciar el cambio de masa, además de porcentaje de pérdida de la misma, en la Tabla 23 y Figura 37 se encuentran los resultados obtenidos.

Figura 37. % Pérdida de masa según la norma ICONTEC 126

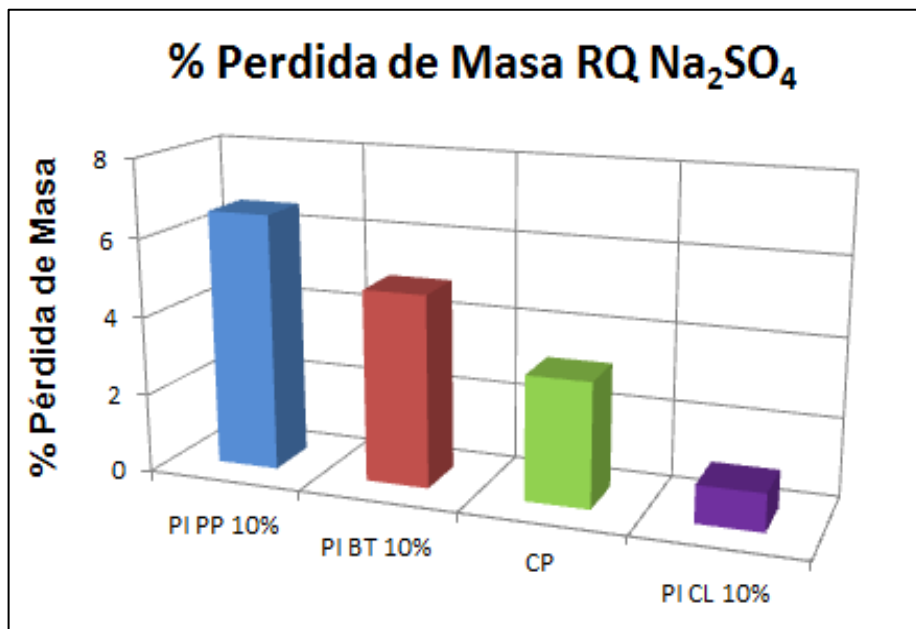


Tabla 23. Pérdida de masa de acuerdo al ataque con Na_2SO_4 ^{77, 78}

PI Sustituido	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Pérdida de Masa
BT 10%	270,07	256,83	4,90
CL 10%	266,84	264,27	0,96
PP 10%	263,73	246,40	6,57
CP	260,21	251,97	3,17

Se observa una mayor pérdida de masa en los morteros sustituidos al 10% con PI de PP y una menor en el PI de CL, lo cual sugiere que este último presenta una mayor resistencia al ataque con Na_2SO_4 , resultando tener un mejor resultado frente al CP. En la tabla 24, se encuentran los morteros sustituidos comparados con el CP.

Tabla 24. Comparación de CP con los PI al ataque con Na_2SO_4

Muestra (Mortero)	Prueba Básica comparada con Patrón (CP)
Piedra Pómez	
Clinker	
Bentonita	

La disminución y porcentaje de pérdida de masa se atribuye posiblemente a la interacción fisicoquímica de los iones sulfato con los sulfoaluminatos de calcio presentes en el cemento, en donde el Na_2SO_4 , reacciona primero con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del concreto generando la deshidratación del mismo, formando NaOH y CaSO_4 , a su vez este último ataca al Aluminato Tricálcico (C_3A) del cemento, formando etringita, (apariencia blaquesina) ocasionando la expansión, agrietamiento y desintegración de los morteros.⁷⁶⁻⁷⁹

4. CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los PI sintetizados depende directamente del mecanismo de la reacción de geopolimerización, en la cual la concentración de la materia prima; concentración y tipo de la solución activante y temperatura mayor a la ambiente, son parámetros que permiten la formación del monómero de sialato para su posterior condensación y formación de la matriz polimérica.
- Los tres aluminosilicatos empleados en la activación alcalina son útiles como sustituyentes para el CP, sin embargo el mejor resultado es el de la PP, la cual presenta una mejora en la cristalinidad consecuente de la activación alcalina que reduce su amorficidad incrementando de esta manera su RC.
- Los resultados de caracterización estructural, permiten comprobar que la reacción de geopolimerización fue llevada a cabo en el medio de reacción, a través de una activación alcalina, que implica un reordenamiento estructural en los aluminosilicatos (PP, BT y CL), debido a la formación del enlace Si-O-Al en cada PI sintetizado con la mejora en el grado de cristalinidad; encontrándose que no toda la materia prima se polimeriza lo que sugiere utilizar menor cantidad de aluminosilicato.
- A partir de los resultados de RC, se evidencia que los morteros que presentaron mejores desempeños mecánicos de los PI sintetizados, son los PI de PP al 10% y 30% lo cual infiere que puede utilizarse como posible

agente cementante, siendo un sustrato económico que a su vez favorece la resistencia a los ácidos.

- La sustitución del 30% de CP por PI de PP, permite obtener resultados similares de RC, ya que por su naturaleza porosa y el contenido de calcio de la PP permite favorecer la resistencia mecánica además de la resistencia a los ácidos.
- 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 cementera.

4. RECOMENDACIONES

- Mediante un ajuste en las relaciones estequiométricas de los óxidos de Si, Al y del ión alcalino (Na^+ y/o Ca^{2+}) de los precursores, mejorar los resultados de resistencia a la compresión y resistencia a los ácidos y sulfatos de los PI.
- Realizar un análisis microestructural mediante RMN, a través del tiempo de fraguado de cada uno de los morteros, para indicar lo que sucede en la matriz polimérica desde el inicio de la reacción y la hidratación a través del tiempo.
- Implementar otras fuentes de aluminosilicatos como alternativa de sustitución en el CP, ricas en silicio y calcio para mejorar la RC.
- Caracterizar la resistencia eléctrica mediante EIS para el concreto reforzado con la sustitución de geopolímeros a diferentes tiempos.
- Determinar la RQ tanto de ácidos como de sulfatos para la sustitución del 30% de PP en el CP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ZHANG Zuhua; WANG Hao; PROVIS Jhon L.; BULLEN Frank; REID Andrew; ZHU Yingcan. *Thermochimica acta*. Volume 539 (2012) 23-33.
2. SHI Caijun; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ A.; PALOMO Angel. *Cement and concrete research*. Volume 41 (2011) 750-763.
3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION ICONTEC, agua para la elaboración de concreto. NTC 3459.
4. BROWN THEODORE L; LEMAY H. LEUGENE AND BURSTEN BRUCE E. Química la ciencia Central. séptima Edición. Pearson Prentice Hall. (1998). p: 428-431.
5. YEPES GAVIRIA Olga Nallive BEDOYA MONTOYA Carlos Mauricio GÓMEZ EUSSE Juan David. Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. del bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de tierra con geopolímeros (BTG). Colombia (2012). P: 240-247.
6. DAVIDOVITS J. PROC. 1st Internat. Conf. Alkaline cements and concretes (1994). P:131-149.
7. DAVIDOVITS Joseph. 30 years of successes and failures in geopolimer applications. Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer 2002 conference. 2002. P: 1-16. Melbourne, Australia.

8. DANIEL L.Y. KONG; JAY G. SANJAYAN; KWESI SAGOE-CRENTSIL. *Cement and concrete research*. volume 37 (2007) 1583-1589.
9. Yunsheng ZHANG; Wei SUN; Zongjin LI. *Applied clay science*. Volume 47 (2010) 271-275.
10. RUEDA María Carolina; VEGA Karen. determinación del carácter puzalónico de laterita níquelífera, pumita, diatomita y su efecto como aditivo en el cemento portland tipo I. Trabajo de grado (geología). Universidad Industrial De Santander.
11. D.S. PERERA; O. UCHIDA; E.R. VANCE; K. S FINNIE. *Journal of materials science*. Volume 42 (2007) 3099 – 3106
12. Z. OMEMAN, MONCEF NEHDI. El cemento de geopolímeros en el hormigón un nuevo conglomerante para el futuro. (2007) P: 4-19.
13. M.C.M. NASVI ; P.G. RANJITH ; J. Sanjayan a numerical study of CO₂ flow through geopolymer under down-hole stress conditions: application for CO₂ sequestration wells ; *journal of unconventional oil and gas resources*; 7 (2014) 62–70
14. RODRÍGUEZ Erich, MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby, BERNAL Susan, GORDILLO Marisol. Efecto de los módulos SiO₂ /Al₂O₃ y Na₂O/SiO₂ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* N.º 49 (2009) PP. 30-40.
15. SANJAY KUMAR, RAKESH KUMAR; Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics international* 37 (2011) 533–541.

16. H. RAHIER, B. VAN MELE, M. BIESEMANS, J. WASTIELS, X. WU. "Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part I. low-temperature reaction stoichiometry and structure of a model compound". *J. Mat. Sci.* Vol. 31. 1996. PP. 71-79.
17. H. XU, J. S. J. VAN DEVENTER. "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals". *Int. J. Miner. Proc.* Vol. 59. 2000. pp. 247-266.
18. STÉPHANIE DELAIR; ÉLODIE PRUD'HOMME; CLAIRE PEYRATOUT; AGNÉS SMITH; PHILIPPE MICHAUD; LILIAN ELOY; EMMANUEL JOUSSEIN; SYLVIE ROSSIGNOL. *Corrosion Science*. Volume 59 (2012) 213-221.
19. C.Y. HEAH; H. KAMARUDIN; A.M. MUSTAFA AL BAKRI; M. BNHUSSAIN; M. LUQMAN; I. KHAIRUL NIZAR; C.M. RUZAIDI; Y.M. LIEW. *Construction and Building Materials*. Volume 35 (2012) 912- 922.
20. DANIEL L.Y. KONG; JAY G. SANJAYAN; Kwesi sagoe-crentsil. *Cement and Concrete Research*. Volume 37 (2007) 1583-1589.
21. JOSEPH DAVIDOVITS. *Geopolymer chemistry and applications*. Second Edition (2008). France. Pp: 19-31.
22. ALI NAZARI; ALI BAGHERI; SHADI RIAHI. *Materials science and engineering: A*. Volume 528. (2011). 7395-7401.
23. Z. ZUHUA; Y. XIAO; Z. HUAJUN; C. YUE. *Applied Clay Science*. Volume 43 (2009) 218-223.
24. SAKONWAN HANJITSUWAN , SITCHAI HUNPRATUB , PRASIT THONGBAI , SANTI MAENSIRI C, VANCHAI SATA ,PRINYA CHINDAPRASIRT ; Effects of

NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste; cement & concrete composites; 45 (2014) 9–14.

- 25.** GÖKHAN GÖRHAN, GOKHAN KÜRKLÜ; The influence of the naoh solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures; composites: Part B; Part B 58 (2014) 371–377.
- 26.** PAVEL ROVNANIK; Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer; construction and building materials; 24 (2010) 1176–1183.
- 27.** SANJAY KUMAR, Rakesh Kumar; Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer; science direct; 37 (2011) 533–541.
- 28.** RODRÍGUEZ MARTÍNEZ Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante. Universidad Politécnica de Valencia. Dpto de Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil. 2009. PP: 1-85.
- 29.** RODRÍGUEZ Erich, MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby, BERNAL Susan Y GORDILLO Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009, pp: 595-600.
- 30.** ALVAREZ Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicoquímicas de geopolímeros a partir de la puzalona para su aplicación en la industria. trabajo de grado (geología). Universidad Industrial de Santander.

- 31.**A. FAVIER; G. HABERT; J.B. D'ESPIROSE DE LACAILLERIE ; N. Roussel
mechanical properties and compositional heterogeneities of fresh geopolymer
pastes; cement and concrete research; 48 (2013) 9–16.
- 32.**LEI ZHENG ; WEI WANG; YUNCHUN SHI; TECHNICAL NOTE; The effects of
alkaline dosage and Si/AL ratio on the immobilization of heavy metals in
municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer; chemosphere; 79
(2010) 665–671.
- 33.**CATHERINE A. REES, JOHN L. PROVIS , GRANT C. LUKEY, JANNIE S.J.
VAN DEVENTER; THE MECHANISM OF GEOPOLYMER GEL FORMATION
INVESTIGATED THROUGH SEEDED NUCLEATION; SCIENCE DIRECT; 318
(2008) 97–105.
- 34.**RODRÍGUEZ MARTÍNEZ Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos
basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas
geopoliméricos de ceniza volante. trabajo de investigación cst/mih-05.
universidad politécnica de valencia. ingeniería de la construcción y proyectos
de ingeniería civil. (2009).pp:1-85.
- 35.**ROBAYO NUÑEZ Estefania. Comportamiento mecánico y durabilidad de
morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Pontificia Universidad
Javeriana Departamento de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá. Pp:
22-30.
- 36.**YAO JUN ZHANG , SHENG LI, YA CHAO WANG, DE LONG XU;
Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by
resin exposed to elevated temperature; journal of non-crystalline solids; 358
(2012) 620–624.

- 37.** YI HUANG, MINFANG HAN; The influence of Al_2O_3 addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products; *Journal of hazardous materials*; 193 (2011) 90– 94.
- 38.** ALVAREZ MANTILLA Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades físico-mecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Universidad Industrial de Santander. Facultad Físicoquímica. Escuela de Geología. (2010). pp: 1-118.
- 39.** J.S.J. VAN DEVENTER; J.L. PROVIS; P. DUXSON; G.C. LUKEY. *Journal of hazardous materials*. Volume 139 (2007) 506-513.
- 40.** YAO JUN ZHANG; SHENG LI; YA CHAO WANG; DE LONG XU. *Journal of non-crystalline solids*. Volume 358 (2012) 620- 624.
- 41.** PEIGANG HE; DECHANG JIA; TIESONG LIN; MEIRONG WANG; YU ZHOU. *Ceramics international*. Volume 36 (2010) 1447-1453.
- 42.** J.S. HONG; X.X. HUANG; J.K. GUO. *Materials letters*. volume 24 (1995) 327-331.
- 43.** ERGULYASAR; CENGİZ DURAN ATIS; ALAETTİN KILIC; HASAN GULSEN. *Materials letters*. volume 57 (2003) 2267-2270.
- 44.** ACEVEDO, leidy P. Y MOYA, HARWIN J. Liliana. Estudio de la inhibición de la corrosión de acero al carbono en salmueras mediante el uso de polianilina, dopada con minerales, añadidos a pinturas epóxicas. tesis de grado Químico. Santander: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 2014, 119 P.

- 45.**GEOPÓMEZ S.A. Distribuidora de piedra pómez. ficha de seguridad piedra pómez.
- 46.**ROYERO MONTEJO Claudia; PÉREZ MEDINA. Jenny. Síntesis y caracterización estructural de un geopolímero elaborado a partir de bentonita para ser usado como agente cementante alternativo al portland. Universidad Industrial de Santander Facultad de Ciencias, Escuela de Química 2012 p: 103.
- 47.**HU MINGYU; ZHU XIAIMIN; LONG FUMEI. *Cement and concrete composites*. Volume 31(2009) 762-768.
- 48.**VILLAMIZAR SIERRA Martha Liliana. Adsorción de Cu^{2+} en solución acuosa mediante bentonita modificada. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Química. pp: 1-57.
- 49.**PIMIENTO RODRÍGUEZ Kelly Johana. Diseño y evaluación de un filtro de bentonita modificada para la captación de iones Ni^{2+} presentes en efluentes industriales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Metalúrgica. Pp:1-90.
- 50.**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C109 / C109M - 12 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (US>Ing 2-IN. OR [50-MM] cube specimens).
- 51.**Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. [en línea] disponible en: <http://materiales.azc.uam.mx/tperea/114331/NTC-CONCRETO.pdf>

- 52.**CEMEX COLOMBIA. Tipos de cemento [en línea] disponible en: http://www.cemexcolombia.com/np/np_ce_sa.html, citado 20/09/12.
- 53.**UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESPAÑA. Tipos de cementos. [en línea] disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Tipos.CEMENTOS.pdf>
- 54.**UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Cátedra de ingeniería rural. españa [en línea] disponible en: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos.PDF
- 55.**TANAKORN PHOO-NGERNKHAM , PRINYA CHINDAPRASIRT , VANCHAI SATA , SAKONWAN HANJITSUWAN;SHIGEMITSU HATANAKA; The effect of adding NANO-SiO₂ and NANO-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature; materials and design; 55 (2014) 58–65.
- 56.**ZUHUA ZHANG, JOHN L. PROVIS, ANDREW REID, HAO WANG; Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction; construction and building Materials; 56 (2014) 113–127.
- 57.**C P GONZÁLEZ, A M MONTAÑO, A K GONZÁLEZ, C A RÍOS. GONZÁLEZ C. P; MONTAÑO A. M; GONZÁLEZ A. K., RÍOS C. A. Synthesis and characterization of inorganic polymers from the alkali activation of an aluminosilicate. iop conf. series: materials science and engineering. Volume 59 (2014). PP: 1-5.
- 58.**SANDOVAL CARREÑO Diana Carolina. Obtención y caracterización de un geopolímero sintetizado a partir de metacaolín utilizado para la generación de

un concreto verde. Universidad Industrial de Santander. de Santander Facultad de Ciencias, Escuela de Química 2013 P: 147.

59. YOUNG R. Introduction to the rietveld method. international union of crystallography. Oxford University. 1993. P: 21-22.
60. HAIDER M. GIASUDDIN, JAY G. SANJAYAN, P.G. RANJITH; Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions; fuel; 107 (2013) 34–39.
61. RODRÍGUEZ Erich; MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby; BERNAL Susan Y GORDILLO Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales 2009; PP: 595-600.
62. J. TEMUJIN, R.P.WILLIAMS, A. VAN RIESEN; Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature; journal of materials processing technology; 209 (2009) 5276–5280.
63. CRIADO M, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A. Alkali activation of fly ash: effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. Part I: Ftir study. microporous and mesoporous materials, V 106, (2007). PP 180-191;
64. LEE W.K.W Y VAN DEVENTER. J.S.J. Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. langmuir 2003, 19. PP. 8726-8734.

- 65.** UCHINO T., SAKKA T., IWASAKI M . Interpretation of hydrated states of sodium silicate glasses by infrared and raman analysis, J. AM. Ceram. SOC. 1991, 74, PP:306- 313.)
- 66.** VÁZQUEZ MORENO Tomas. Contribución al estudio de los reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopia infrarroja iii. estudio por espectroscopia ir de los procesos de hidratación del cemento portland hasta una edad de 4 años. [en línea] disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1225/1354>
- 67.** GONZÁLEZ ACUÑA Rolando Enrique. Caracterización de geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno. maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey, Nuevo León, México. 2012 [en línea] disponible en: <http://eprints.uanl.mx/2878/1/1080224675.pdf>
- 68.** VILLAQUIRÁN-CAICEDO Mónica Alejandra; RODRÍGUEZ ERICH David; MEJÍA-DE GUTIÉRREZ Ruby. Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas. ingeniería investigación y tecnología, Volumen XVI (número 1), enero-marzo 2015: 113-122.
- 69.** S.K. NATH , SANJAY KUMAR; Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer; construction and building materials; 38 (2013) 924–930.
- 70.** SAMUEL DEMIE , MUHD FADHIL NURUDDIN , NASIR SHAFIQ ; Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive

strength of self-compacting geopolymer concrete; construction and building materials; 41 (2013) 91–98.

- 71.** OMAR A. ABDULKAREEM , A.M. MUSTAFA AL BAKRI , H. KAMARUDIN , I. KHAIRUL NIZAR , ALA'EDDIN A. SAIF; Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete; construction and building materials; 50 (2014) 377–387.
- 72.** PRADIP NATH , Prabir kumar sarker; effect of ggbfs on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition; construction and building materials; 66 (2014) 163–171.
- 73.** M.A.M. ARIFFIN, M.A.R. BHUTTA, M.W. HUSSIN, M. MOHD TAHIR, NOR AZIAH; Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete; construction and building materials; 43 (2013) 80–86.
- 74.** YANG K.H., SONG J.K, ASHOUR A.F AND LEE E.T. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. construction and building materials. Vol 22. (2008). PP: 1981-1989.
- 75.** SHIQIN YAN, KWESI SAGOE-CRENTSIL; Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications; journal of environmental management; 112 (2012) 27-32.
- 76.** MOSLIH AMER SALIH, ABANG ABDULLAH ABANG ALI, NIMA FARZADNIA; Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste; construction and building materials; 65 (2014) 592–603.

- 77.** EHSAN UL HAQ , SANOSH KUNJALUKKAL PADMANABHAN, LICCIULLI Antonio; IN-SITU Carbonation of alkali activated fly ash geopolymer; construction and building materials; 66 (2014) 781–786.
- 78.** CIFUENTES A.; FERRERC. Análisis de del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Trabajo de grado (ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. 2006
- 79.** MORTEROS DE CONSTRUCCION Y ORNAMENTACION [en línea] disponible en:
<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>
- 80.** PRAKASH R. VORAA, URMIL V. DAVEB; Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete; procedia engineering; 51 (2013) 210 – 219.
- 81.** INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS Especificaciones y normas de construcción de carreteras I.N.V, 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.
- 82.** PRINYA Chindapasirt; Ubolluk rattanasak.waste management. Volume 30 (2010).667-672.
- 83.** SRAVANTHI PULIGILLA, PARAMITA MONDAL; Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer; cement and concrete research; 43 (2013) 70–80.
- 84.** SMITH SONGPIRIYAKIJ A, TEINSAK KUBPRASIT B, CHAI JATURAPITAKKUL B, PRINYA CHINDAPRASIRT; Compressive strength and

degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer; construction and building materials; 24 (2010) 236–240.

- 85.** ARIE VAN RIESSEN , EVAN JAMIESON , CATHERINE S. KEALLEY , ROBERT D. HART , ROSS P. WILLIAMS ; Bayer-geopolymers: an exploration of synergy between the alumina and geopolymer industries; cement & concrete composites; 41 (2013) 29–33.
- 86.** ELIMBI, H.K. TCHAKOUTE, D. NJOPWOUO; Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements; construction and building materials; 25 (2011) 2805–2812.
- 87.** H.A. ABDEL-GAWWAD , S.A. ABO-EL-ENEIN ; A novel method to produce dry geopolymer cement powder; housing and building national research center hbrc journal.
- 88.** ZENGQING Sun, HAO Cui, HAO An, DEJING Tao, YAN Xu, JIANPING Zhai, QIN Li ; Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic; construction and building materials; 49 (2013) 281–287.
- 89.** SALMANG H. Los fundamentos físicos y químicos de la cerámica. editorial reverté S.A. España. P: 17-74.
- 90.** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO Territorial. manual de inventario de fuentes puntuales. Colombia. pp: 17-19; 58-59.
- 91.** VILLARINO OTERO Alberto. Tema 5: el cemento. Escuela Técnica Superior de Ávila. Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Ciencia y Tecnología de materiales. P: 26. [en línea] disponible en: <http://ocw.usal.es/enseanzas->

tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%205-%20EL%20CEMENTO.pdf

- 92.** DEMIE Samuel, NURUDDIN Muhd Fadhil, SHAFIQ Nasir; Effects of microstructure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete; construction and building materials; 41 (2013) 91–98.
- 93.** UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Difracción de rayos x, introducción. [en línea] disponible en: http://www.upct.es/~minaeees/difraccion_rayosx.pdf
- 94.** SERRANO MARTÍNEZ José Luis. Espectroscopía infrarroja 1-fundamentos. curso: instrumentación y métodos de análisis químico. posgrado en ingeniería del agua y del terreno. [en línea] disponible en: http://www.upct.es/~minaeees/espectroscopia_infrarroja.pdf
- 95.** RENAU-PIQUERAS Jaime & FAURA Magdalena. Principios básicos del microscopio electrónico de barrido. sección de microscopía electrónica. centro de investigación. valencia. [en línea] disponible en: http://ruc.udc.es/bitstream/2183/9313/1/CC-011_art_5.pdf
- 96.** MÁRQUEZ HERRERA Alfredo. Crecimiento y caracterización de películas delgadas ferroeléctricas de $Ba_{1-x}SR_xTIO_3$ por la técnica de rf-sputtering. instituto politécnico nacional. centro de investigaciones en ciencia aplicada y tecnología avanzada, unidad altamira. tesis para obtener el grado de maestro en tecnología avanzada. pp:22-25.

- 97.** UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED). Métodos de análisis mineralógico Madrid, España. [en línea] disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>
- 98.** CHANGMING Li, TINGTING Zhang, LIJIU Wang; Mechanical properties and microstructure of alkali activated pisha sandstone geopolymer composites; construction and building materials; 68 (2014) 233–239.

BIBLIOGRAFIA

A. FAVIER; G. HABERT; J.B. D'ESPIROSE DE LACAILLERIE ; N. Roussel
mechanical properties and compositional heterogeneities of fresh geopolymer
pastes; cement and concrete research; 48 (2013) 9–16.

ACEVEDO, LEIDY P. Y MOYA, HARWIN J. Liliana. Estudio de la inhibición de la
corrosión de acero al carbono en salmueras mediante el uso de polianilina,
dopada con minerales, añadidos a pinturas epóxicas. Tesis de grado Químico.
Santander: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de
Química, 2014, 119 P.

ALI NAZARI; ALI BAGHERI; SHADI RIAHI. *Materials science and engineering: A*.
Volume 528. (2011). 7395-7401.

ALVAREZ Hernando. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicoquímicas
de geopolímeros a partir de la puzalona para su aplicación en la industria. trabajo
de grado (geología). Universidad Industrial de Santander.

ALVAREZ MANTILLA Hernando. Sintesis y caracterización de las propiedades
fisicomecanicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la
industria. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicoquímica. Escuela de
Geología. (2010). pp: 1-118.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C109 / C109M -
12 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars
(US>Ing 2-IN. OR [50-MM] cube specimens).

ARIE VAN RIESSEN , EVAN JAMIESON , CATHERINE S. KEALLEY , ROBERT D. HART , ROSS P. WILLIAMS ; Bayer-geopolymers: an exploration of synergy between the alumina and geopolymer industries; cement & concrete composites; 41 (2013) 29–33.

BROWN THEODORE L; LEMAY H. LEUGENE AND BURSTEN BRUCE E. Química la ciencia Central. séptima Edición. Pearson Prentice Hall. (1998). p: 428-431.

C P GONZÁLEZ, A M MONTAÑO, A K GONZÁLEZ, C A RÍOS. GONZÁLEZ C. P; MONTAÑO A. M; GONZÁLEZ A. K., RÍOS C. A. Synthesis and characterization of inorganic polymers from the alkali activation of an aluminosilicate. iop conf. series: materials science and engineering. Volume 59 (2014). PP: 1-5.

C.Y. HEAH; H. KAMARUDIN; A.M. MUSTAFA AL BAKRI; M. BNHUSSAIN; M. LUQMAN; I. KHAIRUL NIZAR; C.M. RUZAIDI; Y.M.LIEW. *Construction and building materials*. Volume 35 (2012) 912- 922.

CATHERINE A. REES, JOHN L. PROVIS , GRANT C. LUKEY, JANNIE S.J. VAN DEVENTER; THE MECHANISM OF GEOPOLYMER GEL FORMATION INVESTIGATED THROUGH SEEDED NUCLEATION; SCIENCE DIRECT; 318 (2008) 97–105.

CEMEX COLOMBIA. Tipos de cemento [en línea] disponible en: http://www.cemexcolombia.com/np/np_ce_sa.html, citado 20/09/12.

CHANGMING Li, TINGTING Zhang, LIJIU Wang; Mechanical properties and microstructure of alkali activated pisha sandstone geopolymer composites; construction and building materials; 68 (2014) 233–239.

CIFUENTES A.; FERRERC. Análisis de del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Trabajo de grado (ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. 2006

CRIADO M, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A. Alkali activation of fly ash: effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. Part I: Ftir study. microporous and mesoporous materials, V 106, (2007). PP 180-191;

D.S. PERERA; O. UCHIDA; E.R. VANCE; K. S FINNIE. *Journal of materials science*. Volume 42 (2007) 3099 – 3106

DANIEL L.Y. KONG; JAY G. SANJAYAN; KWESI SAGOE-CRENTSIL. *Cement and concrete research*. volume 37 (2007) 1583-1589.

DANIEL L.Y. KONG; JAY G. SANJAYAN; Kwesi sagoe-crentsil. *cement and concrete research*. Volume 37 (2007) 1583-1589.

DAVIDOVITS J. PROC. 1st Internat. Conf. Alkaline cements and concretes (1994). P:131-149.

DAVIDOVITS Joseph. 30 years of successes and failures in geopolimer applications. Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer 2002 conference. 2002. P: 1-16. Melbourne, Australia.

DEMIE Samuel, NURUDDIN Muhd Fadhil, SHAFIQ Nasir; Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolimer concrete; *construction and building materials*; 41 (2013) 91–98.

EHSAN UL HAQ , SANOSH KUNJALUKKAL PADMANABHAN, LICCIULLI Antonio; IN-SITU Carbonation of alkali activated fly ash geopolymer; construction and building materials; 66 (2014) 781–786.

ELIMBI, H.K. TCHAKOUTE, D. NJOPWOUO; Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements; construction and building materials; 25 (2011) 2805–2812.

ERGULYASAR; CENGIZ DURAN ATIS; ALAETTIN KILIC; HASAN GULSEN. *Materials letters*. volume 57 (2003) 2267-2270.

GEOPÓMEZ S.A. Distribuidora de piedra pómez. Ficha de seguridad piedra pómez.

GÖKHAN GÖRHAN, GOKHAN KÜRKLÜ; The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures; composites: Part B; Part B 58 (2014) 371–377.

GONZÁLEZ ACUÑA Rolando Enrique. Caracterización de geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno. Maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey, Nuevo León, México. 2012 [en línea] disponible en: <http://eprints.uanl.mx/2878/1/1080224675.pdf>

H. RAHIER, B. VAN MELE, M. BIESEMANS, J. WASTIELS, X. WU. “Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part I. low-temperature reaction stoichiometry and structure of a model compound”. *j. mat. scl.* Vol. 31. 1996. PP. 71-79.

H. XU, J. S. J. VAN DEVENTER. "The geopolymerization of alumino-silicate minerals". *Int. J. miner. proc.* Vol. 59. 2000. pp. 247-266.

H.A. ABDEL-GAWWAD , S.A. ABO-EL-ENEIN ; A novel method to produce dry geopolymer cement powder; housing and building national research center hbrc journal.

HAIDER M. GIASUDDIN, JAY G. SANJAYAN, P.G. RANJITH; Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions; *fuel*; 107 (2013) 34–39.

HU MINGYU; ZHU XIAIMIN; LONG FUMEI. *Cement and concrete composites*. Volume 31(2009) 762-768.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION ICONTEC, agua para la elaboración de concreto. NTC 3459.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS Especificaciones y normas de construcción de carreteras I.N.V, 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.

J. TEMUJIN, R.P.WILLIAMS, A. VAN RIESSEN; Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature; *journal of materials processing technology*; 209 (2009) 5276–5280.

J.S. HONG; X.X. HUANG; J.K. GUO. *Materials letters*. volume 24 (1995) 327-331.

J.S.J. VAN DEVENTER; J.L. PROVIS; P. DUXSON; G.C. LUKEY. *Journal of hazardous materials*. Volume 139 (2007) 506-513.

JOSEPH DAVIDOVITS. Geopolymer chemistry and applications. Second Edition (2008).France. Pp: 19-31.

LEE W.K.W Y VAN DEVENTER. J.S.J. Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. langmuir 2003, 19. PP. 8726-8734.

LEI ZHENG ; WEI WANG; YUNCHUN SHI; TECHNICAL NOTE; The effects of alkaline dosage and Si/AL ratio on the immobilization of heavy metal sin municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer; chemosphere; 79 (2010) 665–671.

M.A.M. ARIFFIN, M.A.R. BHUTTA, M.W. HUSSIN, M. MOHD TAHIR, NOR AZIAH; Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete; construction and building materials; 43 (2013) 80–86.

M.C.M. NASVI ; P.G. RANJITH ; J. Sanjayan a numerical study of CO2 flow through geopolymer under down-hole stress conditions: application for CO2 sequestration wells ; journal of unconventional oil and gas resources; 7 (2014) 62–70

MÁRQUEZ HERRERA Alfredo. Crecimiento y caracterización de películas delgadas ferroeléctricas de $Ba_{1-x}SR_xTiO_3$ por la técnica de rf-sputtering. Instituto politécnico nacional. Centro de investigaciones en ciencia aplicada y tecnología avanzada, unidad altamira. Tesis para obtener el grado de maestro en tecnología avanzada. pp:22-25.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO Territorial. manual de inventario de fuentes puntuales. Colombia. pp: 17-19; 58-59.

MORTEROS DE CONSTRUCCION Y ORNAMENTACION [en línea] disponible en: <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>

MOSLIH AMER SALIH, ABANG ABDULLAH ABANG ALI, NIMA FARZADNIA; Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste; *construction and building materials*; 65 (2014) 592–603.

Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. [en línea] disponible en: <http://materiales.azc.uam.mx/tperea/114331/NTC-CONCRETO.pdf>

OMAR A. ABDULKAREEM , A.M. MUSTAFA AL BAKRI , H. KAMARUDIN , I. KHAIRUL NIZAR , ALA'EDDIN A. SAIF; Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete; *construction and building materials*; 50 (2014) 377–387.

PAVEL ROVNANIK; Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer; *construction and building materials*; 24 (2010) 1176–1183.

PEIGANG HE; DECHANG JIA; TIESONG LIN; MEIRONG WANG; YU ZHOU. *Ceramics international*. Volume 36 (2010) 1447-1453.

PIMIENTO RODRÍGUEZ Kelly Johana. Diseño y evaluación de un filtro de bentonita modificada para la captación de iones Ni^{2+} presentes en efluentes industriales. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Metalúrgica. Pp:1-90.

PRADIP NATH , Prabir kumar sarker; effect of ggbs on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition; construction and building materials; 66 (2014) 163–171.

PRAKASH R. VORAA, URMIL V. DAVEB; Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete; procedia engineering; 51 (2013) 210 – 219.

PRINYA Chindaprasirt; Ubolluk rattanasak.waste management. Volume 30 (2010).667-672.

RENAU-PIQUERAS Jaime & FAURA Magdalena. Principios básicos del microscopio electrónico de barrido. Sección de microscopía electrónica. Centro de investigación. Valencia. [en línea] disponible en: http://ruc.udc.es/bitstream/2183/9313/1/CC-011_art_5.pdf

ROBAYO NUÑEZ Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Pontificia Universidad Javeriana Departamento de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá. Pp: 22-30.

RODRÍGUEZ Erich, MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby, BERNAL Susan Y GORDILLO Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolin de elevada pureza. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009, pp: 595-600.

RODRÍGUEZ Erich, MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby, BERNAL Susan, GORDILLO Marisol. Efecto de los módulos $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 49 (2009) PP. 30-40.

RODRÍGUEZ Erich; MEJÍA DE GUTIÉRREZ Ruby; BERNAL Susan Y GORDILLO Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales 2009; PP: 595-600.

RODRÍGUEZ MARTÍNEZ Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante. Universidad Politécnica de Valencia. Dpto de Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil. 2009. PP: 1-85.

RODRÍGUEZ MARTÍNEZ Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante. Trabajo de investigación cst/mih-05. Universidad politécnica de valencia. Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil. (2009).pp:1-85.

ROYERO MONTEJO Claudia; PÉREZ MEDINA. Jenny. Síntesis y caracterización estructural de un geopolímero elaborado a partir de bentonita para ser usado como agente cementante alternativo al portland. Universidad Industrial de Santander Facultad de Ciencias, Escuela de Química 2012 p: 103.

RUEDA María Carolina; VEGA Karen. Determinación del carácter puzalónico de laterita níquelífera, pumita, diatomita y su efecto como aditivo en el cemento portland tipo I. Trabajo de grado (geología). Universidad Industrial De Santander.

S.K. NATH , SANJAY KUMAR; Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer; construction and building materials; 38 (2013) 924–930.

SAKONWAN HANJITSUWAN , SITCHAI HUNPRATUB , PRASIT THONGBAI , SANTI MAENSIRI C, VANCHAI SATA ,PRINYA CHINDAPRASIRT ; Effects of naoh concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste; cement & concrete composites; 45 (2014) 9–14.

SALMANG H. Los fundamentos físicos y químicos de la cerámica. Editorial reverté S.A. España. P: 17-74.

SAMUEL DEMIE , MUHD FADHIL NURUDDIN , NASIR SHAFIQ ; Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete; construction and building materials; 41 (2013) 91–98.

SANDOVAL CARREÑO Diana Carolina. Obtención y caracterización de un geopolímero sintetizado a partir de metacaolín utilizado para la generación de un concreto verde. Universidad Industrial de Santander. de Santander Facultad de Ciencias, Escuela de Química 2013 P: 147.

SANJAY KUMAR, RAKESH KUMAR; Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. Ceramics international 37 (2011) 533–541.

SANJAY KUMAR, Rakesh Kumar; Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer; science direct; 37 (2011) 533–541.

SERRANO MARTÍNEZ José Luis. Espectroscopia infrarroja 1-fundamentos. Curso: instrumentación y métodos de análisis químico. Posgrado en ingeniería del agua y del terreno. [en línea] disponible en: http://www.upct.es/~minaeees/espectroscopia_infrarroja.pdf

SHI Caijun; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ A.; PALOMO Angel. *Cement and concrete research*. Volume 41 (2011) 750-763.

SHIQIN YAN, KWESI SAGOE-CRENTSIL; Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications; *journal of environmental management*; 112 (2012) 27-32.

SMITH SONGPIRIYAKIJ A, TEINSAK KUBPRASIT B, CHAI JATURAPITAKKUL B, PRINYA CHINDAPRASIRT; Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer; *construction and building materials*; 24 (2010) 236–240.

SRAVANTHI PULIGILLA, PARAMITA MONDAL; Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer; *cement and concrete research*; 43 (2013) 70–80.

STÉPHANIE DELAIR; ÉLODIE PRUD'HOMME; CLAIRE PEYRATOUT; AGNÉS SMITH; PHILIPPE MICHAUD; LILIAN ELOY; EMMANUEL JOUSSEIN; SYLVIE ROSSIGNOL. *Corrosion Science*. Volume 59 (2012) 213-221.

TANAKORN PHOO-NGERNKHAM , PRINYA CHINDAPRASIRT , VANCHAI SATA , SAKONWAN HANJITSUWAN; SHIGEMITSU HATANAKA; The effect of adding NANO-SIO₂ and NANO-AL₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature; *materials and design*; 55 (2014) 58–65.

UCHINO T., SAKKA T., IWASAKI M . Interpretation of hydrated states of sodium silicate glasses by infrared and raman analysis, *J. AM. Ceram. SOC.* 1991, 74, PP306- 313.)

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Cátedra de ingeniería rural. españa [en línea] disponible en: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos.PDF

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESPAÑA. Tipos de cementos. [en línea] disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Tipos.CEMENTOS.pdf>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED). Métodos de análisis mineralógico Madrid, España. [en línea] disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Difracción de rayos x, introducción. [en línea] disponible en: http://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf

VÁZQUEZ MORENO Tomas. Contribución al estudio de las reacciones de hidratación del cemento portland por espectroscopia infrarroja iii. estudio por espectroscopia ir de los procesos de hidratación del cemento portland hasta una edad de 4 años. [en línea] disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1225/1354>

VILLAMIZAR SIERRA Martha Liliana. Adsorción de Cu^{2+} en solución acuosa mediante bentonita modificada. universidad industrial. facultad de ingeniería química. pp: 1-57.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO Mónica Alejandra; RODRÍGUEZ ERICH David; MEJÍA-DE GUTIÉRREZ Ruby. Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas. ingeniería investigación y tecnología, Volumen XVI (número 1), enero-marzo 2015: 113-122.

VILLARINO OTERO Alberto. Tema 5: el cemento. Escuela Técnica Superior de Ávila. Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Ciencia y Tecnología de materiales. P: 26. [en línea] disponible en: <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%205-%20EL%20CEMENTO.pdf>

YANG K.H., SONG J.K, ASHOUR A.F AND LEE E.T. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. *construction and building materials*. Vol 22. (2008). PP 1981-1989.

YAO JUN ZHANG , SHENG LI, YA CHAO WANG, DE LONG XU; Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature; *journal of non-crystalline solids*; 358 (2012) 620–624.

YAO JUN ZHANG; SHENG LI; YA CHAO WANG; DE LONG XU. *Journal of non-crystalline solids*. Volume 358 (2012) 620- 624.

YEPES GAVIRIA Olga Nallive BEDOYA MONTOYA Carlos Mauricio GÓMEZ EUSSE Juan David. Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. del bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de tierra con geopolímeros (BTG). Colombia (2012). P: 240-247.

YI HUANG, MINFANG HAN; The influence of Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products; *journal of hazardous materials*; 193 (2011) 90– 94.

YOUNG R. Introduction to the rietveld method. International union of crystallography. Oxford University. 1993. P: 21-22.

Yunsheng ZHANG; Wei SUN; Zongjin LI. *Applied clay science*. Volume 47 (2010) 271-275.

Z. OMEMAN, MONCEF NEHDI. El cemento de geopolímeros en el hormigón un nuevo conglomerante para el futuro. (2007) P: 4-19.

Z. ZUHUA; Y. XIAO; Z. HUAJUN; C. YUE. *Applied clay science*. Volume 43 (2009) 218-223.

ZENGQING Sun, HAO Cui, HAO An, DEJING Tao, YAN Xu, JIANPING Zhai, QIN Li ; Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic; *construction and building materials*; 49 (2013) 281–287.

ZHANG Zuhua; WANG Hao; PROVIS Jhon L.; BULLEN Frank; REID Andrew; ZHU Yingcan. *Thermochimica acta*. Volume 539 (2012) 23-33.

ZUHUA ZHANG, JOHN L. PROVIS, ANDREW REID, HAO WANG; Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction; *construction and building Materials*; 56 (2014) 113–127.

ANEXOS

Anexo A. Hipótesis y objetivos

HIPÓTESIS

Se obtendrán polímeros inorgánicos a dos temperaturas a base de dos arcillas y un residuo industrial que permitan mejorar la resistencia mecánica y química del Cemento Portland.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Sintetizar y caracterizar polímeros inorgánicos (geopolímeros), a partir de la activación alcalina a temperatura ambiente y $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ de un aluminosilicato presente en arcillas como la bentonita y la piedra pómez, y el clinker como residuo industrial.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtención de un geopolímero que permita sustituir al cemento portland en la producción del concreto.
- Emplear fuentes de aluminosilicatos presentes en residuos industriales y arcillas como materia prima en la síntesis de polímeros inorgánicos.

- Caracterizar estructuralmente el geopolímero sintetizado.
- Medir las propiedades mecánicas de los geopolímeros elaborados.
- Evaluar la durabilidad de los geopolímeros sintetizados en las mezclas de mortero a partir de la resistencia química.
- Elaborar un concreto que sea tecnológicamente viable y favorezca al medio ambiente, disminuyendo las emisiones de sustancias en estado gaseoso (CO_2 , NO_x , SO_x).

Anexo B. Problema

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El planeta está en proceso acelerado de calentamiento global, debido a la acumulación en la atmosfera de una serie de gases principalmente del CO₂, se estima que su contribución aproximadamente corresponde al 65 % del calentamiento global, siendo la industria cementera una de las responsables debido a que anualmente produce casi dos billones de toneladas/año y emite casi 2 billones de toneladas de CO₂ (o alrededor de 6 al 7% de las emisiones totales del planeta); a este ritmo, se estima que en 2025 las emisiones de CO₂ corresponderán a 3.50 billones de toneladas /año más o menos igual a las emisiones totales de Europa hoy en día (incluyendo las industrias de transporte y energía).⁸⁰⁻⁸²

Para contribuir al desarrollo sostenible, dicha industria ha asumido dos retos importantes en los últimos años:

- 1) Reducción de las emisiones de partículas y gases
- 2) Asumir los compromisos del protocolo de Kyoto, tratando de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el establecimiento de medidas en la etapa de procesamiento.

Estos retos han implicado diferentes estudios en este campo, los cuales se fundamentan en implementar nuevos materiales que mejoren las deficiencias del cemento portland como: la dificultad frente al ataque de sulfatos, baja resistencia a la corrosión de sus productos de hidratación que genera una disminución en su durabilidad, baja resistencia al fuego; además de la debilidad en la resistencia en

medios acuosos con pH moderadamente ácido y a elevadas concentraciones de sulfatos.⁴ Los materiales que se han utilizado en la elaboración del CP son los puzolánicos los cuales poseen la función de alterar la dureza del cemento. Esta investigación se encuentra enfocada a tres materiales en particular, dos de ellos arcillas y un residuo industrial, los cuales difieren en su composición y estructura molecular, siendo de bajo costo en comparación con otras puzolanas, de tal manera que si se pueden obtener valores apreciables de la resistencia a la compresión, es posible competir con un producto de menor costo y propiedades similares o mejores que el CP.

Anexo C. Justificación

El concreto es un material aglomerante, compuesto por una matriz cementicia y por un esqueleto granular; el primero se refiere a un aglomerante hidráulico, agua o cualquier adición activa o inerte; y el segundo a una serie de áridos de diferentes granulometrías. Este presenta propiedades de adherencia y cohesión, lo que le permite unir fragmentos minerales entre sí para formar un sólido compacto con resistencia y durabilidad.⁸³

El material cementante más utilizado debido a la versatilidad, disponibilidad y alta fiabilidad, es el cemento portland (CP) por sus propiedades de fraguar y endurecer en presencia de agua, siendo así indispensable en la edificación e ingeniería civil. Sin embargo, desde la adopción generalizada como “sostenibilidad”, este se enfrenta a dificultades por las grandes emisiones de gases generadas en su proceso de producción, que contribuyen a la contaminación mundial, aunque la intensidad de energía incorporada por unidad funcional sigue siendo más baja que la mayoría de otros materiales de construcción disponibles, razón por la cual es un elemento clave en la producción de concreto.

Sin embargo, se han implementado nuevos aditivos que le proporcionan propiedades específicas, estos corresponden a los polímeros inorgánicos (geopolímeros), en los que su materia prima son los aluminosilicatos abundantes en óxidos de silicio y aluminio que son activados por un agente oxidante. Entre las fuentes de aluminosilicatos se encuentran presentes las arcillas (bentonita y piedra pómez) y el residuo industrial (clinker), los cuales al ser disueltos en medio alcalino y con un aporte extra de silicio condensan formando los precursores geopoliméricos, generando así estructuras amorfas más complejas que le proporcionan propiedades mecánicas y durabilidad al material cementicio; además

de presentar excelente resistencia al fuego, baja densidad, bajo costo, buenas características termales y lo más importante son ambientalmente favorables, permitiendo así la disminución de sustancias en estado gaseoso (CO_2 , SO_x , NO_x) que en comparación presenta el CP debido a su proceso de clinkerización.⁸⁴

Destacándose la facilidad de obtención de estos nuevos materiales los cuales utilizan sustratos económicos que permiten producir geopolímeros con alta calidad, favoreciendo de esta manera al medio ambiente en dos aspectos:

- 1) En la reducción de la producción del cemento, lo que conduce a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; los geopolímeros podrían utilizarse en sustituciones al 100% de las arcillas y residuos industriales, mientras que el cemento solo utiliza hasta un 30% de los mismos.
- 2) Proporcionar una tecnología alternativa para el tratamiento de residuos y encapsulación de desechos tóxicos.⁶

Aparte de estas ventajas, estos materiales geopoliméricos, permiten que su proceso de fabricación en comparación con el cemento portland sea mejor, requiriendo menos energía, de manera que se obtiene un concreto verde con mejores propiedades que el cemento portland.⁸⁵

Anexo D. Estado del arte

En el desarrollo de la fabricación del cemento, diversos materiales han sido empleados, se han obtenido muchos productos y se han dado muchos nombres a los cementos resultantes, los cuales son distintivos en muchos casos del lugar de procedencia y otros de las marcas de fabricación.

Aunque no es posible establecer el descubrimiento de este material, parece ser que su primer uso fue después del fuego, al implementarse este por el hombre primitivo que al encenderlo en medio de piedras de yeso y caliza, las descarbonataba convirtiéndolas en polvo por la acción del calor que al humedecerse formaban trozos de piedra utilizados posteriormente en mampostería. Asimismo en el antiguo Egipto se utilizó un cemento como aglomerante entre los bloques de piedra conocido como yeso impuro cocido, que al mezclarse con agua e incorporarle arena, grava, ladrillo y piedra partida dio inicio al primer concreto.

Con el tiempo en diferentes épocas se le incorporaron al cemento toda clase de agregados, descubriéndose que ciertas rocas volcánicas tenían mayor resistencia y duración en aguas dulces como en saladas; de ahí que los griegos emplearon una toba volcánica de la Isla de Santorini. Los romanos usaron un material similar de coloración más oscura llamado puzolana encontrada alrededor de la bahía de Nápoles, la cual al mezclarse con cal y agua se endurecía, empleándose esta mezcla en el Panteón Romano, el Coliseo, la Basílica de Constantino y otras estructuras que podemos encontrar actualmente, las cuales han resistido a los agentes destructores del tiempo. Tal hecho causo curiosidad en los investigadores de la época, pero solo fue explicado hasta el siglo XVIII y los primeros del XIX, por Jhon Smeaton quien estableció que en el proceso de producción de un cemento

hidráulico, la arcilla debía estar contenida en la caliza o serle añadida para mejorar su consistencia.⁸⁶

Posteriormente, surgieron otros tipos de cementos, uno muy destacado fue el *Cemento Romano* hecho de caliza y puzolana, el *Cemento Natural* en el que la piedra no es apagada como es el caso de las cales sino simplemente molida, sin adición de mineral siendo similar en su composición a las cales hidráulicas naturales en diferente proporción, otro es el *Cemento Portland* actualmente utilizado, patentado por Joseph Aspdin, quien especifico lo siguiente para su fabricación: “Tomo una cantidad determinada de tierra arcillosa o arcilla que uno a la cal y ambas las mezclo con agua hasta ponerlas en un estado cercano al impalpable, ya sea a mano o a máquina. Después pongo la mezcla anterior en un recipiente para su evaporación, ya sea por el calor del sol o sometiéndola a la acción del fuego o del vapor metido en tubos debajo o junto al recipiente hasta que el agua este totalmente evaporada. Entonces divido la mezcla dicha, en trozos convenientes, y los calcino en un horno parecido a los de cal, hasta que el ácido carbónico esté totalmente expulsado. La mezcla así calcinada está dispuesta para ser molida, batida o triturada con un rodillo, hasta hacer un polvo fino y entonces está en el estado conveniente para hacer cemento o piedra artificial. Este polvo se tiene que mezclar con una cantidad suficiente de agua hasta darle la consistencia de mortero y éste se utiliza para los fines deseados”.

De acuerdo a los descubrimientos realizados, se llegó a la conclusión de que puede hacerse un cemento, notablemente superior a las cales hidráulicas, calentando la mezcla de cal y arcilla a una temperatura tal que prácticamente todo el producto quede clinkerizado, siendo este el paso revolucionario de la industria del cemento portland designándose como el material clinkerizado que se distingue de las diversas cales y cementos naturales.⁸⁷

El proceso de fabricación de este aglomerante, es una de las prácticas más influyentes en la contaminación del planeta, donde los principales contaminantes son: material particulado (PST y PM₁₀), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂)⁸⁸; razón por la cual han surgido diversos materiales, que permiten disminuir las emisiones de estos gases a la atmósfera, tal es el caso de los polímeros inorgánicos también llamados geopolímeros por Joseph Davidovits; los cuales son una nueva familia de materiales de cemento formados por la activación alcalina de precursores de aluminosilicatos presentes en diferentes arcillas como las cenizas volantes, utilizadas de manera rentable en muchos países europeos, en donde la utilización de esta materia prima sólida no requiera un importante aporte de energía ya que su calcinación implica una temperatura menor (700 °C) que la del cemento portland (1400-1500 °C).⁸⁹

Sin embargo, los minerales utilizados en la geopolimerización no fueron estudiados sino hasta 1998, por Xu y Van Deventer, quienes investigaron la estructura cristalina, densidad, dureza y composición química de los mismos, encontrando que varios aluminosilicatos se comportaban de manera diferente en esta reacción, en donde se destacó la alta reactividad presentada por la estilbita.

En dicha reacción, se utilizan fuentes de aluminosilicatos presentes en las arcillas, las cuales se destacan por sus propiedades fisicoquímicas de gran aplicación industrial, tales como el tamaño de partícula (inferior a 2 μm), su morfología laminar y las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar, además de su valor agregado en su área superficial que le permite la absorción de agua dando lugar al hinchamiento de las mismas propiedad que las hace muy atractiva para ser activadas alcalinamente y utilizarse como posibles materiales con aplicación cementante.⁹⁰

Anexo E. Difracción de Rayos X

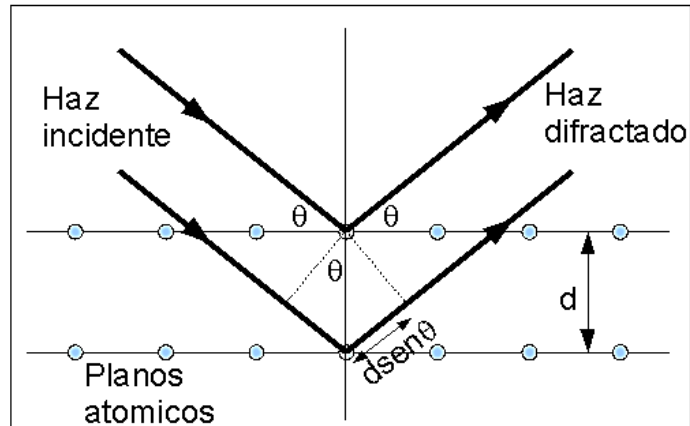
Es un método analítico no destructivo que puede ser utilizado para el estudio de compuestos químicos y biológicos en muestras sólidas, está permite identificar las fases cristalográficas y confirmar si las condiciones termodinámicas establecidas en cada caso fueron favorables para la obtención del producto.

Ademas de permitir analizar las propiedades estructurales de un material (tales como tamaño de grano, composición de las fases, orientación del cristal).Esta técnica se basa en la interferencia generada por un cristal en un haz de rayos X. Al ser la muestra irradiada por los rayos X, estos se difractan con ángulos que dependen de las distancias entre los planos cristalinos de acuerdo a la ley de Bragg.

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$$

Donde es n un número entero, λ es la longitud de onda de rayos X, d es la distancia entre el plano interplanar del cristal y θ es el ángulo de difracción, como se evidencia en la figura #. Donde para cada muestra al variar el ángulo de incidencia de los rayos X se genera un patrón de difracción diferente.⁹¹

Figura 38. Ley de Bragg



Fuente: VILLARINO OTERO Alberto. Tema 5: el cemento. Escuela Técnica Superior de Ávila. Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Ciencia y Tecnología de materiales. P: 26. [en línea] disponible en: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%205-%20EL%20CEMENTO.pdf>

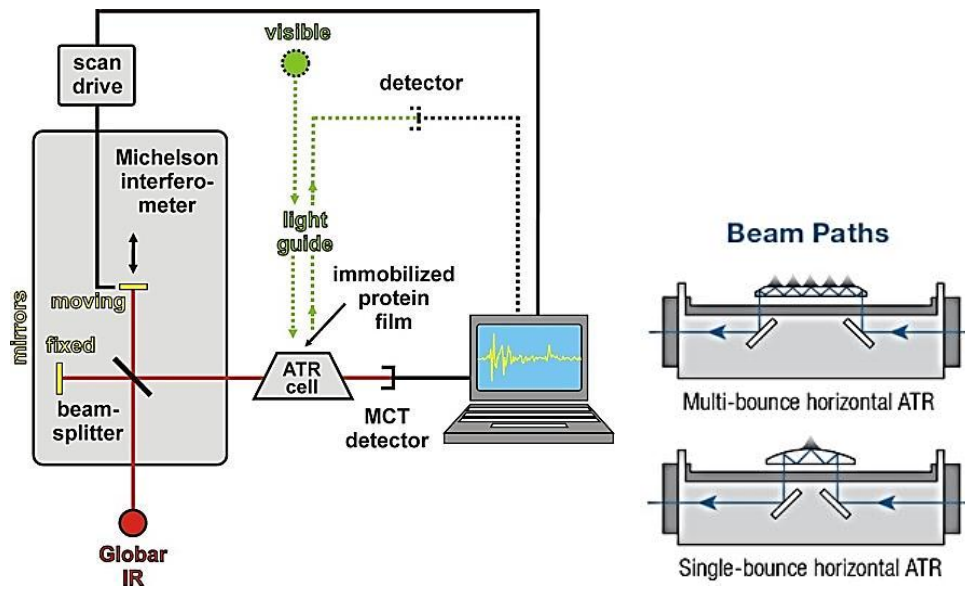
Anexo F. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (ATR)

La Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier de Reflectancia Atenuada (ATR), es un método analítico que permite la obtención de espectros de IR de muestras con alguna dificultad como sólidos de limitada solubilidad, películas, polímeros, polvos entre otros. Se caracteriza por ser una reflexión producida por paso de la radiación de un medio más denso a uno menos denso.

Esta tiene en cuenta el fenómeno de reflexión total, que se produce cuando el ángulo de incidencia de un haz de radiación infrarroja sobre la interfase formada entre el cristal y la muestra es mayor que el ángulo crítico (este ángulo es función de los índices de refracción de ambos medios según la ley de Snell).

De manera, que los cristales empleados en ATR son fabricados con materiales que poseen un alto índice de refracción como el ZnSe, Ge y KRS-5 (2.4, 4 y 2.4 respectivamente) y además presentan baja solubilidad en agua. Cuando la muestra, que debe encontrarse en contacto directo con la superficie reflectante, absorbe la energía correspondiente a una determinada longitud de onda, el haz reflejado pierde la energía correspondiente a esa longitud de onda. El análisis de ese haz reflejado da lugar al espectro de absorción característico de la muestra.⁹²

Figura 39. Funcionamiento de un FTIR con celda ATR

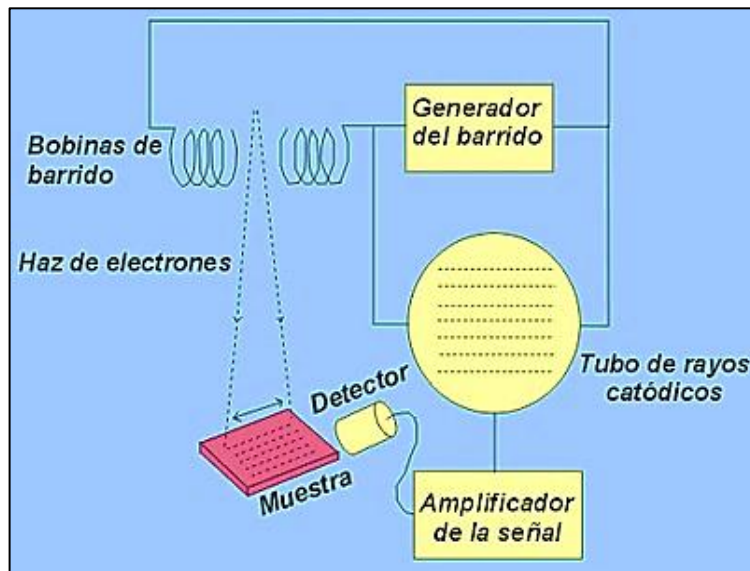


Fuente: DEMIE Samuel, NURUDDIN Muhd Fadhil, SHAFIQ Nasir; Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete; construction and building materials; 41 (2013) 91–98.

Anexo G. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Esta microscopia utiliza un haz de electrones para formar una imagen de alta resolución, permitiendo un buen enfoque de la muestra. En el microscopio electrónico de barrido la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. Posteriormente un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones.⁹³

Figura 40. Funcionamiento de un equipo de microscopía electrónica de barrido.



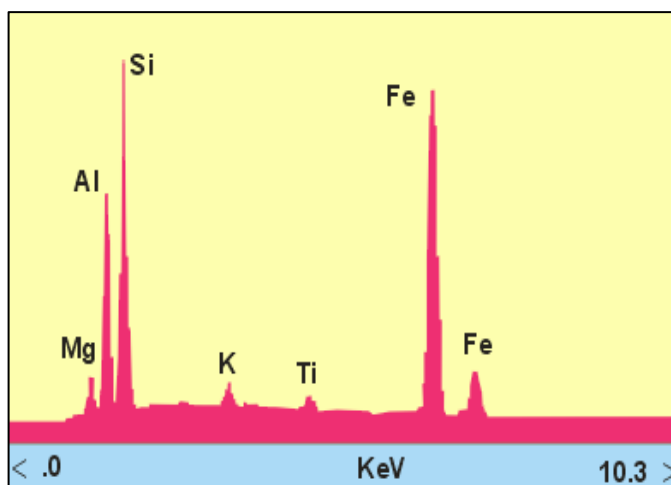
Fuente: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Difracción de rayos x, introducción. [en línea] disponible en: http://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf

Anexo H. Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X

Como la energía dispersada de los Rayos X es característica de cada elemento químico, esta proporciona información analítica cualitativa y cuantitativa de puntos, líneas o áreas seleccionadas en la superficie de la muestra. Esta técnica se conoce como Microanálisis por EDS.

El espectro de radiación X emitido por un mineral en el proceso puede ser utilizado para hacer un microanálisis químico semicuantitativo mediante. Los electrones incidentes excitan los átomos de la muestra y provocan la emisión de rayos X cuya longitud de onda (λ) es característica de los elementos presentes en la muestra y cuya intensidad para una determinada longitud de onda es proporcional a la concentración relativa del elemento a esa longitud de onda.

Figura 41. Ejemplo espectro de energía dispersiva de un material fuente



Fuente: SERRANO MARTÍNEZ José Luis. Espectroscopía infrarroja 1- fundamentos. curso: instrumentación y métodos de análisis químico. posgrado en

ingeniería del agua y del terreno. [en línea] disponible en:
http://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf

Normalmente se obtiene un análisis cualitativo de los constituyentes mayoritarios y minoritarios de pequeñas áreas (1mm). Sin embargo, en muestras planas y bien pulidas es posible hacer análisis cuantitativos al comparar la intensidad de los rayos X a cualquier /con la producida en una muestra estándar (patrón) de composición conocida. La precisión de un análisis cuantitativo normalmente es mayor del $\pm 2\%$ y los límites de detección están alrededor de las 100 ppm en análisis rutinarios, llegando a ser de 10 ppm en circunstancias excepcionales. Es preciso hacer una corrección (ZAF) en función de tres factores: número atómico (Z), absorción (A) y fluorescencia (F) antes de extraer los resultados cuantitativos.⁹⁴⁻⁹⁵

Anexo I. Trituración y molienda de la PP

El primer parámetro a tener en cuenta, fue el tamaño de partícula, el cual es de 125 μm (Tamiz No. 120), las materias primas BT y CL se encontraban con dicho tamaño, pero la PP fue necesario utilizar la trituradora y el molino de bolas para obtener el tamaño de partícula requerido.⁹⁵⁻⁹⁸

Figura 42. Molino de bolas y tamices (No. 40, 50, 60, 70, 80, 120 y recolector), ubicados en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.



Las condiciones de trabajo para la molienda de la piedra pómez en el molino de bolas, se encuentran tabuladas a continuación:

❖ Parámetros de trituración

Tabla 25. Condiciones de trabajo en el molino de bolas

Tiempo de molienda	2 horas
Tipo de material	Arcilla (piedra pómez)
Peso del material (por cada trituración y molienda)	500 ± 4 g
Velocidad del molino de bolas	0,66 rps
No. Bolas grandes	38
No. Bolas medianas	50
No. Bolas pequeñas	52

Fue necesario recubrir las bolas con sílice (arena) y purgar el molino de bolas con la piedra pómez para así realizar la trituración y molienda de la misma. La muestra triturada y molida fue dividida en dos para tamizarla por un tiempo de 15 minutos, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 26. Datos obtenidos en la molienda por un tiempo de 2 horas.

No. Tamiz	Peso del Tamiz (g)	Peso muestra a moler PP (g)	Peso del tamiz + PP(g) molida	Peso muestra PP recolectada (g)
40	394,60	13,8	407,8	13,2
50	388,49	7,09	391,42	2,93
60	427,50	150,14	618,47	190,97
70	380,93	4,68	384,28	3,35
80	398,85	6,33	401,81	2,96
120	395,60	27,4	408,68	13,08
Recolector	393,20	25,8	416,10	22,9

Debido a que la cantidad obtenida de la piedra pómez en el recolector del tamiz No. 120 fue muy pequeña (valores en negrilla), fue necesario dejar más tiempo en

la molienda y trituración por parte del molino de bolas, pasando de 2 horas a 4 horas, manteniendo el resto de los parámetros indicados en la tabla 32, obteniéndose:

Tabla 27. Datos obtenidos en la molienda por un tiempo de 4 horas.

No. Tamiz	Peso del Tamiz (g)	Peso muestra a moler PP (g)	Peso del tamiz + PP(g) molida	Peso muestra PP recolectada (g)
40	395,60	406,91	425,47	29,87
50	388,60	398,44	401,29	12,69
60	427,30	531,72	543,83	116,53
70	380,95	390,51	384,93	3,98
80	397,98	409,30	419,20	21,22
120	395,67	456,07	419,36	23,69
Recolector	394,31	442,36	431,43	37,12

Como se puede observar la cantidad en peso de la piedra pómez obtenida en el recolector del tamiz No. 120 aumento, pero sigue siendo muy poca cantidad con la de partida, de manera que se aumenta el tiempo de trituración y molienda a 6 horas, obteniéndose:

Tabla 28. Datos obtenidos en la molienda por un tiempo de 6 horas.

No. Tamiz	Peso del Tamiz (g)	Peso muestra a moler PP (g)	Peso del tamiz + PP(g) molida	Peso muestra PP recolectada (g)
40	395,64	25,74	413,51	17,87
50	388,63	8,73	398,89	10,26
60	427,20	99,31	533,64	106,44
70	380,85	8,58	385,34	4,49
80	398,01	22,03	421,87	23,86
120	395,45	20,80	417,07	21,62
Recolector	394,35	65,31	459,31	64,96

Nota: En cada una de las tablas anteriores (No. 2-5), se mencionan dos divisiones de la muestra de partida (500 ± 4 g) para que el tamizado fuera más efectivo.

Como se evidencio en las tablas 32 y 33, es posible obtener mayor cantidad de la piedra pómez en el recolector del tamiz No. 120, en donde la variable tiempo es fundamental en la trituración y molienda de este material; el rendimiento en este proceso fue del 94-96% en cada tiempo empleado (2,4 o 6 horas), lo cual indica que la perdida de muestra del molino de bolas a los tamices es muy pequeña. Finalmente la cantidad obtenida de piedra pómez con un tamaño de partícula de $125 \mu\text{m}$ fue de 2 Kg, de igual forma se utilizó la misma cantidad de BT y CL para para la síntesis de los PI.

Anexo J. Resistencia Química ICONTEC 489

En este anexo, se muestra la variación en la masa de las muestras antes de iniciar el ensayo de la resistencia química al ácido y después de efectuarlo además del porcentaje de pérdida de los mismos, de acuerdo a la norma ICONTEC 489. ³

Tabla 29. Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado del BT 10%.

Días de Curado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Pérdida de Masa
1	241,82	162,109	32,97
7	243,18	167,24	31,23
14	259,03	93,61	63,86
28	246,51	194,82	20,97
56	264,82	170,28	35,70
84	254,39	240,32	5,53

Tabla 30. Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado del CL 10%.

Días de Curado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Pérdida de Masa
1	267,98	136,91	48,91
7	258,29	125,45	51,43
14	262,91	127,82	51,38
28	254,92	104,96	58,83
56	250,02	121,46	48,58
84	256,84	130,47	50,80


Tabla 31. Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado del PP 10%.

Días de Curado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Pérdida de Masa
1	270,25	268,97	0,47
7	238,45	237,25	0,5
14	262,76	260,09	1,01
28	255,11	250,41	1,84
56	255,69	245,10	4,14
84	260,38	240,10	7,79

Tabla 32. Pérdida de masa de acuerdo a los días de curado del CP.

Días de Curado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% Pérdida de Masa
1	261,02	243,64	6,66
7	257,35	241,92	6
14	268,24	248,89	7,21
28	255,65	253,72	0,75
56	264,76	247,32	6,58
84	249,92	239,21	4,28

Anexo K. Certificados del XIV Seminario Latinoamericano de Análisis por Técnicas de Rayos X

 SARX2014


XIV SEMINARIO LATINOAMERICANO DE ANÁLISIS POR TÉCNICAS DE RAYOS X

POR MEDIO DEL PRESENTE DEJAMOS CONSTANCIA QUE EL TRABAJO:

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE NUEVOS POLÍMEROS
INORGANICOS CON APLICACIÓN CEMENTANTE**

A. K. GONZÁLEZ CÁRDENAS, A. M. MONTAÑO, C. GONZÁLEZ CUERVO, C. RIOS

HA SIDO EXPUESTO COMO: PRESENTACIÓN MURAL EN EL XIV SEMINARIO LATINOAMERICANO DE ANÁLISIS POR TÉCNICAS DE RAYOS X, LLEVADO A CABO ENTRE LOS DÍAS 3 Y 7 DE NOVIEMBRE DE 2014 EN LA CIUDAD DE VILLA CARLOS PAZ, CÓRDOBA, ARGENTINA.


GERMÁN TIRAO
CHAIRMAN SARX2014



 SARX2014

XIV SEMINARIO LATINOAMERICANO DE ANÁLISIS POR TÉCNICAS DE RAYOS X

POR CUANTO:

ANDREA KATHERINE GONZÁLEZ CÁRDENAS

HA ASISTIDO AL XIV SEMINARIO LATINOAMERICANO DE ANÁLISIS POR TÉCNICAS DE RAYOS X, LLEVADO A CABO ENTRE LOS DÍAS 3 Y 7 DE NOVIEMBRE DE 2014 EN LA CIUDAD DE VILLA CARLOS PAZ, CÓRDOBA, ARGENTINA.

EXTENDEMOS EL PRESENTE CERTIFICADO PARA SER PRESENTADO ANTE LAS AUTORIDADES QUE ASÍ LO REQUIERAN.

VILLA CARLOS PAZ, CÓRDOBA, 7 DE NOVIEMBRE DE 2014


GERMÁN TIRAO
CHAIRMAN SARX2014



Anexo L. Certificados del Congreso Internacional de ingeniería Mecánica y Ciencias de la Agricultura.

INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING AND AGRICULTURAL SCIENCES CONGRESS CIIMCA 2013

Universidad Pontificia Bolivariana
SECCIONAL BUCABARANGA
MECHANICAL ENGINEERING FACULTY

Renewable Energy Actuality: Materials and Applications
This is to certify that the paper:

ANDREA KATHERINE GONZALEZ CARDENAS

Attended

The INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING AND AGRICULTURAL SCIENCES CONGRESS held from 9th to 11th October of the 2013 at Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) in Floridablanca - Colombia

Floridablanca - Santander October 11, 2013


Emil Hernández Arroyo, M.Sc.
Chairman CIIMCA 2013


Adujey Remolín Millán, Ph.D.
Chairman CIIMCA 2013



INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING AND AGRICULTURAL SCIENCES CONGRESS CIIMCA 2013

Universidad Pontificia Bolivariana
SECCIONAL BUCABARANGA
MECHANICAL ENGINEERING FACULTY

Renewable Energy Actuality: Materials and Applications
This is to certify that the paper:

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF INORGANIC POLYMERS FROM ALKALINE ACTIVATION OF AN ALUMINOSILICATE.

Was presented by:

ANDREA GONZALEZ CARDENAS

In the INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING AND AGRICULTURAL SCIENCES CONGRESS held from 9th to 11th October of the 2013 at Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) in Floridablanca - Colombia

Floridablanca - Santander October 11, 2013


Emil Hernández Arroyo, M.Sc.
Chairman CIIMCA 2013


Adujey Remolín Millán, Ph.D.
Chairman CIIMCA 2013

