

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A
PARTIR DE MULLITA UTILIZADO COMO ADITIVO PARA LA GENERACIÓN
DE UN CONCRETO VERDE**

LEONARDO ALFONSO NAVARRO CAMARGO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAM ANGA
2013**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A
PARTIR DE MULLITA UTILIZADO COMO ADITIVO PARA LA GENERACIÓN
DE UN CONCRETO VERDE**

LEONARDO ALFONSO NAVARRO CAMARGO

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

Directores:

ÀNGELA MARCELA MONTAÑO, Lic. En Química, Ph. D. y M. Sc.

CLAUDIA GONZÁLEZ CUERVO, Lic. En Física y Matemáticas, Ph. D. y M. Sc.

Codirector:

JOSÉ CARLOS GUTIERREZ GALLEGO, Químico, M. Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAM ANGA**

2013

*Dedicatoria: A Mis Papás Luz Marina y Miguel Antonio, a quienes amo con todo
mi corazón,
y siempre estuvieron dándome fuerzas para terminar esta etapa de mi vida,
a mis hermanos Juan Miguel y Jesús Andrés
Y mi hermosa novia Dianita.*

Leonardo Alfonso Navarro Camargo

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A las Doctoras, Ángela Marcela Montaña y Claudia Gonzales Cuervo, por la Dirección de este proyecto.

Al profesor José Carlos Gutiérrez Gallego, por todo su gran aporte en la realización de este proyecto y por compartirme de su gran sabiduría, orientación y sus enseñanzas, no solo para este proyecto, sino también para la vida.

A mis padres y hermanos, por su amor, paciencia, y por brindarme todo lo necesario para alcanzar mis metas.

A mi hermosa novia, gran compañera y excelente colega Dianita, por su amor, cariño y por tener siempre las perfectas palabras de apoyo y compañía.

A todos mis amigos del laboratorio, en especial a las eminencias Jorge, Luis Ernesto, Víctor especialmente a mi hermano Carlos por su compañía en todos estos años de mi vida.

Al Laboratorio de Química Industrial de La Universidad Industrial de Santander, por todos los recursos y espacios brindados durante el proyecto.

Al Grupo de Investigación en Corrosión GIC y a Laura Quiroz por todos los recursos, tiempo y espacios brindados para la realización de este proyecto.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de este proyecto.

Leonardo Alfonso Navarro Camargo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. ANÁLISIS DE LA LITERATURA	21
1.1. ESTADO DEL ARTE	21
1.2. MARCO TEORICO	25
1.2.1. Geopolímeros.	25
1.2.2. Caolinitas.	30
1.2.3. Metacaolinita.	32
1.2.4. Mullita	33
1.2.6. Cemento Portland.	36
1.2.7 Concreto.	38
1.2.8 Corrosión del concreto armado	39
1.2.9 Técnicas de caracterización	42
1.2.9.1 Difracción de Rayos X	42
1.2.9.2 Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR-ATR):	43
1.2.10 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS):	44
1.2.11 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR):	49
1.2.12 Ensayo de Resistencia a la compresión	50
1.2.13 Método gravimétrico para determinar la velocidad de corrosión	51
2. METODOLOGÍA	52
2.1 OBTENCION DEL MINERAL MULLITA	53
2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	54
2.2.1. FTIR-ATR Espectroscopia Infrarroja de transformada de Fourier por la técnica ATR	54
2.2.2 Difracción de Rayos x.	54
2.3 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO A PARTIR DE MULLITA	56

2.3.1 Activación alcalina a la mullita y su posterior polimerización.	56
2.3.2 Secado de los geopolímeros.	58
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOPOLÍMEROS	58
2.4.1 Espectroscopia Infrarroja	58
2.4.2 Difracción de Rayos X.	58
2.5. CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO	59
2.5.1. Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.	59
2.5.2. Análisis de Difracción De Rayos X	60
2.6 ELABORACIÓN DE PROBETAS	60
2.6.1 Diseño de la mezcla.	60
2.6.3 Fraguado	62
2.7 ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS CONCRETOS	64
2.7.1 Mecánicas.	64
2.7.2 Eléctricas.	65
2.7.3 Químicas.	67
3. RESULTADOS Y ANALISIS	70
3.1 OBTENCIÓN DE MULLITA Y GEOPOLIMERO	70
3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	70
3.2.1 FTIR-ATR Espectroscopia Infrarroja de transformada de Fourier por la técnica ATR	70
3.2.2 Difracción de Rayos x.	75
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOPOLIMEROS	78
3.3.1 Espectroscopia Infrarroja	78
3.3.2 Difracción de Rayos X.	79
3.4 ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS CONCRETOS	80
3.4.1 Mecánicas	80
3.4.2 Electroquímicas.	82
3.4.3 Químicas.	90

4. CONCLUSIONES	92
5. RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFIA	104
ANEXOS	113

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición general del cemento portland.	37
Tabla 2. Composición del cemento portland tipo I.	37
Tabla 3. Parámetros de medición de difracción de rayos x para muestras de partida.	56
Tabla 4. Componentes mezcla de concreto para probetas con diferentes fines.	63
Tabla 5. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del caolín.	75
Tabla 6. Reflexiones principales encontradas en el perfil de Difracción de la mullita.	77
Tabla 7. Reflexiones principales encontradas para el difractograma del geopolímero.	79
Tabla 8. Resultados a las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión.	80
Tabla 9. Valores de los diferentes componentes de los circuitos de Randles sencillos equivalentes para cada día de cada probeta.	88
Tabla 10. Ataque químico al concreto.	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Microestructura de un geopolímero Na poli(sialato-siloxo) preparado a partir de metacaolín observada por un Microscopio electrónico de Transmisión.	26
Figura 2. Estructura de un Na Poli(Sialato siloxo) Hidratado	27
Figura 3. Caolín comercial marca Faraón utilizado como fuente del mineral caolinita.	30
Figura 4. Representación estructural de la caolinita	31
Figura 5. Estructura Tridimensional de la caolinita. Si=Azul; Al=Verde; O=Rojo; OH=Marrón; $Al_2Si_2O_5$.	32
Figura 6. Estructura tridimensional Mullita (izq); cristales de mullita bajo el microscopio (der).	34
Figura 7. Comparación entre la estructura de la Silimanita y la Mullita ambas presentan morfología acicular.	35
Figura 8. Representación de la corrosión de una varilla embebida en concreto.	40
Figura 9. Aproximación a los elementos eléctricos de los componentes de una interfase electrificada que presenta fenómeno de corrosión. La zona compacta tiene similitud con un capacitor (Cdl); el electrolito o zona difusa. a una resistencia al paso de corriente (R_s), la resistencia característica de un metal a la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}).	46
Figura 10. Grafico de Nyquist generado por circuito equivalente R II C	47
Figura 11. Grafico de Nyquist correspondiente al Circuito equivalente de Randles.	48
Figura 12. Metodología propuesta para el desarrollo de la tesis de grado.	52
Figura 13. Conversión térmica de caolín a mullita en un horno TERIGENO. Laboratorio de Química Industrial UIS.	53
Figura 14. Espectroscopio Bruker Tensor 27 y módulo ATR Platinun. Laboratorio de Química Industrial UIS.	54

Figura 15. Tamiz utilizado para preparación de muestras de caolín y mullita en DRX. Laboratorio de Química Industrial UIS.	55
Figura 16. Difractómetro marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci.	55
Figura 17. Preparación de la mezcla homogénea para la geopolimerización.	57
Figura 18. Agitación constante en el proceso de geopolimerización.	57
Figura 19. (Izq) Geopolímero sintetizado endurecido y seco; (Der) geopolímero triturado y pulverizado.	58
Figura 20. Preparación de muestra para difracción de rayos x muestra de geopolímero..	59
Figura 21. Bulto de cemento portland tipo I marca Diamante utilizado en la elaboración de las probetas de concreto.	60
Figura 22. Autor elaborando las probetas de concreto.	61
Figura 23. Elaboración de probetas para fines de análisis Mecánico.	62
Figura 24. Elaboración de probetas 3cm de diámetro, para fines de análisis electroquímico.	63
Figura 25. Autor realizando ensayos de resistencia mecánica a la compresión.	64
Figura 26. Equipo Potenciostato-Galvanostato ACM Instruments usado para medir impedancias. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.	65
Figura 27. Montaje utilizado para la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.	66
Figura 28. Probetas sumergidas en solución de cloruro de sodio y saturada de oxígeno. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.	67
Figura 29. Trozos de probetas sumergidas en distintas soluciones corrosivas.	68
Figura 30. Muestras de Trozos de probetas secándose en el horno a 100°C. Laboratorio de Química Industrial UIS.	69
Figura 31. Espectro FTIR del caolín encontrado en la revisión bibliográfica.	71
Fuente:	71
Figura 32. Espectro FTIR-ATR obtenido de la muestra de caolín comercial.	72

Figura 33. Espectro FTIR-ATR obtenido de la mullita generada a partir del tratamiento térmico del caolín comercial.	73
Figura 34. Espectro FTIR de la mullita que se encuentra reportado en la literatura.	74
Figura 35. Espectro FTIR del cuarzo que se encuentra reportado en la literatura.	74
Figura 36. Difractograma obtenido de la muestra del caolín comercial.	76
Figura 37. Difractograma obtenido de la mullita que fue generada a partir del tratamiento térmico del caolín comercial.	77
Figura 38. Espectro FTIR-ATR obtenido del Geopolímero generado a partir del mineral mullita.	78
Figura 39. Difractograma obtenido del Geopolímero generado a partir del mineral mullita.	79
Figura 40. Comparación de los valores obtenidos de resistencia a la compresibilidad en Kgf/cm^2 de las diferentes probetas de concreto.	82
Figura 41. Diagramas de Nyquist de los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 para la probeta de 0% de geopolímero.	85
Figura 42. Diagramas de Nyquist de los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11, de la probeta de 10% de reemplazo de cemento por geopolímero.	85
Figura 43. Diagramas de Nyquist para los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 de la probeta de 20 % Geopolímero.	86
Figura 44. Diagramas de Nyquist para los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 de la probeta de 30 % Geopolímero.	86
Figura 45. Diagramas de Nyquist para los días 2, 3, 4 y 8 de la probeta de 10%.	87
Figura 46. Diagramas de Nyquist para los días 2, 3, 4 y 8 de la probeta blanco 0% de geopolímero.	87
Figura 47. Circuito equivalente de Randles.	88
Figura 48. Representación gráfica de los valores de corriente de corrosión encontrados para todas las probetas de concreto.	89
Figura 49. Porcentajes de pérdida de peso por ataques químicos realizada a los diferentes concretos fabricados.	90

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Espectro IR del cemento	113
Anexo B: Difractograma del cemento	114
Anexo C: Tabla de los minerales encontrados en el cemento	115
Anexo D: Diagramas de Niquist probeta 10% 28	116
Anexo E: Diagramas de Niquist probeta 20% 28	119
Anexo F: Diagramas de Niquist probeta 30% 28	122
Anexo G: Diagramas de Niquist probeta 0% 28 (Cemento)	125

RESUMEN

TITULO: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A PARTIR DE MULLITA UTILIZADO COMO ADITIVO PARA LA GENERACIÓN DE UN CONCRETO VERDE.

AUTOR: LEONARDO ALFONSO NAVARRO CAMARGO**

PALABRAS CLAVE: Geopolímero, caolín, mullita, cemento, concreto, geopolimerización, corrosión, FTIR-ATR, DRX, Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.

Con la realización del presente trabajo se logró la obtención y caracterización de un geopolímero que fue sintetizado a partir de mullita, posteriormente fue utilizado como aditivo para la generación de un concreto resistente a la compresión, con el cual se disminuyó considerablemente la emisión de CO₂ durante su preparación.

La elaboración del geopolímero se inició con la obtención del mineral mullita mediante el tratamiento térmico de la caolinita que fue llevada a una razón de 10°C/minuto hasta llegar a 1300°C y completar 6 horas, la mullita enfriada fue mezclada con una solución activadora de hidróxido de sodio, silicato de sodio, arena y óxido de aluminio, produciéndose la reacción de geopolimerización, esta se llevó a cabo a presión atmosférica y 80°C, después del endurecimiento el material geopolimérico se calentó a 120 °C durante 24 horas, para eliminar exceso de agua.

Se estudiaron los efectos del material geopolimérico de mullita cuando es usado como agente cementante en el proceso de elaboración de concretos, mediante la realización de pruebas mecánicas de resistencia a la compresión, pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica para conocer el comportamiento frente a la corrosión del acero en concretos armados y pruebas de resistencia a ataques químicos.

Se encontró que se pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto, reemplazando un 10% del cemento portland tipo I en la mezcla por geopolímero de mullita, a su vez reduciendo los impactos ambientales nocivos que se generan mediante el proceso de fabricación del cemento portland en la industria. El comportamiento frente a los ataques químicos de los concreto hechos con geopolímero es similar al de los concreto hechos con cemento portland tipo I. El comportamiento electroquímico de la matriz acero-concreto para hormigones armados a base del geopolímero es que son de menor resistencia frente al fenómeno de la corrosión.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Directores: Lic. en Química, Ph. D. y M. Sc. Ángela Marcela Montañó; Lic. en Física y Matemáticas, Ph. D. y M. Sc. Claudia González Cuervo; Codirector: Químico, M. Sc. José Carlos Gutiérrez Gallego.

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING AND CHARACTERIZATION OF A GEOPOLYMER SYNTHESIZED FROM MULLITE USED AS ADDITIVE IN THE GENERATION OF GREEN CONCRETE.*

AUTHOR: ALFONSO NAVARRO LEONARDO CAMARGO**

KEYWORDS: Geopolymer, kaolin, mullite, cement, concrete, geopolymerization, corrosion, FTIR-ATR, XRD, electrochemical impedance spectroscopy.

With the completion of this work it was the preparation and characterization of a geopolymer was synthesized from mullite, was subsequently used as an additive to the generation of a resistant concrete compression, which significantly reduced the CO₂ emissions during preparation.

Preparing the geopolymer was started by obtaining the mineral mullite by thermal treatment of the kaolinite was taken to a rate of 10 ° C / minute up to 1300 ° C and complete 6 hours. The cooled mullite was mixed with a activating sodium hydroxide solution, sodium silicate, sand and aluminum oxide, the reaction occurring geopolymerization, this was carried out at atmospheric pressure and 80 ° C, after hardening the geopolymeric material was heated at 120 ° C for 24 hours to remove excess water.

The effects mullite geopolymer material when used as a cementing agent in the preparation of concrete by mechanical testing of compressive strength tests, electrochemical impedance spectroscopy to determine the corrosion behavior of armed concrete and steel test chemical resistance.

Can be found to improve the mechanical properties of the concrete, replacing 10% of type I portland cement in the mix for mullite geopolymer turn reducing harmful environmental impacts that are generated by the manufacturing process in Portland cement industry. The performance against chemical attack of concrete made with geopolymer is similar to concrete made with Portland cement type I. The electrochemical behavior of the steel-concrete matrix reinforced concretes based on the geopolymer is that they are of lower resistance to corrosion phenomena.

* Graduation project

** Science Faculty, School of Chemistry, Directors: L. Chemistry, Ph. D. and M. Sc. Angela Marcela Montaña; L. Physics and Mathematics, Ph. D. and M. Sc. Claudia González Cuervo. Co-Director: Chemist, M. Sc. José Carlos Gutiérrez Gallego.

INTRODUCCIÓN

En el mundo uno de los sectores de mayor crecimiento es el de la construcción, lo que lleva al incremento en el consumo de materiales, de los cuales el más importante es el cemento. Durante el año 2012, en Colombia la producción de cemento registró un crecimiento de 13,4% con relación al año anterior. Durante este período se despacharon 10,155 millones de toneladas al mercado nacional. Paralelamente emisiones significativas de CO₂ se atribuyen a la producción de este material. [1]

La industria cementera tiene una influencia antropogénica sobre el clima, contribuyendo al aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmosfera, debido a la liberación de CO₂ que ocurre en el proceso de preparación. La reacción química que da origen al clinker de cemento libera CO₂ cuando el carbonato de calcio de la piedra caliza se transforma en dióxido de carbono y cal. También hay liberación de CO₂ en la quema de combustibles fósiles en los hornos de clinker para obtener las temperaturas necesarias para dicha transformación. [2]

En el proceso de fabricación del cemento, la etapa de calentamiento de la caliza tiene un factor de emisión de 0,57 toneladas de CO₂ a la atmosfera por cada tonelada de clinker producido, también se estima que se generan 0,39 toneladas a causa de la combustión de los hornos para la generación del Clinker junto con el uso de los combustibles utilizados en la generación de la electricidad de la planta, dando un total de 0,96 toneladas de CO₂ liberado a la atmosfera por tonelada de cemento portland producido. [3]

Teniendo en cuenta que en el mundo se producen más de 2800 millones de toneladas anuales de cemento, siendo China el principal productor con 1390 millones de toneladas, seguido de la India con 177 millones de toneladas y otros países como Colombia que produjo en el año 2011 la cantidad de 10,8 millones de toneladas de cemento según el sistema de información minero colombiano SIMCO. Todo esto equivale a una generación antropogénica por parte de la industria mundial del cemento de alrededor de 2700 millones de toneladas de dióxido de carbono por año que son liberadas a la atmósfera y que equivalen al 5% de las emisiones de CO₂ originadas por el hombre. [3][8][9]

Esta emisión de CO₂ en el aire es uno de los principales problemas de contaminación a nivel mundial, ya que aumenta significativamente la concentración de CO₂ en la atmósfera. En los últimos tiempos la concentración ha aumentado de 280ppm de épocas no industrializadas hasta superar valores de 390 ppm. [10]

Se estima que el aumento de las concentraciones de CO₂, junto con el de otros gases de efecto invernadero, como el metano, el óxido nitroso y el agua, son causantes del aumento en la temperatura media global, que en los últimos 100 años ha aumentado 0,7°C; cambio que se vio principalmente desde 1975 con un aumento de 0,15°C por década. Se estima que la temperatura media mundial aumentara de 2 a 3°C en este siglo, lo que llevará a grandes problemas para el medio ambiente y todos los ecosistemas. [11]

Además de las grandes emisiones de CO₂, existen otros impactos ambientales que se generan durante la fabricación del cemento, como la emisión de material particulado a la atmósfera durante procesos de molienda, transporte y almacenamiento, emisión de otros gases de combustión provenientes del horno de clinker, tales como monóxido de carbono, aldehídos, cetonas, óxidos de azufre y de nitrógeno.

Existe una nueva generación de materiales que además de poder ofrecer una solución a la problemática ambiental del cemento, pueden ser utilizados en diferentes campos de la industria, los Geopolímeros. Pueden ser considerados como rocas artificiales; que en su estado puro se pueden usar para el almacenamiento de residuos tóxicos o radioactivos por su gran tamaño molecular; se pueden utilizar en aleaciones con aluminio para la industria metalúrgica; como refuerzo en la manufactura de moldes refractarios por su gran resistencia a altas temperaturas, también se pueden usar como agentes cementantes o de relleno para la industria del concreto. [4]

Las propiedades y usos de los geopolímeros se han explorado en muchas disciplinas científicas e industriales, en la química orgánica e inorgánica, en la físico-química, en química de coloides, mineralogía, geología, y en todos los tipos de tecnologías de procesos de ingeniería. [5]

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos, preparados a partir de materiales ricos en silicio, Aluminio y Oxígeno como la Mullita. Tienen una composición química similar a las zeolitas (silicatos alumínicos hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos), teniendo los geopolímeros una estructura más amorfa.

La mullita es un mineral de composición $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, que se puede obtener por un tratamiento térmico de materias primas como caolín, alúmina, arcilla, silimanita o cianita, las cuales abundan en nuestro país y con esta se puede sintetizar un geopolímero mediante una reacción alcalina a bajas temperaturas. [42]

Mediante la incorporación del material geopolimérico derivado del mineral mullita como agente cementante en el proceso de fabricación del concreto, se pueden igualar o mejorar las propiedades químicas, mecánicas y eléctricas del cemento portland reemplazando total o parcialmente la cantidad de cemento en la mezcla,

a su vez reduciendo los impactos ambientales nocivos que se generan mediante el proceso de fabricación del cemento portland en la industria

En este trabajo se preparó un geopolímero por la reacción del alúmino-silicato mullita, que se obtuvo en el laboratorio a partir de la activación térmica de la caolinita proveniente del caolín en polvo comercial, con una solución activadora altamente alcalina de hidróxido de sodio, silicato de sodio y óxido de aluminio, toda la reacción se llevó cabo a presión atmosférica y una temperatura de 120°C para eliminar el exceso de agua. [6]

Se obtuvieron concretos verdes o sostenibles con el medio ambiente, de buenas propiedades mecánicas, químicas y eléctricas, además con una menor emisión de CO₂ durante su preparación, disminuyendo los efectos nocivos ambientales al sustituir parcialmente las cantidades de cemento portland en la mezcla del concreto, usando como agente cementante el geopolímero de mullita.

1. ANÁLISIS DE LA LITERATURA

1.1. ESTADO DEL ARTE

El cemento portland tipo 1 es el cemento más utilizado en el mundo en la producción de concreto, fundamentalmente por sus excelentes propiedades mecánicas que presenta después de su fraguado y su relativo bajo costo. En la actualidad se estiman que se producen 1800 millones de toneladas de cemento en el mundo. Mejía y colaboradores proponen el uso de materiales alternativos que favorezcan la disminución de emisiones de CO₂ y el aprovechamiento de recursos naturales de bajo costo, que generen ventajas frente a los materiales conocidos. Al diseñar nuevos cementos a partir residuos industriales con la activación alcalina de escoria siderúrgica, [27]

Estudios realizados en Colombia por el Instituto Geológico Minero (Ingeominas) reportan a nivel nacional yacimientos de caolines y arcillas caoliníticas, distribuidas particularmente en los sectores de Antioquia, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Norte de Santander, Risaralda y Santander que sin embargo, un número apreciable de estas minas no están siendo explotadas, se han tomado diferentes muestras comerciales de caolines de diferentes departamentos y se le ha realizado un tratamiento térmico a condiciones controladas para obtener metacaolín. [28]

Según Janotka y Gutiérrez recursos naturales que aún no son explotados pueden formar parte fundamental en el mejoramiento del concreto, haciendo el papel desde agregados sencillos como puzolanas en su estado natural, hasta transformaciones y reacciones de varios tipos; tal es el caso de los geopolímeros,

que son nuevos materiales con excelentes propiedades mecánicas y químicas equiparables a las del cemento. [29][30].

Por lo tanto la geopolimerización se ha visto como una manera viable en los últimos años para procesar y agregar valor a los residuos industriales de alúmino-silicato. Dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, alta inercia química, es decir: baja reactividad, y que permiten encapsular o inmovilizar otros residuos peligrosos. Torres y compañía han realizado el análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. Marín y colaboradores han sintetizado y caracterizado concretos a base de geopolímeros de metacaolín. Resultando ser un mineral muy reactivo, debido a que su geopolimerización fue muy exitosa, generando materiales de buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas. [31][32]

J.L. Provis y J.S.J. van Deventer presentan un modelo matemático para la cinética de la geopolimerización. Allí proponen la posibilidad de activar los geopolímeros con soluciones alcalinas. Según un estudio realizado en la universidad de Melbourne, se estableció que con NaOH, los geopolímeros muestran una mejor disolución que con otras bases activadoras, contrario del uso de KOH, generando un efecto polimerizante, obteniendo geopolímeros con alta resistencia al impacto. [33]

En su trabajo Frantisek Skvara y colaboradores proponen que uno de materiales que podrían ser utilizados para la síntesis de geopolímeros son las cenizas volantes, las cuales se activan, presentando carácter amorfo con fases cristalinas minoritarias. Los materiales preparados a base de cenizas volantes activadas por álcalis exhibieron resistencia a la acción corrosiva de soluciones salinas, buena resistencia a las heladas y pudieron soportar exposición a temperaturas aproximadas a 600 ° C. En su trabajo también proponen que los metacaolines provenientes de la transformación térmica de caolines son materiales que también

pueden activarse con KOH obteniéndose hormigones con buenas propiedades mecánicas y que dependen del tiempo de reacción del metacaolín; además al igual que el KOH, el NaOH también puede actuar como agente activante y se obtienen así como con la otra base buenas propiedades físicas en los geopolímeros obtenidos. [34]

Kostas y Dimitra en su documento exponen su investigación sugiriendo los pasos a seguir para mejorar el potencial de geopolimerización, centrándose en la utilización de los residuos mineros y subproductos metalúrgicos, la síntesis de geopolímeros con propiedades avanzadas que pueden ser utilizados en la estabilización de residuos peligrosos. Postulan que la geopolimerización se establecerá como una tecnología viable, que será reconocida por la industria, para el desarrollo de la sostenibilidad ambiental del sector de los minerales. [35]

En su trabajo de proyecto de grado de la Universidad Industrial de Santander Castro Diana obtuvo y caracterizó geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, posteriormente los utilizó para el desarrollo y mejoramiento del concreto sustituyendo varios porcentajes de cemento portland y agregado fino utilizado en la mezcla. Demostrando que los geopolímeros ofrecen una disminución en la emisión de grandes volúmenes de gases nocivos como lo son CO_2 , NO_x y SO_x . [36]

Pacheco y Castro proponen el desarrollo de nuevos ligantes, álcalis activados usados como aglutinantes, para dar solución al tema de la desintegración de las estructuras de hormigón fabricadas con cemento Portland Ordinario debido a la corrosión. Las estructuras generadas en su investigación tienen mayor durabilidad y menor impacto ambiental. En su publicación muestran los antecedentes históricos, la terminología de los productos de hidratación, la influencia de las materias primas, el tipo de activador alcalino en los mecanismos de reacción y sobre naturaleza de los productos de reacción. [37]

Prud'homme y colaboradores obtuvieron espumas que pueden ser usadas como aislantes térmicos, basadas en la síntesis de geopolímeros de polisialatos alcalinos a bajas temperaturas (25-80°C) por la activación alcalina de minerales en bruto y humo de sílice. Los minerales los prepararon a partir de una solución que contenía caolinita deshidroxilada y pellets de hidróxido alcalino disueltos en silicato de sodio. Estas espumas tuvieron gran potencial como un material aislante para aplicaciones en materiales de construcción, ya que la medición térmica tuvo un valor de $0.22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Valor similar al de conductividad térmica a la de la madera ($0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [38]

Rees y colaboradores muestran el mecanismo de formación de geles de geopolímeros a través de su investigación en sembrado de cabeza de serie. Además muestran que las materias primas y las condiciones de procesamiento son críticos en la determinación del comportamiento, manejabilidad, propiedades físicas y químicas de los productos geopoliméricos. Proporcionando las bases para el diseño a medida en la fabricación de geopolímeros dependiendo de los requerimientos comerciales. [39]

Duxson, Lukey, y Van Deventer usan el modelo Hashin-Shtrikman para determinar la conductividad térmica de aglutinantes geopoliméricos para una primera aproximación de la interconexión molecular del geles poliméricos.[40]

Lee y Van Deventer realizaron una serie de experimentos de lixiviación, dentro del cuales un alúmino silicato es activado con soluciones alcalinas acuosas de alcalinidades variables y solubles a diferentes dosificaciones de silicato. Estas soluciones lixiviadas las diluyeron y analizaron con espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES), las partículas sólidas las separaron, lavaron, desecaron, y analizaron por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Al comparar los resultados obtenidos a partir de la ICP-OES y FTIR, construyeron una curva de calibración lineal donde se relacionen

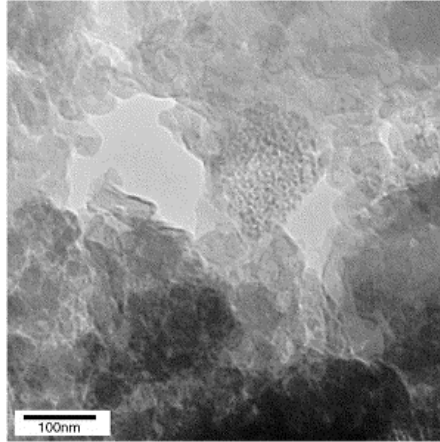
ambas técnicas, y utilizaron para comprender el mecanismo de reacción de geopolimerización y para determinar las condiciones de reacción que son críticas en el control de las diversas vías de reacción, que a su vez afectan a los productos de formación. Mostrando el papel importante de la naturaleza del álcali y de la solubilidad de este en la activación alcalina y en la posterior geopolimerización, de tan altamente heterogéneo y amorfo alúmino-silicato como como lo es la ceniza volante. También determinaron como estas puede afectar en los productos formados las propiedades físicas macroscópicas como la resistencia a la compresión. [41]

1.2. MARCO TEORICO

1.2.1. Geopolímeros. Como su nombre lo indica los geopolímeros son polímeros inorgánicos, son un tipo de materiales que se han venido desarrollando desde los años 70's por el ingeniero químico francés Joseph Davidovits. Formados a partir de la polimerización de silicio, aluminio y oxígeno que se disponen constituyendo una estructura tridimensional amorfa, son materiales similares a los cerámicos, que exhiben excelentes propiedades, una de ellas es la resistencia en entornos ácidos o altas temperaturas.

Los geopolímeros consisten en un polímero de estructura Si-O-Al, similar a las zeolitas. La principal diferencia con la zeolita es que los geopolímeros son amorfos en vez de cristalinos. La microestructura de geopolímeros en una escala nanométrica observada por TEM (Microscopía Electrónica de transmisión) comprende pequeñas agrupaciones de aluminosilicatos con poros dispersados dentro de una red altamente porosa. Los tamaños de las agrupaciones tienen entre 5 y 10 nanómetros. [43]

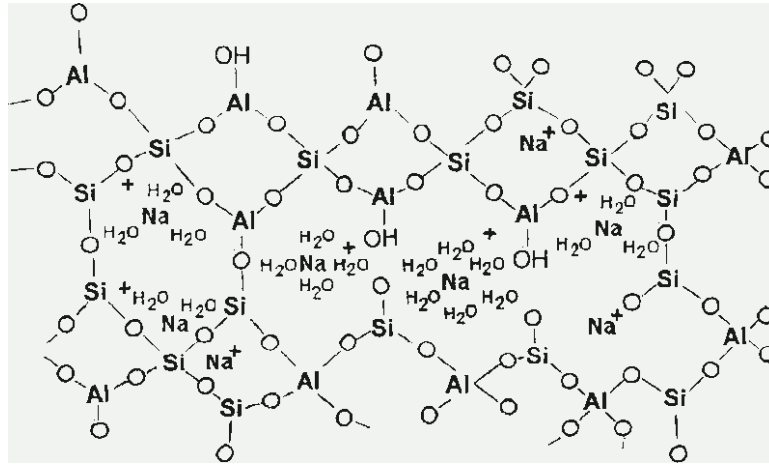
Figura 1. Microestructura de un geopolímero Na poli(sialato-siloxo) preparado a partir de metacaolín observada por un Microscopio electrónico de Transmisión.



Fuente: [55]

Esta clase de polímeros son también llamados polisialatos, los geopolímeros son derivados de los aluminosilicatos y pueden ser sintetizados a temperaturas no mayores a 150 °C y a pH altos. Estos geopolímeros pueden estar compuestos de unidades de Sialato: $[-\text{Si-O-Al-O}]_n$ PS (polisialatos), sialatosiloxo: $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O}]_n$ PSS (polisialatosiloxo) o de sialatodisiloxo: $[\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O}]_n$ PSDS (polisialatodisiloxo). En toda la estructura el Aluminio tiene coordinación 4 creando una carga negativa desbalanceada compensada por la presencia de cationes monovalentes tales como Na^+ o K^+ , que a su vez pueden estar hidratados por varias moléculas de agua si el geopolímero se trabaja a temperaturas menores a 150°C como en cementos como se muestra en la **Figura 2:** [12]

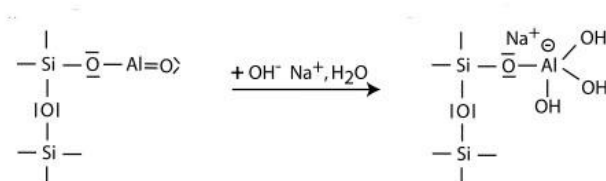
Figura 2. Estructura de un Na Poli(Sialato siloxo) Hidratado.



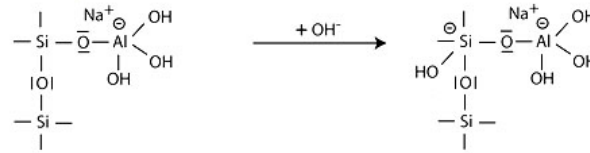
Fuente: [44]

La síntesis de los geopolímeros se lleva a cabo a través de oligómeros que formarán la estructura del geopolímero. En tres fases, la primera es la despolimerización alcalina del polisiloxo en la capa exterior del mineral, posteriormente la formación de la molécula de ortosialato $(OH)_3-Si-O-Al-(OH)_3$. Posteriormente se lleva a cabo una condensación o policondensación a polímeros u oligómeros superiores. Un mecanismo propuesto para la reacción de geopolimerización partiendo de un mineral que posea el grupo siloxo como el metacaolín, puede ser el siguiente:

Primero ocurre la alcalinización y la formación de Al tetravalente en el grupo lateral sialato- $Si-O-Al-(OH)_3-Na^+$,



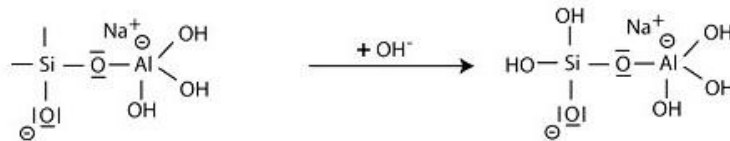
la disolución alcalina se inicia con la unión de la base OH⁻ al átomo de silicio, que es por lo tanto capaz de extender su esfera de valencia al estado penta-covalente,



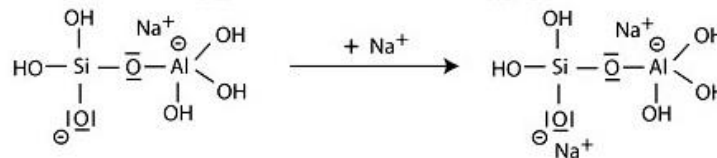
el posterior curso de la reacción puede ser explicado por la eliminación del oxígeno del siloxano Si-O-Si a través de la transferencia del electrón de Si a O, la formación del intermedio silanol Si-OH, por un lado, y de base siloxo Si-O⁻ - por otro lado,



ocurre luego la formación adicional de silanol grupos Si-OH y el aislamiento de la molécula de orto-sialato, la unidad primaria de geopolimerización,

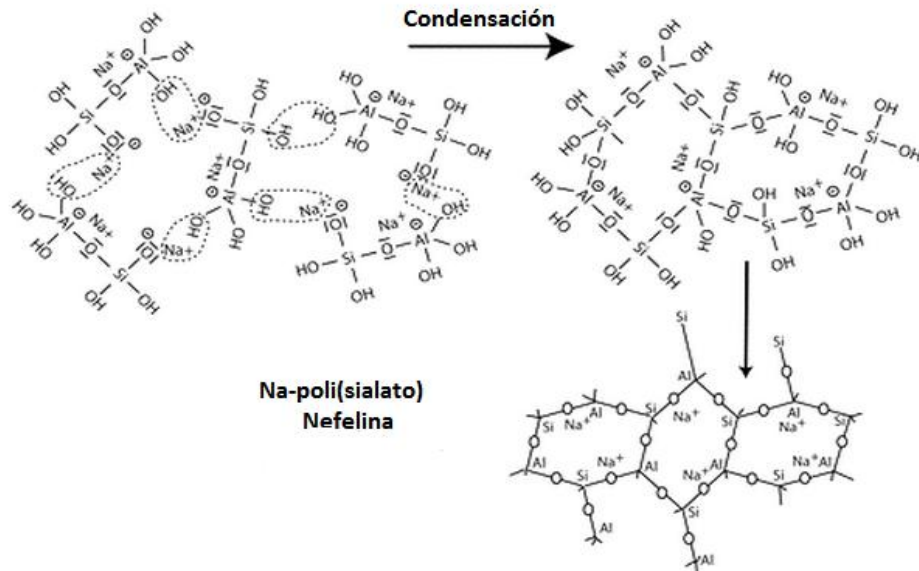


luego ocurre reacción de la base siloxo Si-O⁻ con el catión de sodio Na⁺ y la formación de enlace terminal Si-O-Na.

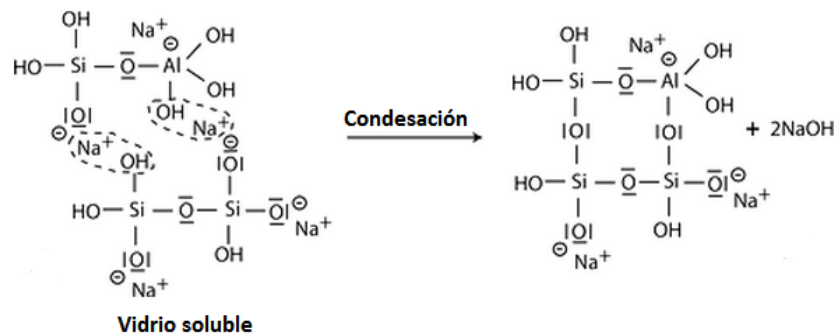


La condensación se da entre las moléculas reactivas orto-sialato, grupos Si-O-Na y el hidróxilo de Aluminio OH-Al, con una producción de NaOH, se forma la

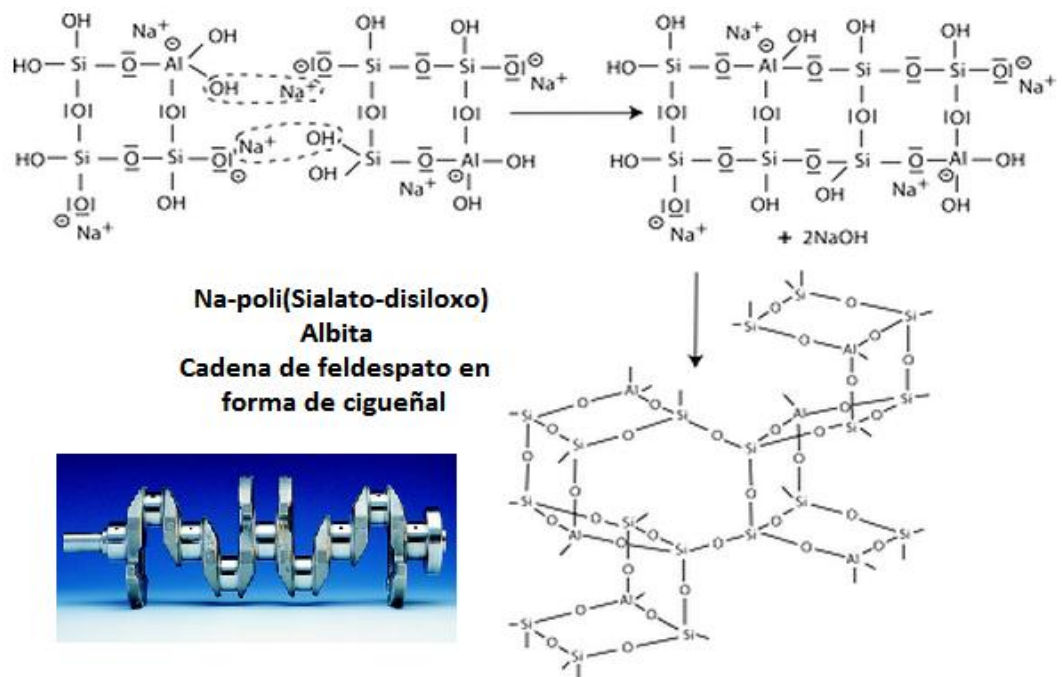
estructura tri-ciclo-sialato, lo que genera que el álcali NaOH se libere nuevamente y vuelva a reaccionar alargando la policondensación llevándola a un Na-poli(sialato) estructura de la nefelina.



Si hay presencia de vidrio soluble es decir silicato de sodio (Na-polisiloxonato soluble) se obtiene la condensación entre di-siloxonato y las moléculas de orto-sialato, los grupos reactivos Si-ONa, Si-OH y hidroxilo de aluminio OH-Al, formando la estructura cíclica orto-sialato-disiloxo, mediante el cual el NaOH se libera y vuelve a reaccionar.



Posteriormente sigue la policondensación generando el Na-poli(sialato-disiloxo) que es la estructura similar a la de la albita, una estructura de cadena de feldespato similar a un cigüeñal. [45]



1.2.2. Caolinitas. El caolín es una arcilla blanca que tradicionalmente ha sido usada en la manufactura de porcelana y es de fácil adquisición, la caolinita es el mineral del que principalmente se compone el caolín, la caolinita es definida como un disilicato de aluminio hidratado $[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$.

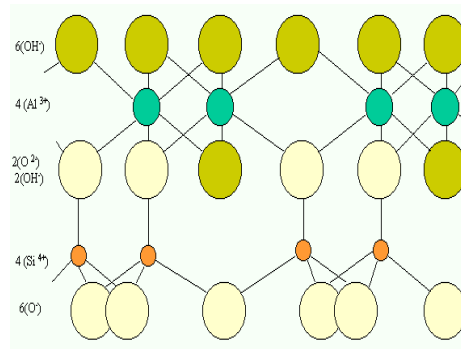
Figura 3. Caolín comercial marca Faraón utilizado como fuente del mineral caolinita.



Fuente: Autor

El caolín también está compuesto de pequeñas proporciones de minerales como dickita, nacrita y halloisita; acompañados de impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales.

Figura 4. Representación estructural de la caolinita.

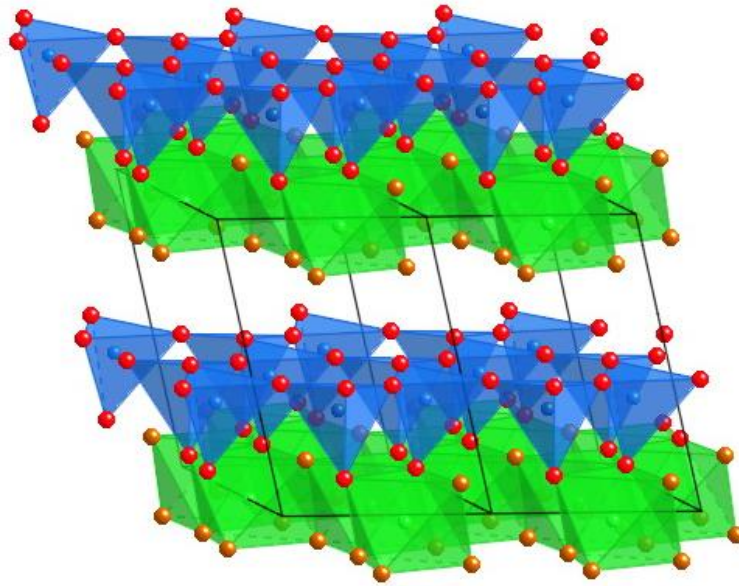


Fuente: [56]

La caolinita $[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$, corresponde estructuralmente a un mineral arcilloso del tipo 1:1. Distinguiéndose dos láminas, una formada por tetraedros, en cuyos vértices se situarían los átomos de oxígeno y el centro estaría ocupado por el átomo de silicio, y otra formada por octaedros, en cuyos vértices se situarían los átomos del grupo hidróxido y el oxígeno, y en el centro el átomo de aluminio. Esta estructura en ocasiones es altamente compleja, como resultado de un gran número de defectos de empaquetamiento que pueden ocurrir durante su periodo de formación y crecimiento.

El caolín es un material altamente comercial que puede ser procesado y refinado para luego ser utilizado como material de partida, en la obtención de otros minerales como el metacaolín y la mullita por medio de tratamientos térmicos. La estructura de la caolinita principal componente del caolín se muestra a continuación:[13]

Figura 5. Estructura Tridimensional de la caolinita. Si=Azul; Al=Verde; O=Rojo; OH=Marrón; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$.



Fuente: [46]

1.2.3. Metacaolinita. El prefijo meta es un término usado para denotar cambios, en el caso del metacaolín, es el cambio que ocurre cuando por la aplicación de calor un periodo de tiempo determinado el caolín sufre de una deshidroxilación, aumentando su reactividad, convirtiéndose en una puzolana de clase natural.

Una puzolana es un material de silicio o alúmino-silicato, que posee poco valor cementante, pero finamente molido y en presencia de humedad, reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a temperatura ambiente formando compuestos de propiedades cementantes. Las puzolanas pueden ser de origen natural como algunas rocas volcánicas o de origen artificial como algunos subproductos y desechos industriales (arcillas activadas, cenizas volantes, humo de sílice, ceniza de cascarilla de arroz, etc.).

A temperaturas que están entre los 500° - 800° la caolinita pierde agua por una deshidroxilación y se convierte en metacaolinita, un proceso endotérmico donde es necesaria gran cantidad de energía para eliminar los iones hidroxilo unidos químicamente; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina.

La metacaolinita ha tenido aplicaciones aprovechándose su composición química y reactividad, siendo usada como una puzolana artificial en la generación de concretos, ya que se sabe de su buen aporte a la resistencia mecánica, disminución de permeabilidad por su tamaño de poro y alta durabilidad por la estabilidad de los concretos generados [14].

1.2.4. Mullita. La mullita es un mineral que se considera parte del grupo de la silimanita Al_2SiO_5 . Esta es la única fase cristalina estable a altas temperaturas y a 1atm de presión del sistema sílice–alúmina [15].

La mullita exhibe un alto punto de fusión (1810°C), que combinado con un bajo coeficiente de expansión térmica ($4,5 \times 10^{-6} K^{-1}$ paralelo al eje *a* y $5,7 \times 10^{-6} K^{-1}$ paralelo al eje *c*), una gran resistencia mecánica (fuerza de tensión de 62 MPa) y una elevada resistencia a altas temperaturas, es un mineral altamente ubicable en la industria de los refractarios. En la naturaleza la mullita es un mineral extremadamente escaso y se producía únicamente en arcillas derretidas en lavas en la isla de Mull, Escocia en la era Cenozoica, de allí su nombre.

Para la obtención de mullita se puede utilizar como materia prima caolín, alúmina, arcilla o cianita, pero principalmente minerales filosilicatos, como la caolinita que al ser calentada pierde agua y por encima de los 800 °C tiene un importante cambio químico con la formación de alúmino-silicatos polimórficos con fórmula (Al_2SiO_5) como la andalucita, la cianita, la silimanita, y sílice libre, alúmino-silicatos polimórficos que se convertirán posteriormente en mullita ya que es el mineral más

estable a cualquier temperatura con la liberación de sílice, de acuerdo a la siguiente reacción química: [16]

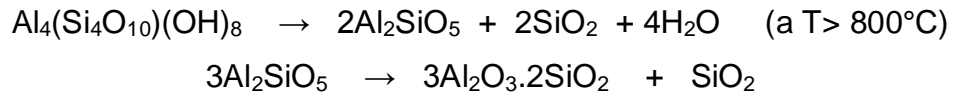
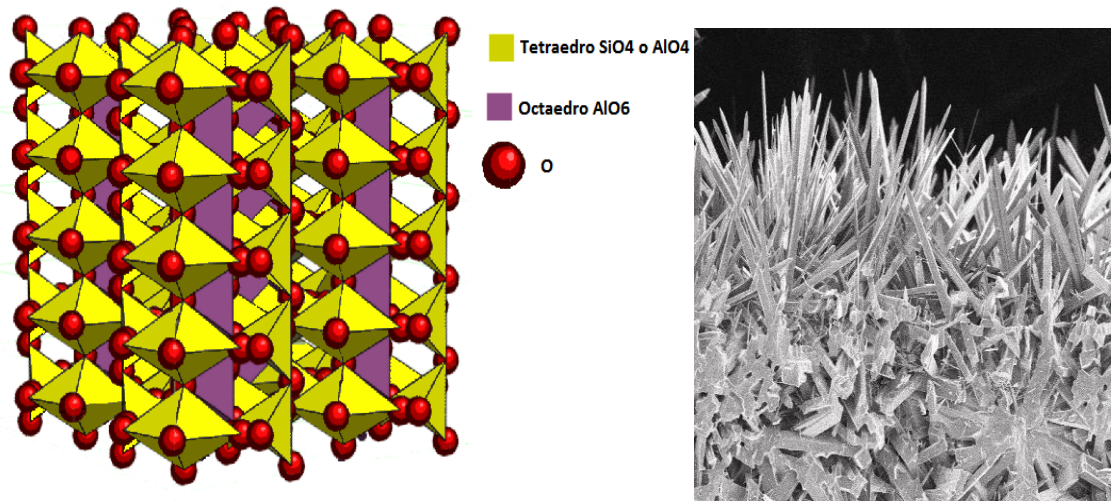


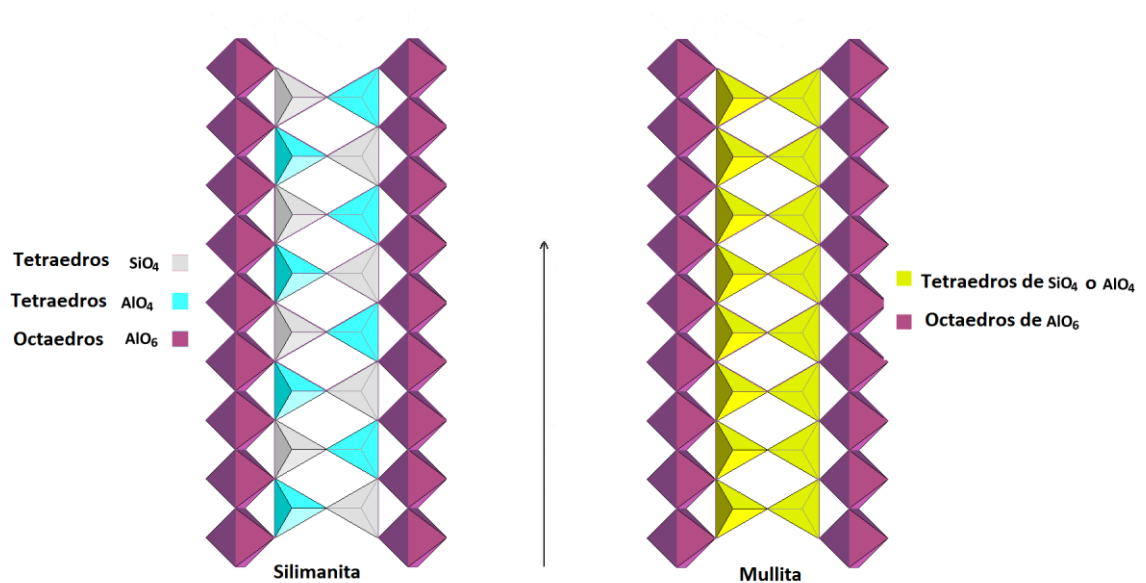
Figura 6. Estructura tridimensional Mullita (izq); cristales de mullita bajo el microscopio (der).



Fuente: [57]

La mullita tiene la misma estructura a la de la silimanita y se puede decir que es el resultado de reemplazar un número de átomos de Si por Al. Es por ello que ambas presentan una morfología acicular, es decir en forma de agujas y esto se explica por la estructura de las cadenas de mullita formadas en octaedros de AlO₆ y tetraedros de SiO₄ y AlO₄ paralelos a la dirección del alargamiento, como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7. Comparación entre la estructura de la Silimanita y la Mullita ambas presentan morfología acicular.



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

1.2.5. Cemento. Es un mineral finamente molido, usualmente de color grisáceo extraído de rocas calizas, que al triturarse hasta convertirse en polvo y al ser mezclado con agua, tiene la propiedad de endurecer. Se pueden definir dos tipos básicos de cementos, los de origen arcilloso que son obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza y los cementos puzolánicos que provienen de puzolanas de orígenes volcánicos u orgánicos. La preparación del cemento comienza con la explotación de las materias primas y su posterior triturado; luego este material se calcina para formar el Clinker que finalmente es triturado y mezclado con yeso.

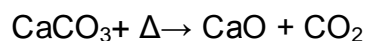
Existen diferentes tipos de cemento, dependiendo de sus características de resistencia, fraguado y expansión dependerá su aplicación. Están los cementos comunes, los cementos resistentes a los sulfatos y/o agua de mar, los cementos blancos, los de bajo calor de hidratación y los cementos para usos especiales.

En los cementos la resistencia a la compresión es afectada por la relación agua cemento y la cantidad de hidratación; después de su fraguado es un material que no sufre deformación alguna. El cemento es capaz de endurecer en condiciones secas y húmedas e incluso, bajo el agua; su durabilidad se incrementa con el paso del tiempo. El concreto hecho con cemento es tan durable como la piedra y a pesar de las condiciones climáticas, el cemento conserva su forma y su volumen.

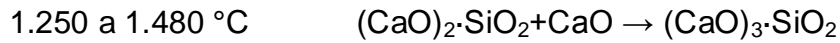
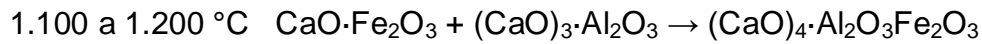
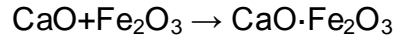
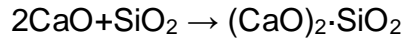
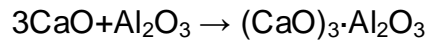
El cemento de mayor uso para la construcción es el cemento portland tipo I ya que este tiene propiedades como alta resistencia a la compresión, a la corrosión y al agua. [17]

1.2.6. Cemento Portland. El cemento Portland se produce mediante un proceso de sinterización que consiste en el tratamiento térmico de una mezcla en polvo de material metálico o cerámico, a una temperatura poco inferior a la de fusión de la mezcla, incrementando su fuerza y resistencia por la creación de enlaces fuertes entre partículas. La mezcla homogénea de las materias primas para la producción del cemento se lleva a una temperatura de 1450 °C, allí el óxido de aluminio y óxido de hierro que están presentes actúan como fundentes pero contribuyen poco a la fuerza.

La materia prima principal para el clinker es generalmente de piedra caliza (CaCO₃) mezclada con un segundo material que contenga arcilla como fuente de alúmino-silicato como otra piedra caliza más impura. El contenido de CaCO₃ de estas calizas debe ser por lo menos de 80%. Algunas materias primas utilizadas son arcilla, pizarra, arena, mineral de hierro, bauxita, cenizas volantes y escorias como fuentes de silicatos. La reacción de descomposición del carbonato de calcio en dióxido de carbono y cal es la siguiente:



En la formación del clinker se presentan las siguientes reacciones a diferentes temperaturas: 1.000 a 1.100 °C.



La composición típica de los cementos portland con adición de yeso se encuentran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Composición general del cemento portland.

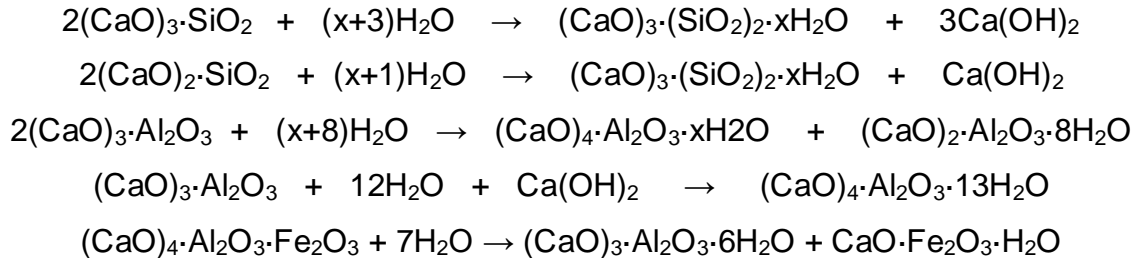
Clinker	Abreviación	Masa %
Silicato tricálcico $(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45-75%
Silicato dicálcico $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	7-32%
Aluminato tricálcico $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0-13%
Aluminoferrita tetracálcico $(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	0-18%
Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$		2-10%

La composición del cemento portland tipo I de uso general es la que se muestra en la **Tabla 2**.

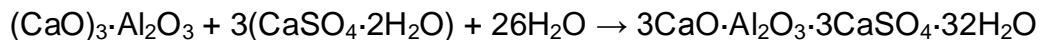
Tabla 2. Composición del cemento portland tipo I.

51% $(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2$
26% $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$
11% $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
12% $(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

En el proceso de fraguado, las reacciones de hidratación que se presentan en el cemento son las siguientes:



Todas estas reacciones de hidratación en el fraguado son exotérmicas. La adición del yeso al Clinker es generalmente para regular el tiempo de fraguado, aproximadamente de 45 min, ya que el yeso reacciona con el aluminato tricálcico para formar una sal expansiva llamada Etringita. Esta es una sal expansiva que es la encargada de iniciar el proceso de endurecimiento de la mezcla en las primeras horas ya que el proceso de hidratación de los otros componentes lleva varios días. [18]



1.2.7 Concreto. Es la mezcla resultante entre el cemento, un agregado grueso o grava, un agregado fino o arena y agua para que ocurra el proceso de fraguado. Esta mezcla puede ser moldeada tomando casi cualquier forma y es bastante cohesiva. En las primeras horas la mezcla endurece por la reacción del yeso con el agua y posteriormente se lleva a cabo el proceso de fraguado dentro de la mezcla, que es una reacción de hidratación de los componentes del cemento convirtiéndose en un material resistente, cohesivo y durable.

La arena o agregado fino utilizado para el concreto actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto, esta puede ser de origen natural o manufacturado y de un tamaño de partícula de hasta

1 mm, el triturado, grava o agregado grueso son partículas cuyo tamaño puede alcanzar 150 mm pero los más usados son de un promedio de 19 a 25 mm. El agua participa en las reacciones de hidratación del cemento, desempeñándose como agente ligante y su volumen en la mezcla del concreto debe ser del 25 a 40 % del volumen total del concreto. [19]

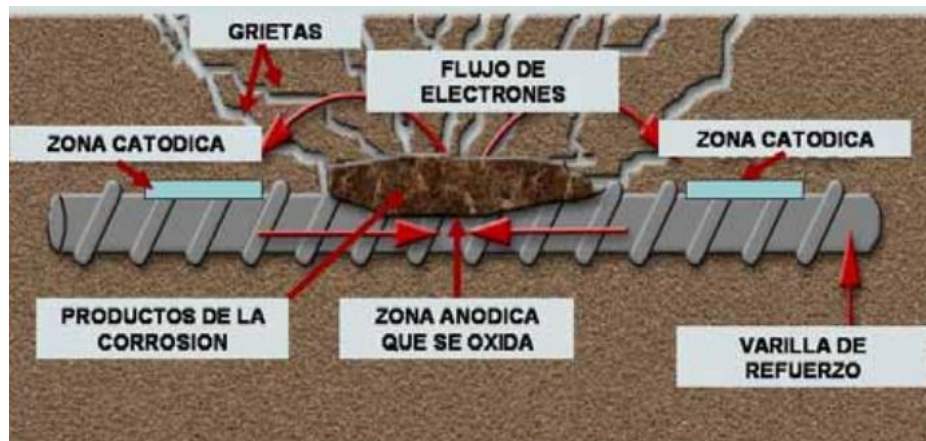
En la mayoría de los casos para la construcción de edificaciones se utilizan estructuras de metal como el acero que combinadas con el concreto dan una mayor tenacidad, fuerza y dureza, a este material se le conoce como concreto armado.

1.2.8 Corrosión del concreto armado. Desde hace un tiempo el material más utilizado en la industria de la construcción es el concreto armado, cuando se requieren estructuras con resistencia mecánica. La mayoría de las estructuras de concreto están reforzadas con varillas de acero, y la corrosión de estos refuerzos es la causa principal del deterioro de las mismas en ambientes húmedos especialmente en ambientes marinos.

Cuando el acero embebido en concreto generalmente en forma de varillas sufre el fenómeno de corrosión, se consume la capa superficial del acero, y se forma una capa de productos de corrosión como el óxido Fe_3O_4 o el hidróxido $Fe(OH)_2$ en el perímetro de la barra en ese mismo sitio. El volumen ocupado por dichos óxidos es mayor que el que ocupaba el acero original, originando presiones contra el concreto que rodea a la varilla de acero, lo que propiciará la formación de grietas y desprendimientos del concreto, dichas grietas y desprendimientos del recubrimiento de concreto además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero es decir la cohesión íntima entre el concreto y la varilla, y potencialmente, la resistencia en general del elemento estructural. [50]

La corrosión del acero en el hormigón o concreto armado se considera como uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad de las obras civiles, puentes, túneles y carreteras.

Figura 8. Representación de la corrosión de una varilla embebida en concreto.



Fuente: [50]

En conjunto todos los elementos del concreto reforzado: varilla, cemento Portland, arena, grava y agua, le confieren propiedades excelentes a éste tales como: resistencia a la compresión y resistencia a la tensión. La elevada alcalinidad del concreto con un pH entre 12.5 y 13.5 junto con su resistividad eléctrica de 100 $K\Omega \cdot cm$ le proporcionan condiciones ideales para alcanzar una auto generada pasividad, es decir se crea una capa homogénea de óxidos que evitan la acelerada corrosión del acero. Este fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo en el concreto no se presenta a menos que en el medio haya un agente externo que modifique el pasivado normal del medio alcalino, como lo pueden ser cualquiera de las especies Cl^- , $SO_4^{=}$, CO_2 o SO_2 entre otros.

Los cloruros causan el rompimiento de la condición de pasividad normal del acero en el concreto armado, dando como resultado la corrosión en la varilla embebida en él. Se ha estimado que la concentración cloruros que pueden iniciar la

corrosión es de 710 ppm para concretos con un pH=12.5. Por arriba de esta concentración la película fallará irremediablemente. El ataque de los cloruros en el acero embebido en concreto, se da como un proceso electroquímico donde el agua debe estar presente funcionando como un electrolito y proporcionando el oxígeno que se reducirá en el cátodo posteriormente. El ión cloruro ataca al acero formando FeCl_2 y en una reacción secundaria se forma $\text{Fe}(\text{OH})_2$, dejando al ión Cl^- libre para atacar nuevamente.

Otra forma de ataque por corrosión a la varilla de refuerzo es el fenómeno que se denomina carbonatación. El CO_2 al ser un agente presente en la atmósfera puede reaccionar con los iones alcalinos formando precipitado de CaCO_3 , provocando también la reducción de la alcalinidad del concreto a pH menores de 12.5. La difusión del $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ es diferente tanto en agua como en aire; en el agua es 10^4 veces más lenta que en el aire. Por tanto si los poros están secos, el $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ difundirá rápidamente pero no reaccionará debido a la falta de agua; si los poros están saturados de agua la difusión será muy baja, y se presentará muy poca carbonatación; pero si los poros están parcialmente saturados, la carbonatación ocurrirá fácilmente [49]

Otra de las formas más frecuentes de ataque químico al concreto es la acción de los sulfatos. El ión sulfato aparece en mayor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales. En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario. Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio, de sodio y calcio, todos ellos con diferente solubilidad.

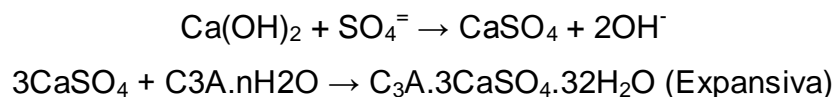
La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio C3A y el ferroaluminato

tetracálcico C3FA. El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfato aluminato tricálcico (Etringita) e hidróxido de calcio (portlandita). La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de reacciones que modifican el PH de las pastas de cemento. [47]

En general los sulfatos reaccionan de la siguiente manera:



1.2.9 Técnicas de caracterización

1.2.9.1 Difracción de Rayos X: Es un método basado en el fenómeno de difracción de los rayos X por materiales en estado cristalino. Es un método de análisis no destructivo, principalmente usado en mineralogía aunque puede ser utilizado tanto en compuestos orgánicos como inorgánicos. Las muestras pueden estar en forma de monocristal o en polvo microcristalino, dependiendo del tipo de instrumento, consiguiéndose diferentes datos en ambos casos. Para las aplicaciones que requieren solo una caracterización precisa de los parámetros de

la red cristalina, puede ser suficiente la difracción de rayos X en polvo, y los resultados de este método son la identificación de las fases cristalinas de una muestra mediante datos precisos de las dimensiones moleculares; para una dilucidación precisa de las posiciones atómicas es conveniente la difracción de rayos X de monocristales. [20]

Mediante la difracción de rayos X se puede realizar la caracterización estructural de materiales y la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras de los reactivos de partida y los productos, confirmando las condiciones termodinámicas y cinéticas favorables en la obtención de un producto semicristalino de una reacción.

1.2.9.2 Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR-ATR):

La FT-IR o espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier es una técnica usada para obtener espectros de absorción, emisión, fotoconductividad o efecto Raman, de un sólido, líquido o gaseoso.

Las frecuencias específicas de vibración de los enlaces químicos son del orden del infrarrojo, estas frecuencias dependen de la energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y al acoplamiento vibracional. Esta técnica tiene amplias aplicaciones en análisis cualitativo y cuantitativo, es usada en investigación académica y en la industria. [21]

Una técnica de muestreo utilizada junto con la espectroscopia infrarroja que permite a las muestras ser examinadas directamente en estado sólido o líquido sin más preparación es la Reflectancia Total Atenuada o ATR por sus siglas en ingles. [1]

Mediante los espectros de infrarrojo por transformada de Fourier: FT-IR con muestras preparadas en fino polvo y mediante al técnica ATR se pueden

determinar las estructuras características de algunos minerales analizando las vibraciones en sus correspondientes números de onda.

1.2.10 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS): En el estudio de la corrosión de materiales es bastante usada esta técnica electroquímica, en donde se impone a un electrodo un potencial modulado sinusoidalmente de baja amplitud y se mide la respuesta en función de la frecuencia de la perturbación, esta técnica permite analizar procesos electródicos en función de circuitos equivalentes y la respuesta es un espectro de impedancias. [24]

La Espectroscopia de Impedancia Electroquímica es una técnica en corriente alterna que tiene la ventaja de cubrir varios órdenes de magnitud en frecuencia (desde MHz hasta μ Hz). Al variar la frecuencia de una señal sinusoidal de potencial, la corriente circula por la interfase. Haciendo la analogía del circuito eléctrico; el flujo de corriente pasa a través de los diferentes elementos del circuito, que tienen una respuesta en impedancia (Z) y ángulo de fase (θ) característicos.

Para el análisis de un diagrama generado con datos de corriente alterna es necesario conocer las respuestas de un elemento, sabiendo que una impedancia (Z) es una oposición al paso de la señal eléctrica.

La analogía con la corriente directa se da como un límite en el que la frecuencia es cero. Donde se podría seguir la ley de Ohm:

$$R = V / I$$

y en corriente alterna se seguiría la ecuación:

$$Z = V(\omega)/I(\omega)$$

donde Z es la impedancia del circuito (Ohm); $V(\omega)$, el potencial en función de la frecuencia; y $I(\omega)$ la corriente (Amperios) en función también de la frecuencia ω . Cuando se aplica una señal de voltaje de corriente alterna se obtiene una respuesta en corriente de acuerdo con las ecuaciones

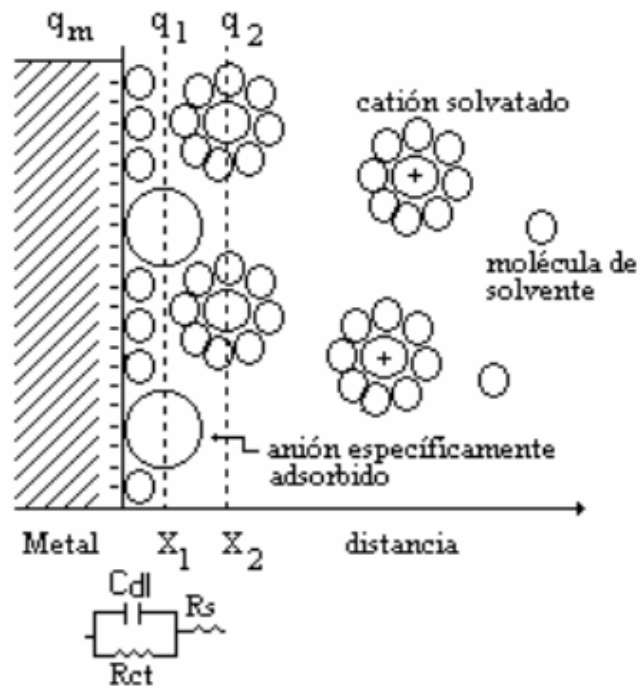
$$V = V_{m\acute{a}x} \text{ sen } \omega t$$
$$I = I_{m\acute{a}x} \text{ sen } (\omega t + \theta)$$

Donde θ es el ángulo de fase, y es muy útil para aproximar las características de los elementos eléctricos a diferentes frecuencias. La corriente alterna tiene como ventaja estar en función del tiempo y de la frecuencia; cuando se aplican frecuencias del orden de kHz, la onda de tipo sinusoidal es tan rápida que circula a través de un medio como si estuviese en corto circuito. Retomando el modelo de la interfase electrificada se tienen diferentes componentes que se asemejan a elementos eléctricos, como resistores, capacitores e inductores.

Un circuito eléctrico equivalente es una aproximación a elementos eléctricos de los componentes de la interfase, como se muestra en la **Figura 9**. El valor de R_s representa la resistencia del electrolito; R_{ct} es la resistencia a la transferencia de carga; y C_{dl} es la doble capa compacta en los límites de las fases. La corriente circulará por los elementos que presenten menor resistencia, y por tanto, origina menor caída de potencial.

Si la corriente circula por R_{ct} , se dice que es un sistema resistivo; por ello la interfase estará activa; es decir, su resistencia a la transferencia de carga será pequeña, permitiendo el paso de corriente. Cuando R_{ct} adquiere valores elevados, la corriente circulará por el capacitor, dando origen a la llamada corriente capacitiva, en la cual se tiene acumulación de carga en ambos lados del capacitor, pero no existe una transferencia de carga en la interfase. En este caso se habla de una interfase pasiva, en consecuencia de baja velocidad de corrosión.

Figura 9. Aproximación a los elementos eléctricos de los componentes de una interfase electrificada que presenta fenómeno de corrosión. La zona compacta tiene similitud con un capacitor (C_{dl}); el electrolito o zona difusa, a una resistencia al paso de corriente (R_s), la resistencia característica de un metal a la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}).



Fuente: [51]

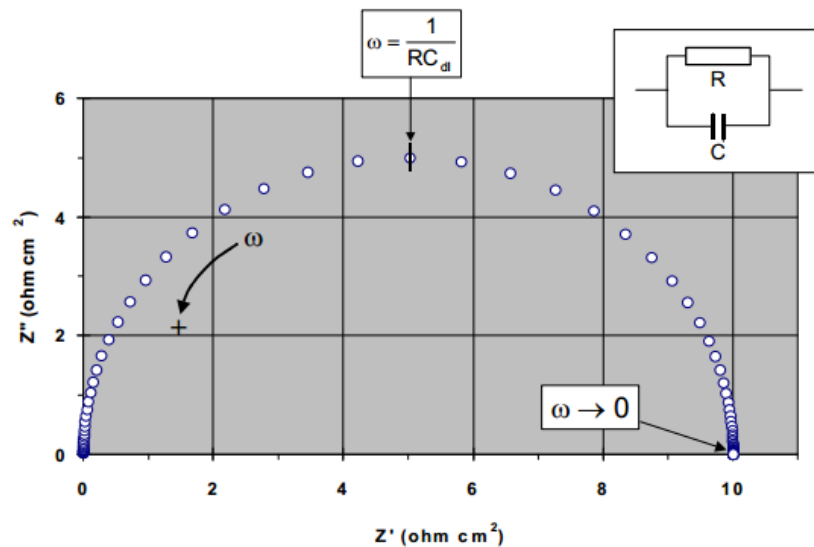
En el caso de concreto, la resistividad (R_s) es considerable, en ocasiones del orden de $k\Omega \cdot cm$; por tanto, puede interferir en la respuesta de la interfase acero-concreto y proporcionar una lectura incorrecta. Es por esto que la medición de R_{ct} debe hacerse con compensación óhmica, que estime la resistencia eléctrica del concreto (R_s), y permita un cálculo de la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) más preciso.

Cuando se aplica un voltaje, la señal circula a través de la resistencia del electrolito (R_s) y del capacitor C_{dl} , y se registra la R_{ct} . El ángulo de fase toma

valores cercanos a cero e indica que la Z (impedancia) medida que corresponde a una resistencia. Al disminuir la frecuencia, el capacitor tarda más en permitir el flujo de corriente, y tendrá una caída de potencial. Si esa caída de potencial es menor que la Rct (resistencia a la transferencia de carga), la corriente circulará por el capacitor iniciándose un decremento en el ángulo de fase. Al continuar disminuyendo la frecuencia, la pérdida de potencial será mayor en el capacitor y llegará el momento en que compita con la Rct. A estos valores de frecuencia, el ángulo de fase alcanza un máximo y toma valores menos negativos.

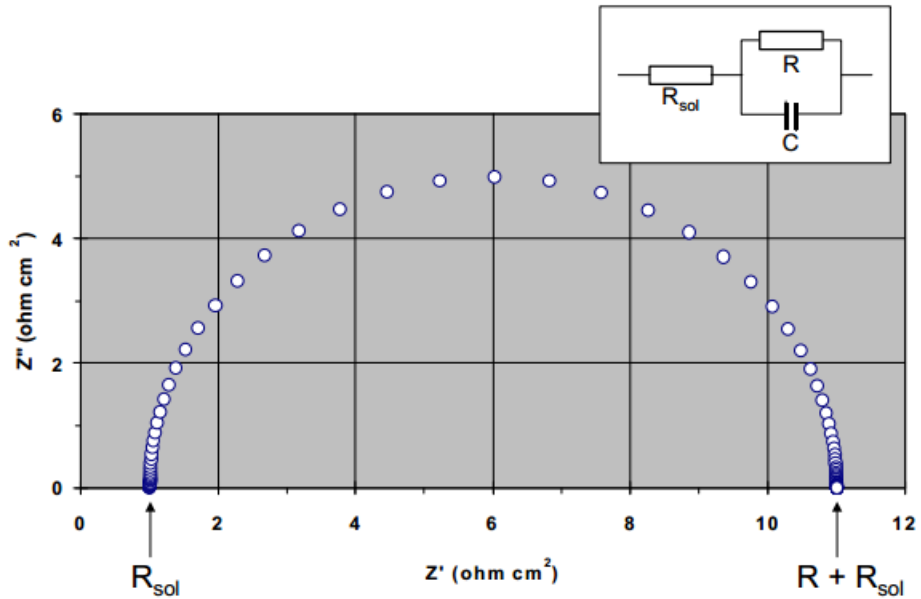
La representación de estos valores se realiza en el plano complejo, donde se representa la componente imaginaria de la impedancia (Z'') frente a la componente real (Z') a cada frecuencia de excitación; es decir se representan los vectores de impedancia en notación compleja. Esta forma de representación se llama diagrama de Nyquist y es uno de los formatos más conocidos para representar los datos de impedancia.

Figura 10. Grafico de Nyquist generado por circuito equivalente R || C



Fuente: [48]

Figura 11. Grafico de Nyquist correspondiente al Circuito equivalente de Randles.



Fuente: [48]

El diagrama de Nyquist para el circuito de Randles se muestra en la **Figura 11**, donde ahí mismo pueden apreciarse a altas frecuencias los condensadores (Cdl), los cuales conducen fácilmente, y al hacer un cortocircuito se genera la resistencia a la transferencia de cargas (Rct o R); de esta manera, la impedancia depende únicamente de la resistencia del electrolito (R_{sol} o R_s), lo cual corresponde al primer punto de corte del semicírculo con el eje horizontal en el diagrama, donde la frecuencia $\omega \approx \infty$. Al decrecer la frecuencia, Cdl se hace menos conductor, generando un semicírculo en función de la frecuencia “ ω ”. A muy bajas frecuencias, el condensador deja prácticamente de conducir; y la impedancia es la suma de $R_s + R_{\text{ct}}$, que coincide con el segundo punto de intersección del semicírculo con el eje horizontal, donde $\omega \approx 0$.

El diámetro del semicírculo es igual al de Rct. En sistemas bajo control por activación, Rct es equivalente al valor medido, mediante el método de corriente

continua polarización lineal, R_p . Por tanto, se puede calcular la intensidad de corrosión sustituyendo R_p por R_{ct} en la ecuación:

$$i_{corr} = B/R_p$$

De igual forma se puede calcular el valor del capacitor; la capacitancia del elemento C_{dl} , está en el punto más alto de la semicircunferencia, con la siguiente relación entre C_{dl} y la frecuencia a la que se alcanza dicho punto, ω_{max} :

$$C_{dl} = (1/R_{ct}) \omega_{max}$$

Siendo $\omega_{m\acute{a}x} = 2\pi f$, y f la frecuencia característica. A partir de este valor de la capacidad se puede calcular la constante dieléctrica, siempre que se hayan utilizado probetas de geometría definida.

El valor de R_{ct} es también conocido como resistencia a la polarización o R_p y nos indica si hay o no corrosión usando la relación de la ecuación $i_{corr} = B/R_p$. El valor de C_{dl} proporciona la propiedad de la interfase metal/electrolito (acero inoxidable/concreto). Si el valor de R_p o $R_{ct} \gg 0$ es decir: es grande o es resistente a la polarización no existe el fenómeno de corrosión y si el valor es ~ 0 cercano a cero se presenta el fenómeno de corrosión. A menores valores de C_{dl} no hay presencia de corrosión y en mayores valores de C_{dl} existe mayor presencia de corrosión.

1.2.11 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR): La resistencia a la polarización es una de las técnicas electroquímicas que ha sido más utilizada en los últimos 50 años. Es una técnica de laboratorio en la que se obtiene una curva de polarización que relaciona el potencial y la densidad de Corriente, donde determinando la pendiente de la curva con un pequeño tratamiento matemático se encuentra la densidad de la corrosión. Esta técnica es rápida y simple, se mide el

potencial cero del material a experimentar y sobre este se fija un rango de variación de potencial aproximado de 30 mv, luego se perturba el sistema por medio de impulsos de corriente variante.

La resistencia a la polarización lineal se desarrolla en base a la ecuación de Stern y Geary:

$$i_{corr}=B/R_p;$$

dónde: i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión, es decir la velocidad de corrosión y está relacionada de forma inversamente proporcional con la resistencia a la polarización. La constante B en la ecuación sirve para pasar de la inversa proporcionalidad a la igualdad y representa una relación existente con las pendientes de Tafel y esta tiene un valor aproximado de 26 ~ 30 mV.

[25]

1.2.12 Ensayo de Resistencia a la compresión: Este es un ensayo mediante el cual se mide la cantidad de fuerza necesaria para que un mortero o una probeta de concreto empiecen a ser comprimidos, es decir se determina su resistencia a la compresión, mediante la aplicación de una carga axial neumática acondicionada con un medidor de fuerza. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) y se realiza a una edad de 28 días de fraguado el concreto. Estos ensayos están estandarizados en la norma Norma Técnica Colombiana NTC-121 que tiene como referencia el estándar internacional ASTM C-150.

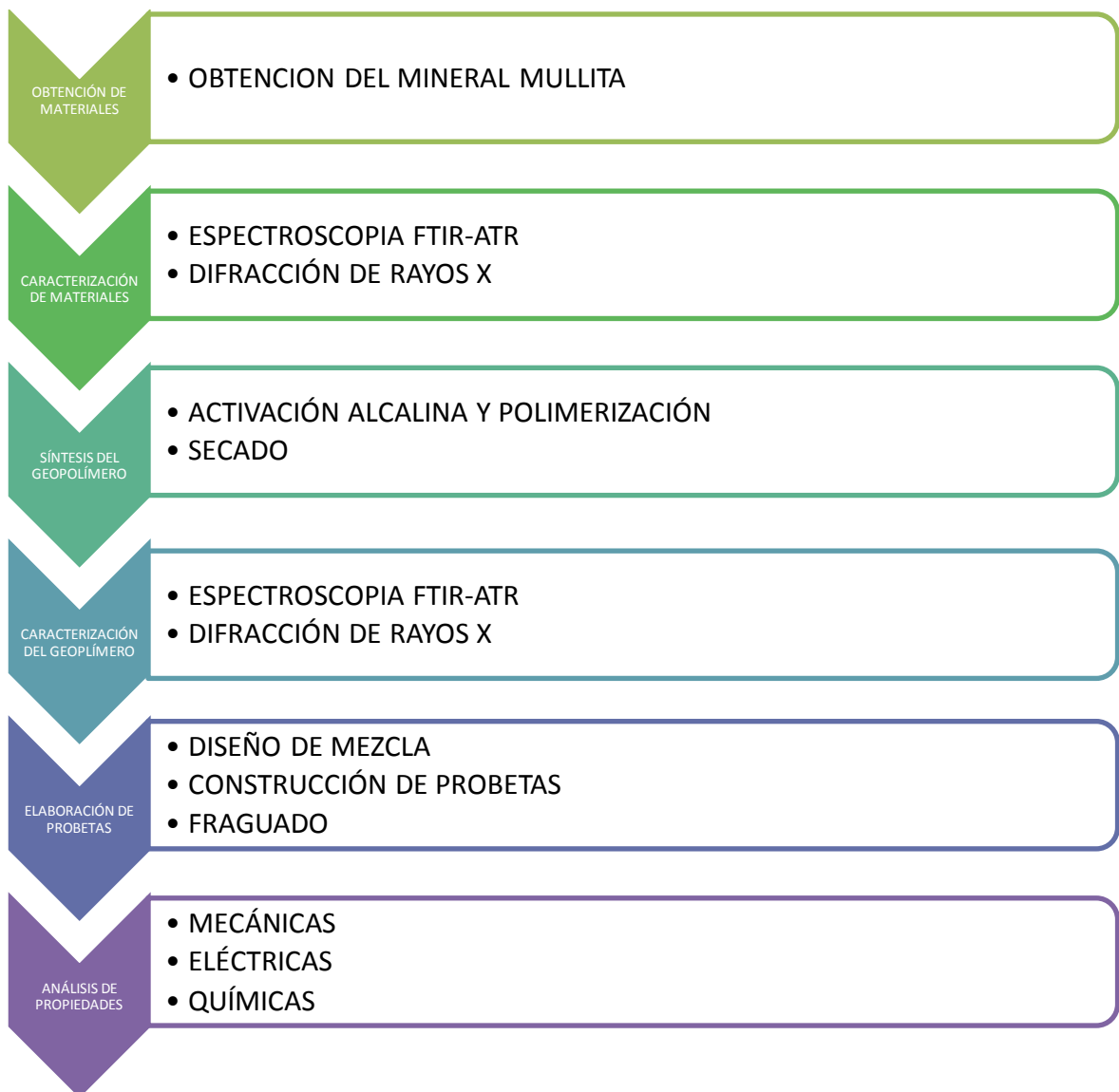
Mediante este ensayo de resistencia a la compresión se puede determinar las propiedades mecánicas de las probetas de concreto hechas con los materiales alternativos al cemento como las hechas con geopolímero y comparar dichas propiedades a las hechas con cemento portland convencional.

1.2.13 Método gravimétrico para determinar la velocidad de corrosión: La determinación de la velocidad de corrosión por este método se hace sometiendo el material en estudio a un ataque del agente corrosivo durante por periodos de tiempo bastantes largos. Una vez finalizado el ataque se determina el cambio de peso que el material experimenta con el fin de obtener la velocidad de corrosión en miligramos de material perdido por día transcurrido y dm^2 de área expuesta del material.

2. METODOLOGÍA

La **Figura 12** muestra un esquema que resume la metodología usada durante el desarrollo del presente trabajo.

Figura 12. Metodología propuesta para el desarrollo de la tesis de grado.



2.1 OBTENCION DEL MINERAL MULLITA

La caolinita se obtuvo como el componente principal del caolín pulverizado, caolín comercial de marca “Faraón” que se adquirió en la ferretería “ALDIA” en la ciudad de Bucaramanga. El material de caolinita se purificó realizando varias limpiezas con lavados de ácido oxálico, para la remoción de óxidos y blanqueo del caolín, caolín que posteriormente se secó al ambiente.

Mediante un tratamiento térmico que se realizó en un horno marca TERRIGENO modelo D8 serie 2163, ubicado en la Escuela de Química, laboratorio de Química Industrial, el material purificado de caolinita se calentó a razón de 10°C por minuto hasta que alcanzó una temperatura alrededor de 1300 °C, perdió agua y sufrió cambios químicos formando aluminosilicatos polimórficos que se transformaron en un material termoestable llamado mullita. [10]

Figura 13. Conversión térmica de caolín a mullita en un horno TERIGENO. Laboratorio de Química Industrial UIS.

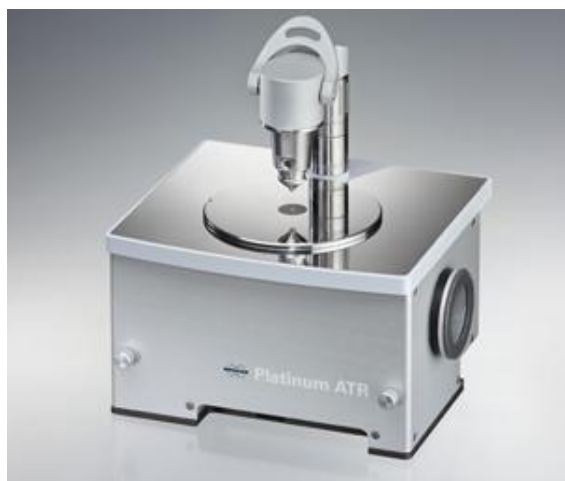


Fuente: Autor

2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

2.2.1. FTIR-ATR Espectroscopia Infrarroja de transformada de Fourier por la técnica ATR. Esta técnica instrumental no requirió una preparación de muestra previa. Se tomaron muestras en polvo de la caolinita ya purificada y del mineral mullita que se generó para el análisis por espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier con técnica de reflectancia total atenuada ó FTIR-ATR, en un espectroscopio marca BRUKER modelo Tensor 27 ubicado en la Escuela de Química, laboratorio de Análisis Instrumental, con el fin de identificar las bandas correspondientes a las vibraciones características a cada uno de los dos minerales.

Figura 14. Espectroscopio Bruker Tensor 27 y módulo ATR Platinun. Laboratorio de Química Industrial UIS.



Fuente: Autor

2.2.2 Difracción de Rayos x. Muestras de la caolinita purificada y de la mullita obtenida a través del tratamiento térmico se tomaron y se pasaron por un tamiz malla 400, lo anterior como preparación previa de la muestra, seguidamente se colocaron en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica

de llenado frontal, para el análisis de Difracción de Rayos X o DRX que se realizó en el Difractómetro marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de rayos X de la Escuela de Química, sede UIS Guatiguará.

Figura 15. Tamiz utilizado para preparación de muestras de caolín y mullita en DRX. Laboratorio de Química Industrial UIS.



Fuente: Autor

Figura 16. Difractómetro marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci.



Fuente: Autor

Los parámetros para el análisis de difracción de rayos X se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de medición de difracción de rayos x para muestras de partida.

Parámetro	Datos
Voltaje	40(kV)
Corriente	30(mA)
Rendija de Divergencia	0.6mm
Rendijas Soller Primario	2.5°
Muestreo	0.01526°
Rango de Medición	2theta 3.5-70°
Radiación	2theta CuK α 1
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0.4 segundos

2.3 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO A PARTIR DE MULLITA

2.3.1 Activación alcalina al mineral mullita y su posterior polimerización. Para la activación y polimerización, se colocó la mullita obtenida del tratamiento térmico del Caolín marca Faraón en una solución comercial de vidrio soluble (silicato de sodio- hidróxido de sodio) Na₂SO₃ de concentración 3,67 M, adquirido a Conquímica S.A., se adicionó arena fina marca Rio de Oro y óxido de aluminio Al₂O₃ en fino polvo adquirido en QUIMIREL Químicos y Reactivos Ltda. Se agitó hasta homogenizar la mezcla con ayuda de un agitador eléctrico-mecánico. La

polimerización se llevó cabo en un horno a una temperatura de 60 a 120°C durante un tiempo de 12 a 20 horas.

Figura 17. Preparación de la mezcla homogénea para la geopolimerización.



Fuente: Autor

Figura 18. Agitación constante en el proceso de geopolimerización.



Fuente: Autor

2.3.2 Secado de los geopolímeros. Después de que la mezcla geopolimérica secó y endureció, se secó en un horno a una temperatura alrededor de los 60°C durante 24 horas. Para su posterior trituración y pulverización, se pasaron por un molino de mordazas hasta alcanzar un tamaño de partículas uniforme, finalmente el material se trató en un molino de bolas.

Figura 19. (Izq) Geopolímero sintetizado endurecido y seco; (Der) geopolímero triturado y pulverizado.



Fuente: Autor

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOPOLÍMEROS

2.4.1 Espectroscopia Infrarroja. El geopolímero fue sometido a análisis por medio de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), donde se utilizó la técnica DE ATR (attenuated total reflection), esta técnica instrumental no requirió una preparación previa de la muestra. La medición fue llevada a cabo en el mismo espectrómetro Bruker modelo Tensor 27 mencionado anteriormente en el numeral 2.2.1.

2.4.2 Difracción de Rayos X. Se tomó una muestra del geopolímero, se maceró en un mortero de ágata (**Figura 20**) perteneciente a la escuela de ingeniería

química de la Universidad Industrial de Santander, la cual se pasó por un tamiz malla 400, posteriormente se le realizó el análisis de DRX con el mismo procedimiento y difractor al mencionado anteriormente en el numeral 2.2.2. Los parámetros utilizados para la medición fueron los mismos usados en la medición de caolín y mullita.

Figura 20. Preparación de muestra para difracción de rayos x muestra de geopolímero..



Fuente: Autor

2.5. CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO

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

2.5.2. Análisis de difracción de rayos X. La muestra de cemento fue pulverizada y tamizada hasta un tamaño de partícula de 38 μm a la cual se le realizó el análisis por DRX en el difractómetro BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, bajo las mismas condiciones y utilizando los mismos parámetros a los utilizados en las muestras de caolín y mullita.

Los resultados al análisis de difracción de rayos X del cemento se encuentran en el **Anexo B y C**.

Figura 21. Bulto de cemento portland tipo I marca Diamante utilizado en la elaboración de las probetas de concreto.



Fuente: Autor

2.6 ELABORACIÓN DE PROBETAS

2.6.1 Diseño de la mezcla. La mezcla de concreto se realizó de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 220 y 121, las cuales tienen como referencia el estándar internacional ASTM 109 y 150 respectivamente. Y estipula la siguiente composición por metro cubico de concreto:

- Agregado grueso: 1106 Kg/m³ Concreto
- Agregado fino: 1106 Kg/m³ Concreto
- Cemento: 392 Kg/m³ Concreto
- Agua: 200 Kg/m³ Concreto

El contenido de cemento en la mezcla de concreto, fue reemplazado en los siguientes porcentajes por el geopolímero que se obtuvo a partir del mineral mullita:

- 100% (solo geopolímero como agente cementante en la mezcla de concreto)
- 30% Geopolímero (7:3 relación cemento/geopolímero)
- 20% Geopolímero (8:2 relación cemento/geopolímero)
- 10% Geopolímero (9:1 relación cemento/geopolímero)
- 0% (Patrón, solo cemento portland “Diamante” Como agente cementante)

2.6.2 Construcción de probetas. En tubos de PVC se moldearon probetas de dos tamaños estándar. Probetas de 7,5 cm de diámetro y 15 cm de altura, que tuvieron como destino las pruebas de resistencia a la compresión, se elaboraron 50 probetas, diez por cada porcentaje de reemplazo de cemento. Y se probaron por duplicado en 5 tiempos distintos de fraguado: 7, 14, 28, 90, y 120 días.

Figura 22. Autor elaborando las probetas de concreto.



Fuente: Autor

Figura 23. Elaboración de probetas para fines de análisis Mecánico.



Fuente: Autor

Se elaboraron 25 probetas para análisis electroquímicos para el estudio de la corrosión, con dimensiones de 3 cm de diámetro por 6 cm de altura, estas probetas tenían en su interior un electrodo de grafito de 5 mm de espesor y largo suficiente para sobresalir por la parte superior, este varilla de grafito actuó como electrodo de referencia y contraelectrodo, esta se conectó al instrumento de medición eléctrica cuando se realizaron las pruebas electroquímicas. En su interior también tenían una varilla de acero de 5 mm de diámetro que también era más larga que el cuerpo de la probeta con la intención de que también sobresaliera para poder hacer las mediciones electroquímicas, ya que este actuó como electrodo de trabajo, en la predicción de la corrosión en el acero embebido en el concreto armado a condiciones severas de corrosión.

2.6.3 Fraguado. Las probetas construidas se dejaron endurecer durante un día, luego se desmoldaron, es decir se sacaron de los tubos de PVC y posteriormente se sumergieron en pilas repletas de agua hasta completar 7, 14, 28, 90 y 120 días de fraguado.

Tabla 4. Componentes mezcla de concreto para probetas con diferentes fines.

COMPONENTES	CLASES DE PROBETAS									
	PRUEBAS MECANICAS (15 cm de altura)					PRUEBAS ELECTROQUIMICAS (6 cm de altura)				
Agregado grueso	1106 Kg/m ³ Concreto									
Agregado fino	675.51Kg/m ³ Concreto					675. 51Kg/m ³ Concreto				
Relación porcentual Cemento/ geopolímero	100/0	90/10	80/20	70/30	0/100	100/0	90/10	80/20	70/30	0/100
Numero de probetas hechas	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5
Agua	200 Kg/m ³ Concreto					200 Kg/m ³ Concreto				

Figura 24. Elaboración de probetas 3cm de diámetro, para fines de análisis electroquímico.



Fuente: Autor

2.7 ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS CONCRETOS

Las probetas de concreto obtenidas se analizaron para determinar sus propiedades mecánicas, electroquímicas y químicas.

2.7.1 Análisis de propiedades mecánicas. Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en una máquina de ensayos universal INSOLTEC LTDA, situada en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, se evaluó por duplicado la resistencia a la compresión a la primera falla de cada una de las probetas de los hormigones con diferentes tiempos de fraguado de: 7, 14, 28, 90 y 120 días. [52]

Tanto el proceso de fabricación como el proceso de fraguado se realizaron en las instalaciones del grupo de investigación en química industrial y de polímeros de la Universidad Industrial de Santander bajo las normativas de ICONTEC NTC 1377 ICONTEC 1377. [53]

Figura 25. Autor realizando ensayos de resistencia mecánica a la compresión.



Fuente: Autor

2.7.2 Análisis de propiedades electroquímicas. Las probetas de concreto con diferentes porcentajes de geopolímero se sometieron a pruebas para el estudio de la velocidad de corrosión por medio de la técnica de Espectroscopia de Impedancia (EIS) y Resistencia a la Polarización Lineal (LPR), que se realizó en el Grupo de Investigación en Corrosión GIC de la Universidad Industrial de Santander, sede Guatigará. Para la realización de estas pruebas fue necesario utilizar como celdas electroquímicas las probetas de 3 cm de diámetro y 6 cm de largo, con los electrodos de grafito y acero en su interior.

Para este análisis se usaron probetas con porcentajes de geopolímero: 0%(Blanco), 10%, 20% y 30%. Todas las probetas tenían 90 días de fraguado en el momento en el que se les empezó a practicar los análisis para el seguimiento de la corrosión, por medio de la técnica Espectroscopia de impedancia electroquímica. Este ensayo se realizó teniendo en cuenta un rango de frecuencias de barrido igual a (200 KHz – 20 mHz), una amplitud de 50 mV y se empleó corriente alterna, con base en la norma ASTM G3:

En la **Figura 26** se muestra el equipo de medición de impedancias ACM Instruments en el que se realizaron las mediciones.

Figura 26. Equipo Potenciostato-Galvanostato ACM Instruments usado para medir impedancias. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.



Fuente: Autor

Para llevar a cabo los ensayos fue necesario recubrir la parte inferior de las probetas con una pintura epóxica para evitar que la solución de cloruros tuviera contacto directo con los electrodos y generara errores en la medición, ya que esta debía entrar en el cemento solo por permeabilización simulando las condiciones normales a las que se somete un hormigón armado en condiciones atmosféricas. Para ello se marcó con una línea en la probeta un límite para que solución de cloruros tampoco alcanzara los electrodos por la parte superior donde la se mediría los valores de impedancias, además se lijaba la parte superior de los electrodos de la probeta en cada medida para que hubiera un buen contacto entre el instrumento y los electrodos, en la **Figura 27** se ilustra el montaje para la medición para una probeta y la disposición de las conexiones en los electrodos de trabajo y referencia.

Figura 27. Montaje utilizado para la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.



Fuente: Autor

Las probetas se sumergieron en una solución de cloruro de sodio al 2 %, junto con un burbujeo constante de aire durante varios días, para garantizar la saturación de oxígeno en la solución, con la finalidad de simular condiciones extremas ambientales a las que se ven sometidos los concretos con el transcurso del tiempo en meses o años, y poder analizar la velocidad y la intensidad del proceso de corrosión en un periodo de tiempo de pocos días.

Figura 28. Probetas sumergidas en solución de cloruro de sodio y saturada de oxígeno. Grupo de Investigación a la Corrosión GIC, UIS.



Fuente: Autor

Los análisis de las propiedades electroquímicas se realizaron con las probetas de 90 días de fraguado. A partir de la preparación de las muestras las mediciones se hicieron en los días, 1, 2, 3, 4, 8 y 11, habiéndose iniciado la inmersión en el día 1. Los resultados correspondientes a las medidas de impedancia se encuentran en los **Anexos D, E, F y G**.

2.7.3 Análisis de propiedades químicas. A los concretos con mayor resistencia mecánica se les determinó la resistencia a ataques químicos de sulfatos, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio según las especificaciones técnicas NTC 321, la Norma ASTM C-150 y C-88

Con el fin de determinar la resistencia a los ataques químicos de los concretos elaborados, se tomaron pequeños sólidos de referencia de las probetas blanco, 10% y 100%, todas con 120 días de fraguado y se sumergieron en soluciones de ácido (H_2SO_4), base (NaOH) y sal (Na_2SO_4).

Estas pruebas químicas tuvieron como objetivo, analizar el comportamiento de los concretos en cuanto a resistencia a los ataques químicos, la prueba se realizó por gravimetría y donde se compararon los valores de masa perdidos de los concretos a base de geopolímero con los concretos a base de cemento.

Figura 29. Trozos de probetas sumergidas en distintas soluciones corrosivas.



Fuente: Autor

Los sólidos se pesaron 3 veces, la primera para registrar su peso inicial, la segunda después de estar sumergidos durante 1 día y la tercera después de estar sumergidos 2 días. Cabe aclarar que cada vez que los sólidos fueron retirados de la solución se secaron previamente en una estufa a una temperatura de $100^{\circ} C$.

Figura 30. Muestras de Trozos de probetas secándose en el horno a 100°C.
Laboratorio de Química Industrial UIS.



Fuente: Autor

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 OBTENCIÓN DE MULLITA Y GEOPOLIMERO

Mediante tratamiento térmico el material purificado de caolinita se calentó a razón de 10°C por minuto y alcanzó una temperatura de 1300 °C, perdió agua y formó alúmino-silicatos polimórficos, liberando sílice, finalmente se convirtió en un material que tenía por composición mineral mullita y cuarzo.

Con este material de composición principalmente de alúmino-silicatos se procedió realizar la reacción de geopolimerización. Este proceso como se mostró anteriormente en el marco teórico, no libera directamente CO₂ de la reacción como lo hace la generación del clinker de cemento.

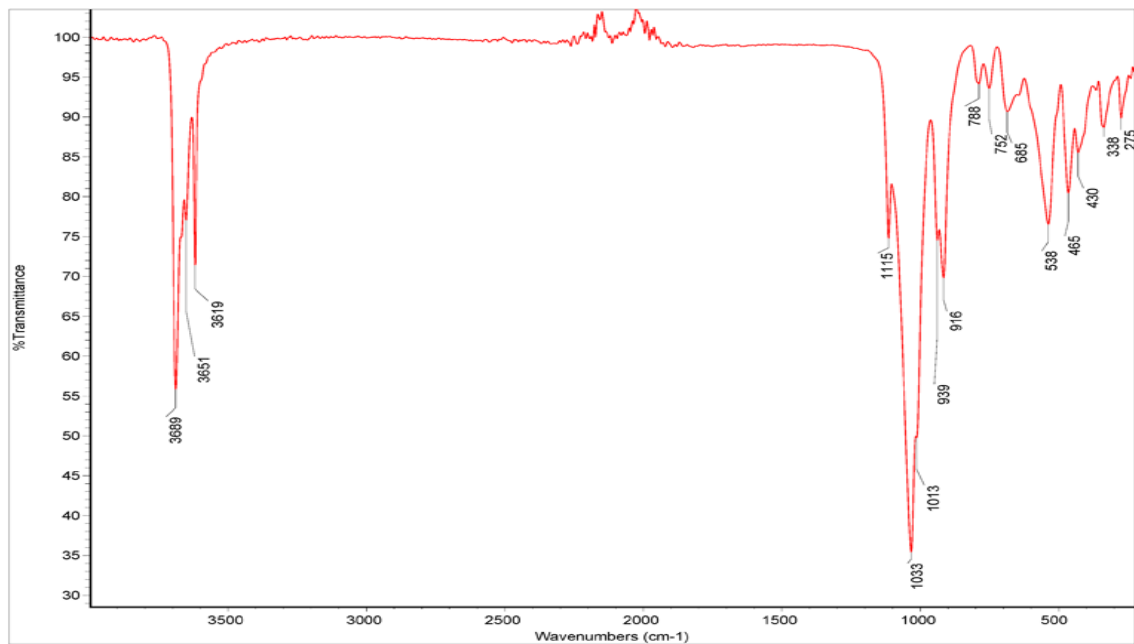
3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.2.1 FTIR-ATR Espectroscopia Infrarroja de transformada de Fourier por la técnica ATR. Después de obtener el mineral se procedió con dos tipos de análisis estructurales, con el fin de comprobar la transformación que se dio lugar entre el material de partida y final.

En el espectro de infrarrojo del caolín encontrado en la literatura y presentado posteriormente se pueden apreciar las bandas correspondientes a las tensiones O-H alrededor de los 3600 cm⁻¹ en 3689; 3651 y 3619cm⁻¹, bandas de tensiones Si-O por encima de los 1000cm⁻¹ en 1013; 1033 y 1115 cm⁻¹, flexiones de los grupos Al-O alrededor de los 900 cm⁻¹ en 939 y 916cm⁻¹ y picos correspondientes a las tensiones Si-O propias del cuarzo alrededor de los 800 cm⁻¹.

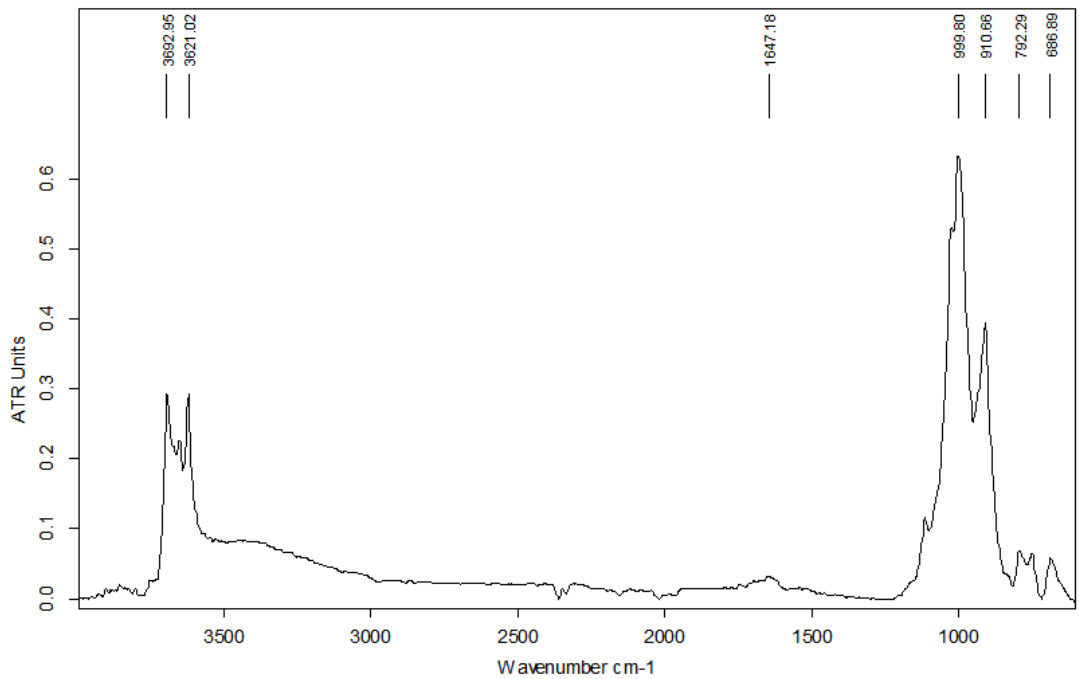
El espectro infrarrojo obtenido de la muestra por la técnica ATR del material de caolinita que fue previamente purificada y macerada (**Figura 32**) son visibles bandas en 3692 y 3621 cm^{-1} correspondientes a las tensiones O-H, un pico en 999.8 cm^{-1} y otros de menor intensidad a números de onda un poco mayores cercanos a los 1000 cm^{-1} correspondientes a las bandas de tensiones Si-O, un pico en 910 cm^{-1} correspondientes a las tensiones Al-O-Si, y otros picos en números de onda menores en 792 y 686 cm^{-1} propias de tensiones Si-O.

Figura 31. Espectro FTIR del caolín encontrado en la revisión bibliográfica.



Fuente: [54]

Figura 32. Espectro FTIR-ATR obtenido de la muestra de caolín comercial.



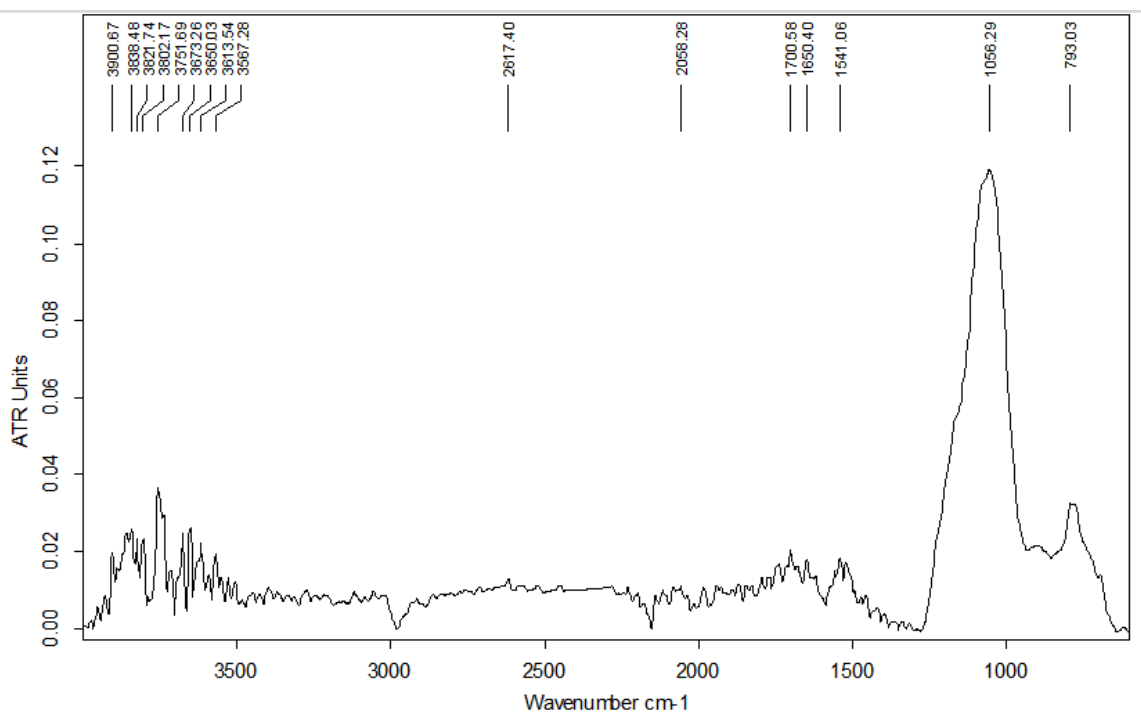
Fuente: Autor

En el espectro infrarrojo encontrado en la revisión bibliográfica del mineral mullita se puede apreciar que no existen las vibraciones de tensión propias de los grupos OH, y se observan bandas de tensiones Si-O superiores a los 1000 cm^{-1} en 1137 y 1152 cm^{-1} . Una banda cercana a los 900 cm^{-1} en 882 cm^{-1} correspondiente al grupo Al-O y bandas ubicadas en menores números de ondas alrededor de los 700 cm^{-1} correspondientes al cuarzo.

En el espectro obtenido a la muestra después del tratamiento térmico del caolín (**Figura 33**) se observa la usencia total de las bandas propias del OH en la región cercana de los 3500 cm^{-1} , lo cual permite inferir que se llevó a cabo una transformación en la que se perdió agua de constitución presente en el caolín.

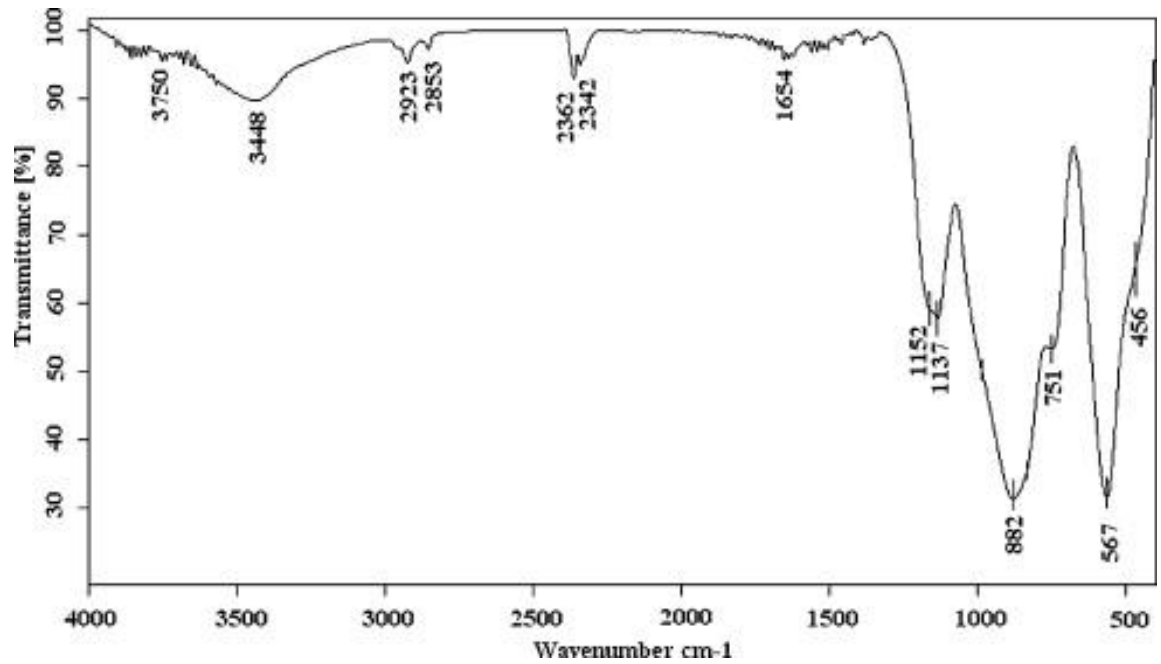
Las bandas características de los aluminosilicatos se encuentran alrededor de $1056,29\text{ cm}^{-1}$ debido al cambio estructural interno sufrido por el calentamiento a altas temperaturas. Y se puede apreciar un pico en 793 cm^{-1} propio del SiO_2 presente.

Figura 33. Espectro FTIR-ATR obtenido de la mullita generada a partir del tratamiento térmico del caolín comercial.



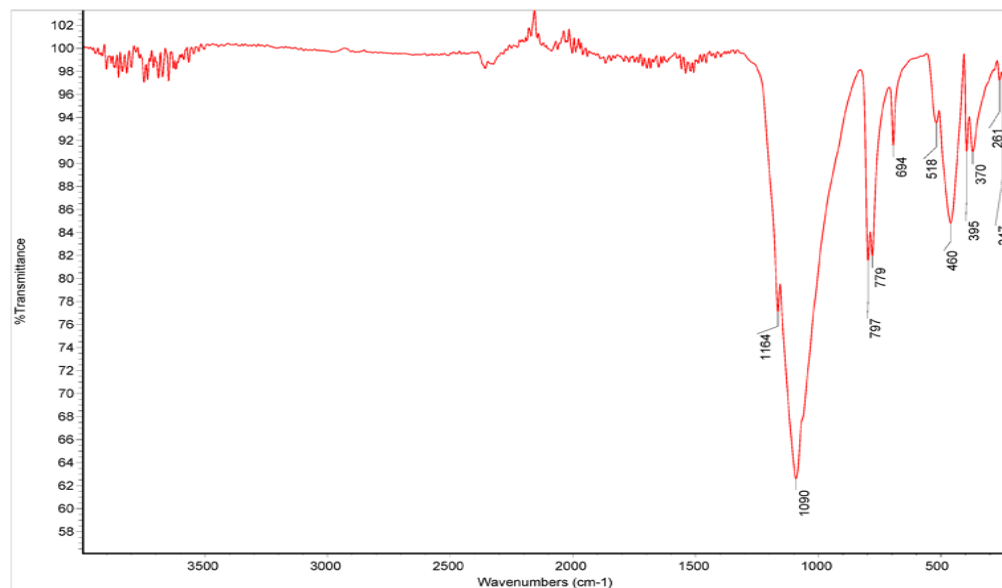
Fuente: Autor

Figura 34. Espectro FTIR de la mullita que se encuentra reportado en la literatura.



Fuente: [55]

Figura 35. Espectro FTIR del cuarzo que se encuentra reportado en la literatura.



Fuente: [54]

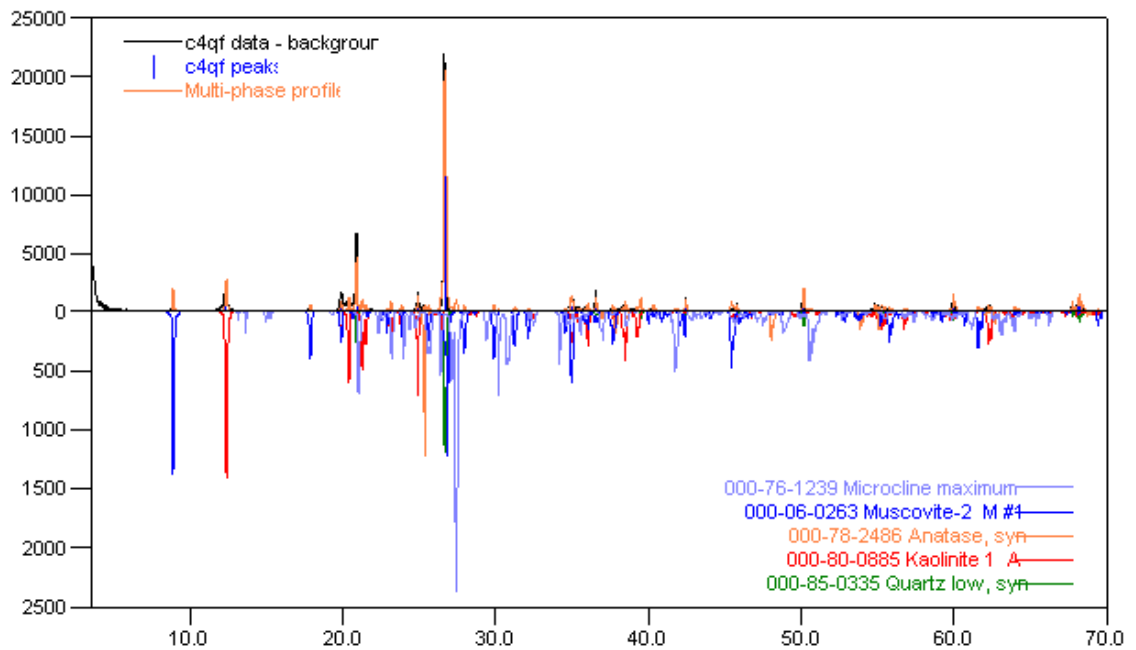
3.2.2 Difracción de Rayos x. Los espectros de difracción de rayos x de la muestra de caolín y mullita fueron analizados mediante el software **SearchMatch1** y la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción **ICDD**.

En el difractograma de la muestra de caolín presentado en la **Figura 36** se confirma la presencia de la fase caolín, también se observa la presencia de fases como moscovita, anatasa, microclina y cuarzo según se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del caolín.

FASES PRESENTES	REFLEXIONES 2 θ	Nº DE TARJETA PDF-2
Caolinita	12,342	000-80-0885
	20,354	
	38,466	
Moscovita	8,839	000-06-0263
	17,776	
	31,251	
Anatasa	27,435	000-78-2486
Cuarzo	20,851	000-85-0335
	36,538	
	67,713	
Microclina	27,435	000-76-1239

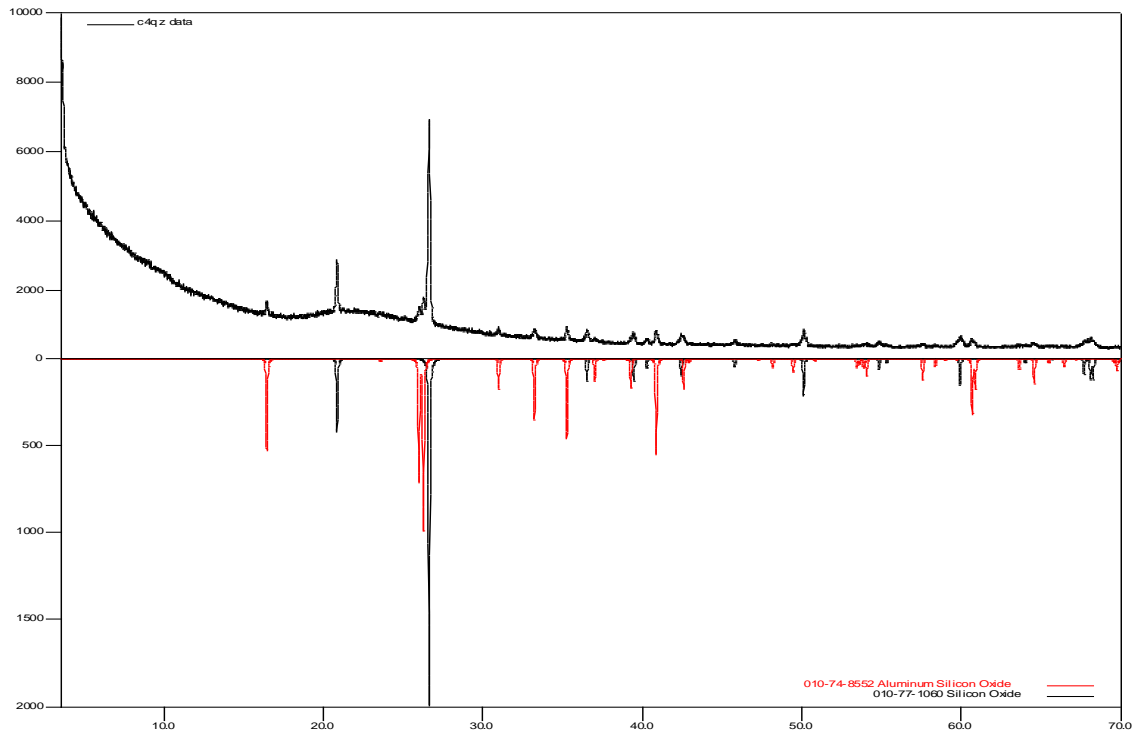
Figura 36. Difractograma obtenido de la muestra del caolín comercial.



Fuente: Autor

En el difractograma obtenido de la muestra identificada como mullita presentado en la **Figura 37**, se pueden apreciar dos fases principalmente: cuarzo y mullita, que se enuncian con mayor detalle en la **Tabla 5**, corroborando la presencia de mullita en la muestra y la desaparición de la fase caolinita, haciéndose también poco significantes las fases moscovita, anatasa y microlina exceptuando la fase cuarzo por ser un subproducto de la transformación del alúmino-silicato a mullita en el tratamiento térmico.

Figura 37. Difractograma obtenido de la mullita que fue generada a partir del tratamiento térmico del caolín comercial.



Fuente: Autor

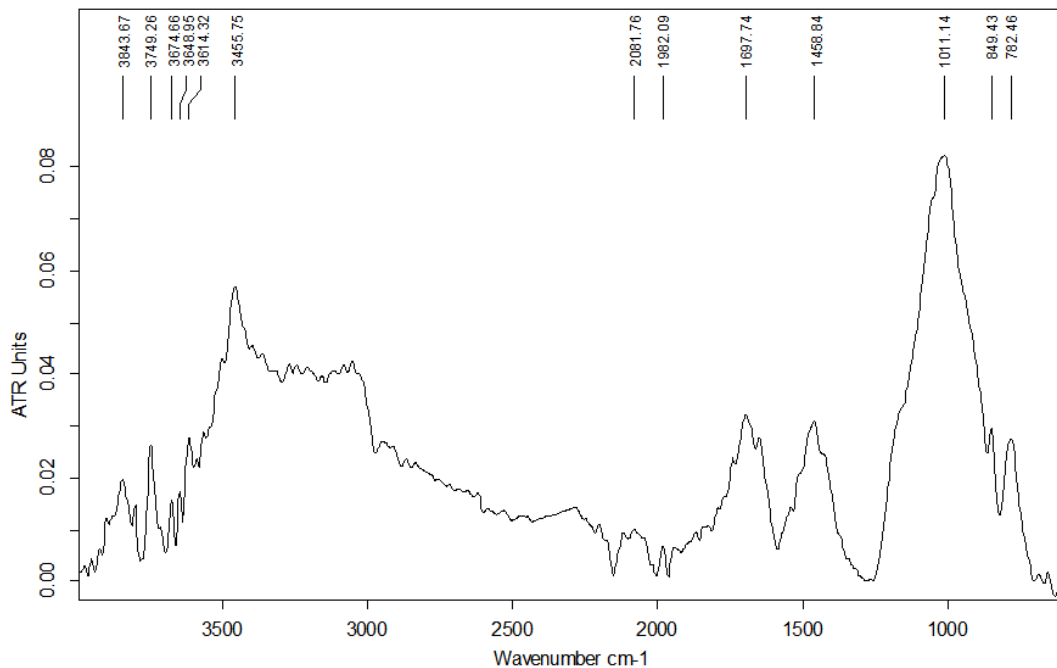
Tabla 6. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción de la mullita.

NOMBRE	FASE CRISTALINA	N° DE TARJETA PDF-2
Cuarzo	Si O ₂	010-77-1060
Mullita	Al ₂ (Al _{2.556} Si _{1.444}) O _{9.722}	010-74-8552

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOPOLIMEROS

3.3.1 Espectroscopia infrarroja. En el espectro infrarrojo FTIR-ATR para la muestra del geopolímero obtenido a partir de mullita que es presentado en la **Figura 38**, se observa la banda propia del enlace Al-O-Si ubicada en 1011 cm^{-1} , se pueden observar también las bandas correspondientes a los grupos OH generados durante el proceso de geopolimerización y por la interacción con la solución activadora alcalina, en números de onda alrededor de los 3500 cm^{-1} , cabe notar que estas bandas no se presentan en el espectro infrarrojo de la muestra de mullita, también se pueden apreciar bandas correspondientes a tensiones de los grupos silicatos en 1458 cm^{-1} y a tensiones de C=O a 1697 cm^{-1} provenientes de la calcita presente en el geopolímero.

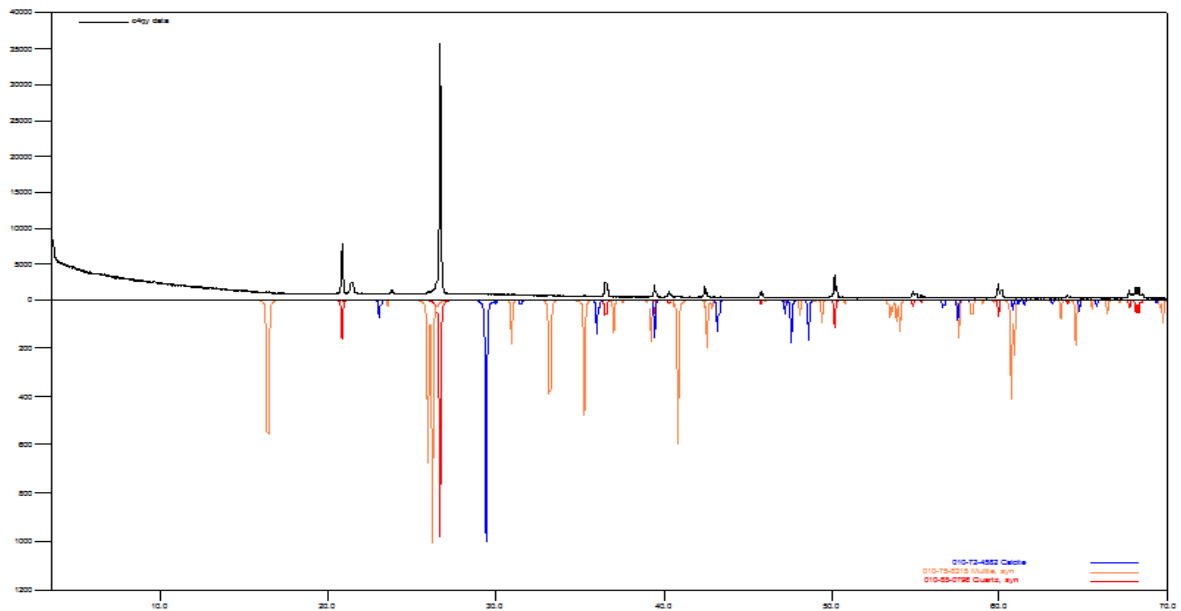
Figura 38. Espectro FTIR-ATR obtenido del Geopolímero generado a partir del mineral mullita.



Fuente: Autor

3.3.2 Difracción de rayos X. El difractograma correspondiente a la muestra el geopolímero obtenido a partir de mullita, se analizó en el software SearchMatch1 y la base de datos de la ICDD, donde se pudo determinar las tres principales fases (**tabla 7**), están presentes las fases de mullita, calcita y cuarzo, no se pueden observar más fases debido a que el geopolímero obtenido es de naturaleza amorfa.

Figura 39. Difractograma obtenido del Geopolímero generado a partir del mineral mullita.



Fuente: Autor

Tabla 7. Reflexiones principales encontradas para el difractograma del geopolímero.

NOMBRE	FASE CRISTALINA	N° DE TARJETA PDF-2
Cuarzo	Si O ₂	010-85-0796
Mullita	Al _{4.56} Si _{1.44} O _{9.72}	010-75-8315
Calcita	Ca CO ₃	010-72-4582

3.4 ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS CONCRETOS

3.4.1 Análisis de las pruebas de resistencia mecánica a la compresión. Los resultados de las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión para todas las probetas de 15 cm de longitud se reportan en la **Tabla 8** presentada a continuación.

Tabla 8. Resultados a las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión.

Kgf/cm2	7 días		14 días		28 días		90 días		120 días	
Blanco(0% Geo)	196,9	183,3	210,5	217,3	269,4	273,9	282,9	273,9	280,7	285,2
10% Geo	196,9	194,7	228,6	233,1	280,7	273,9	282,9	282,9	285,2	287,5
20% Geo	158,4	156,2	160,7	165,2	181,1	183,3	190,1	190,1	192,4	190,1
30% Geo	101,9	90,5	79,2	83,8	47,5	54,3	47,5	52,1	45,3	49,8
100% Geo	63,4	58,9	61,1	63,4	63,4	56,6	67,9	61,1	67,9	65,6

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 121 o el estándar internacional ASTM C-150, el valor mínimo que debe tener una probeta de concreto hecha con cemento Portland tipo 1 de resistencia mecánica a la compresión es de 240 Kgf/cm² o 23 Mpa a partir de los 28 días de fraguado.

Todas las probetas de concreto hechas a base de cemento con o sin geopolímero presentadas en la tabla anterior, fueron fabricadas bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad, presión atmosférica, técnica de llenado de los moldes, golpeteo de aprisionamiento, agregados grueso y fino, etc., con el fin de poder realizar comparaciones con la mayor fidelidad en los datos obtenidos.

Se puede encontrar que el valor para la resistencia a la compresión de las probetas blanco, al tiempo de los 28 días de fraguado ya tenían una resistencia mayor a la de la requerida por la norma, después a los 90 y 120 días de fraguado siguió aumentando la resistencia pero esta resistencia no fue muy significativa.

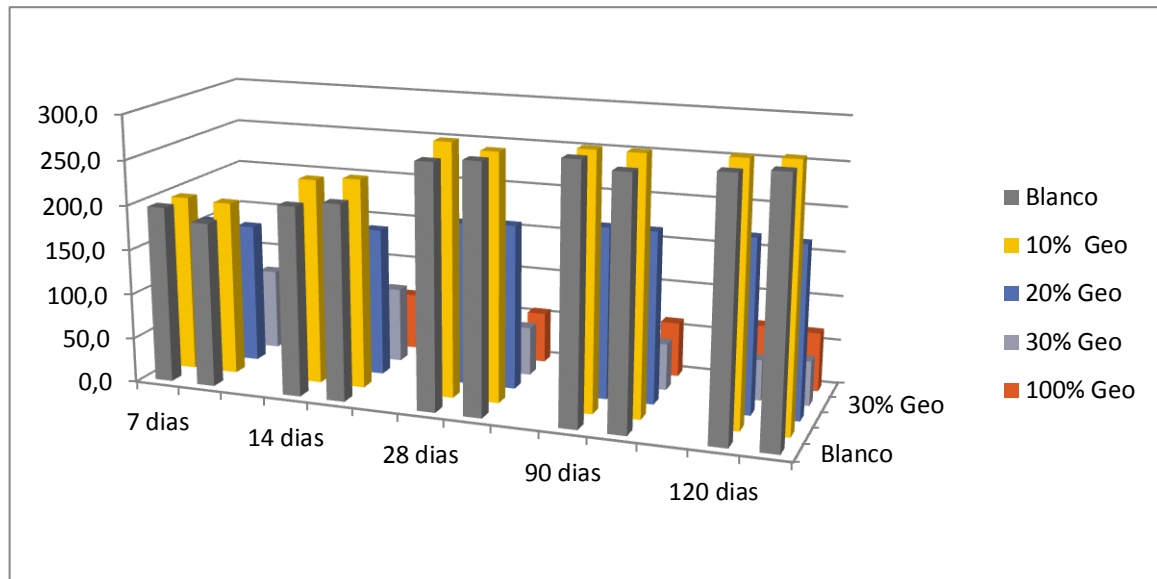
Este comportamiento se puede apreciar en las probetas de 10 y 20 % de reemplazo de cemento por geopolímero en su formulación.

Las probetas con un porcentaje de reemplazo de geopolímero por cemento del 30% tienden a perder resistencia a la compresión con el aumento de los días de fraguado y las probetas realizadas con geopolímero como único agente cementante tienen los menores valores de resistencia mecánica a la compresión pero al parecer alcanzan su máximo desde los primeros días y tienden a mantenerlo constante con el pasar de los días de fraguado.

Las probetas a las que les fue reemplazado el 10% de cemento por geopolímero fueron las únicas que presentaron una resistencia mecánica superior a las del blanco y por ende también cumplieron con el estándar requerido de 240Kgf/cm².

Los resultados al ensayo de resistencia mecánica a la compresión presentados en la **Tabla 8**, se muestran en la **Figura 40**, como un diagrama de columnas con el fin de poder apreciar el comportamiento general y cuáles de las probetas obtuvieron los mejores desempeños mecánicos. Cada par de barras representa un tipo de probeta ya que las pruebas se realizaron por duplicado, si se avanza horizontalmente de izquierda a derecha se aprecia el aumento en los días de fraguado que son 7, 14, 28, 90 y 120 días y si se avanza hacia la profundidad se aprecia el aumento en la cantidad de cemento reemplazado por geopolímero que son en 0%(Blanco), 10%, 20%, 30% y 100% de geopolímero.

Figura 40. Comparación de los valores obtenidos de resistencia a la compresión en Kg/cm² de las diferentes probetas de concreto.



Fuente: Autor

3.4.2 Análisis de las pruebas electroquímicas. Se realizaron las pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica para la determinación de las corrientes y velocidades de corrosión del acero embebido en concreto con el que comúnmente se refuerzan las estructuras de hormigón. Los resultados de estas pruebas se presentan como diagramas de Nyquist y diagramas de Bode, relacionando la impedancia resistiva, la impedancia capacitiva, la norma de la impedancia, la norma de la frecuencia y el ángulo de fase en los **Anexos D, E, F, G y H.**

Las **Figuras 41, 42, 43 y 44** corresponden a los diagramas de Nyquist superpuestos para todos días de medición, a cada una de las probetas de 0, 10, 20 y 30% de geopolímero en reemplazo de cemento. Todas las probetas tenían un tiempo de fraguado de 90 días.

Como se puede observar en las **Figuras 41, 42, 43 y 44** los diagramas de Nyquist de todas las probetas tienen un comportamiento similar con respecto al tiempo, los

valores de las impedancias tanto del componente real y del componente imaginario son mayores para el día 1 y para el día 11. Tal comportamiento se explica de la siguiente manera.

En el día uno a las probetas se les realizó la medición sin aún estar sometidas o sumergidas en el ambiente altamente corrosivo, el acero dentro de la probeta permanecía prácticamente libre de corrosión en su superficie. De esta forma las probetas al estar secas y limpias, no estaban muy propensas a iniciar un proceso de corrosión; al aplicar un voltaje empezaría a formarse una delgada capa de óxido sobre la superficie del acero, ayudada por la matriz de cemento o geopolímero que la recubre, capa que así misma actuaría como protección disminuyendo la corrosión del acero posteriormente, de ahí el valor alto medido para la impedancia en el día 1 de todas las probetas.

En las **Figuras 45 y 46** se muestran únicamente los valores de impedancia para los días intermedios 2, 3, 4 y 8 de las probetas de 10% y 0% de geopolímero, con el fin de poder apreciar la disminución en los valores medidos de impedancia con el pasar del tiempo hasta el día 8, este patrón de comportamiento sucede para todas las probetas de las diferentes concentraciones como se puede apreciar en los Diagramas de Nyquist de los **Anexos D, E, F y G**.

Este comportamiento se puede explicar si se tiene en cuenta que después de haberse formado la capa protectora que permite la pasivación del metal, esta empieza a sufrir de manera progresiva y permanente, la acción del ambiente corrosivo de la solución salina y saturada de oxígeno, en el que fueron sometidas las probetas, desnaturalizándose lentamente por efectos de solvatación y sufriendo pequeñas fracturas a causa del aumento del tamaño de los productos de la corrosión generándose bordes de grano que facilitan cada vez más el fenómeno de corrosión.

Con el pasar de los días se va degenerando y deformando la capa protectora, los valores de impedancia disminuyen y se observa un aumento en los valores de velocidad y corrientes de corrosión, como se registra en la **Tabla 9**. Estos valores de Corriente de corrosión (*icorr*) se pueden apreciar en la **Figura 48**. Donde se puede observar el aumento en los valores de corriente de corrosión con el pasar de los días.

En el día 11, se observa un pequeño aumento en los valores de impedancia, evidenciándose en una leve disminución en la corriente de corrosión como se ve en la **Figura 48**. Se presume que esto se debe a la formación de una nueva capa de óxido, pero con una naturaleza menos estable a la formada inicialmente en el día 1 y esta no proporciona una protección realmente grande al acero de la matriz.

Analizando el comportamiento de todas las probetas de concreto y sus velocidades de corrosión mostradas en la **Figura 48**, se puede inferir que todas presentaron una tendencia similar de resistencia a la corrosión, con valores bajos de *icorr* para el día 1 y el día 11, con valores *icorr* que aumentaban a partir del segundo día de medición hasta el día 8.

En la **Figura 48** se puede observar que las probetas con 10% de geopolímero presentaron los valores más altos de corriente de corrosión y por consiguiente mayores velocidades de corrosión, seguidas de las probetas de 20 y 30% respectivamente. A su vez cada probeta con algún porcentaje de geopolímero presentaron mayores velocidades de corrosión que sus respectivas probetas de cemento, sin embargo fue la de menor concentración (10%) de geopolímero la que obtuvo las velocidades de corrosión mayores. Posiblemente esto es debido a que el geopolímero contribuye a acelerar la desnaturalización de la capa pasivante del acero en la matriz de concreto por causa de sus componentes oxidantes.

Figura 41. Diagramas de Nyquist de los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 para la probeta de 0% de geopolímero.

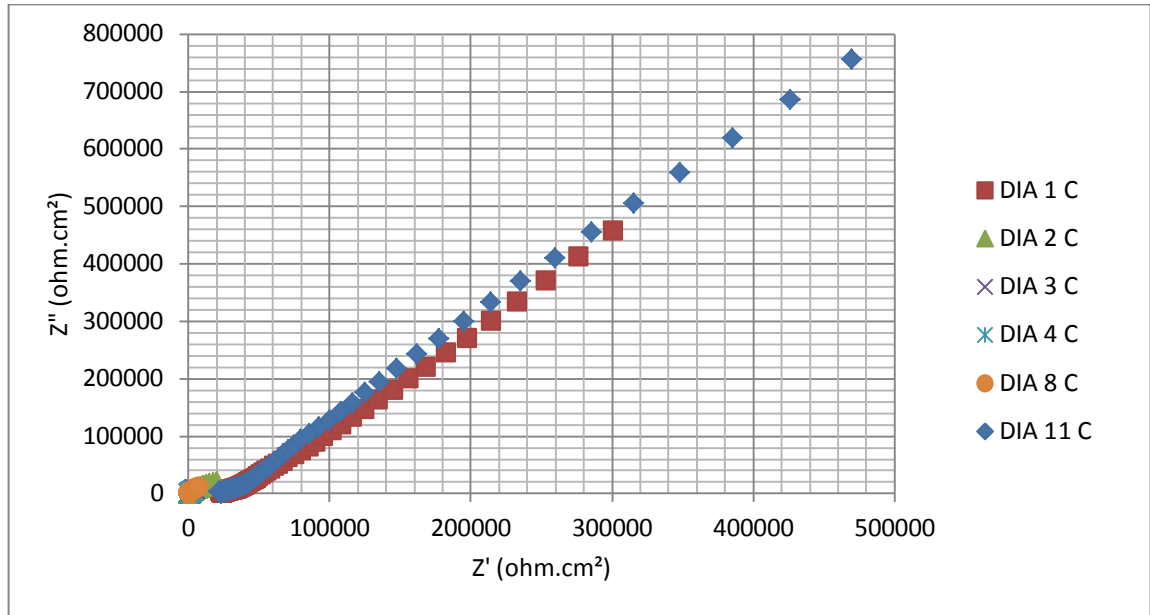


Figura 42. Diagramas de Nyquist de los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11, de la probeta de 10% de reemplazo de cemento por geopolímero.

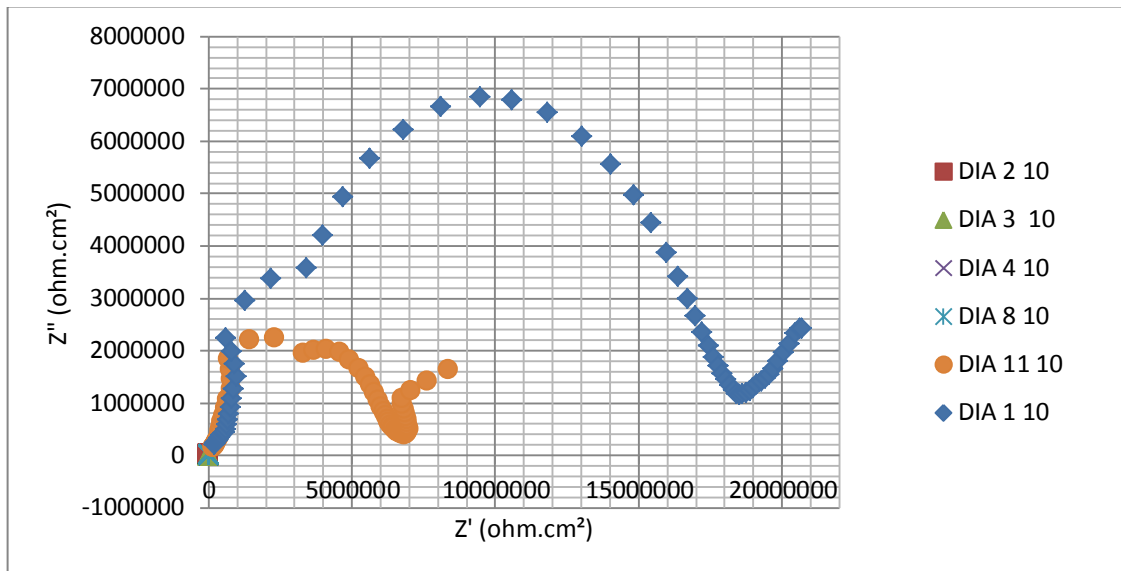


Figura 43. Diagramas de Nyquist para los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 de la probeta de 20 % Geopolímero.

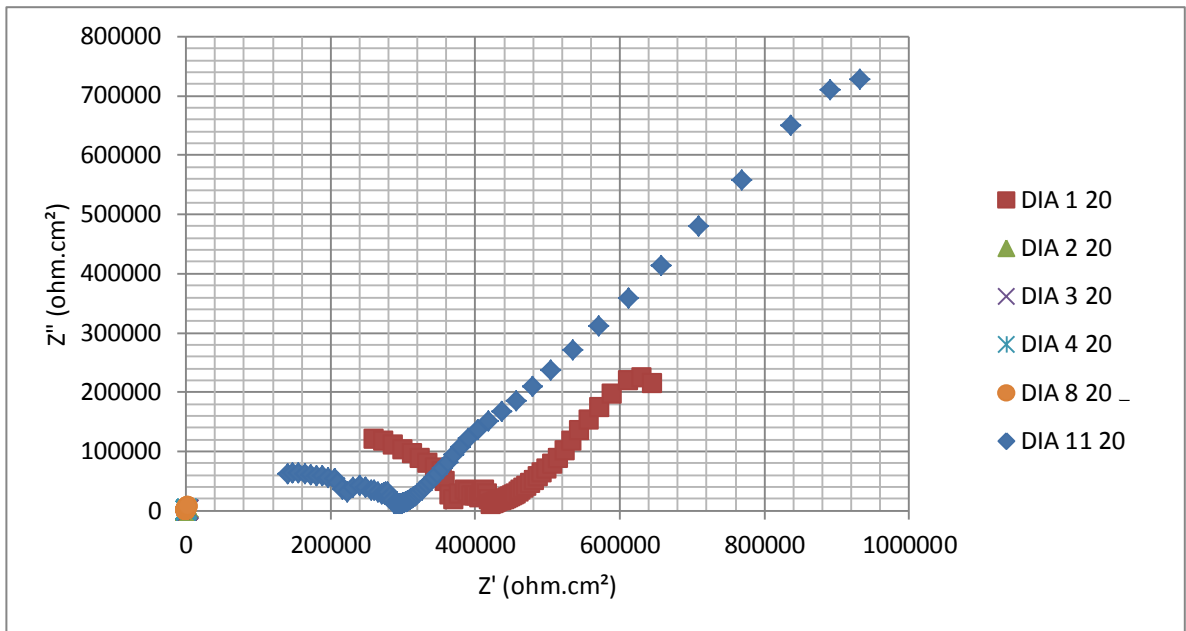


Figura 44. Diagramas de Nyquist para los días 1, 2, 3, 4, 8 y 11 de la probeta de 30 % Geopolímero.

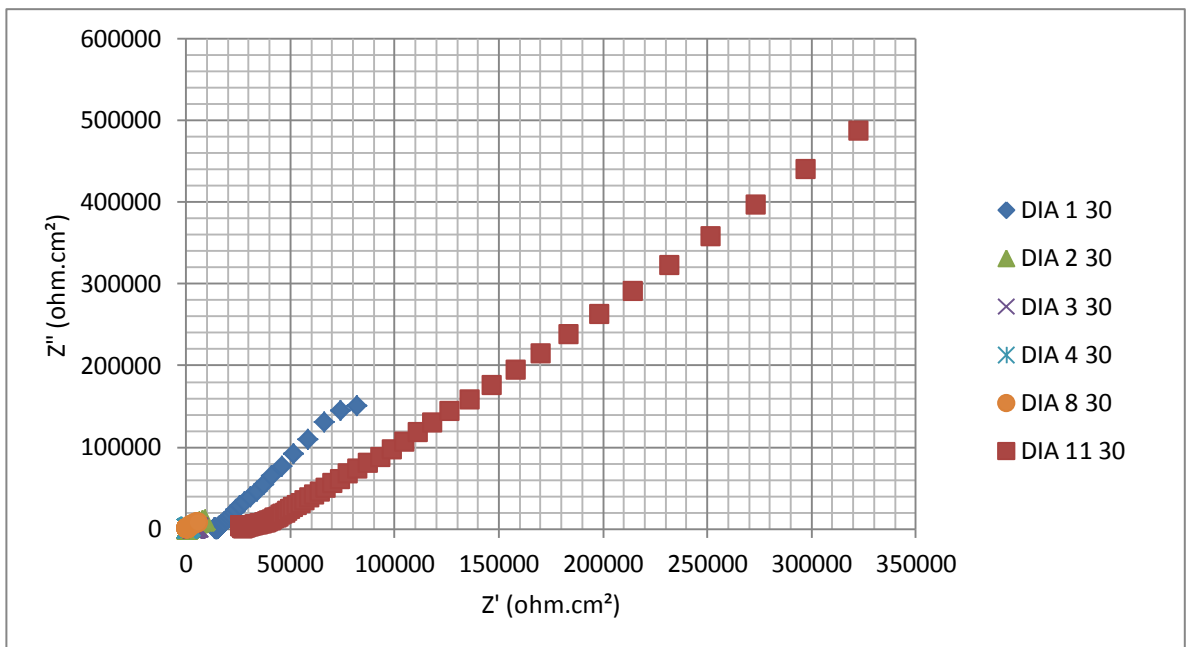


Figura 45. Diagramas de Nyquist para los días 2, 3, 4 y 8 de la probeta de 10%.

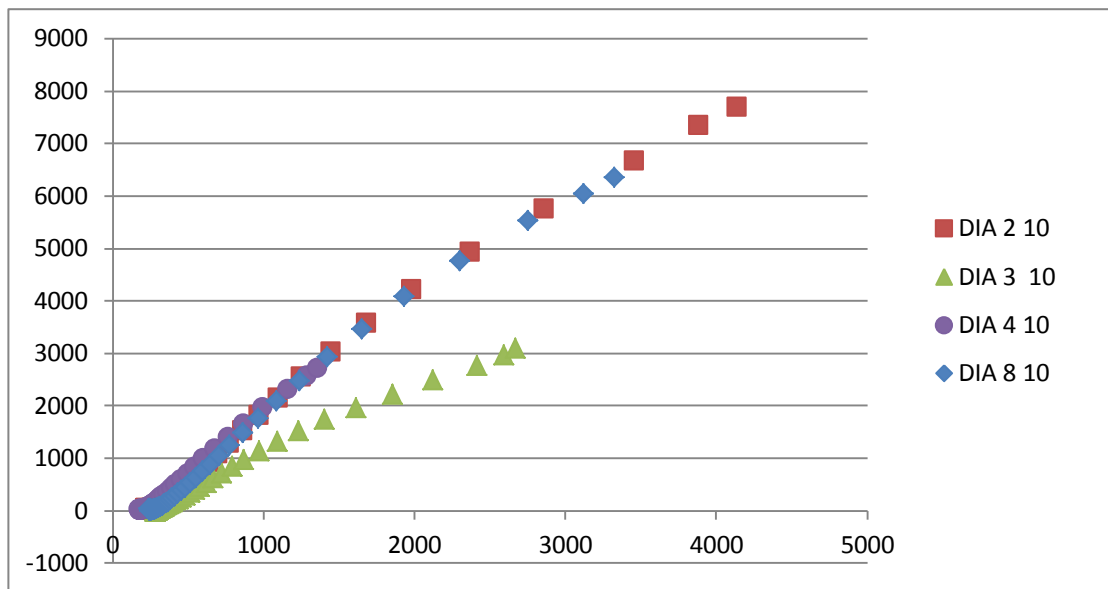
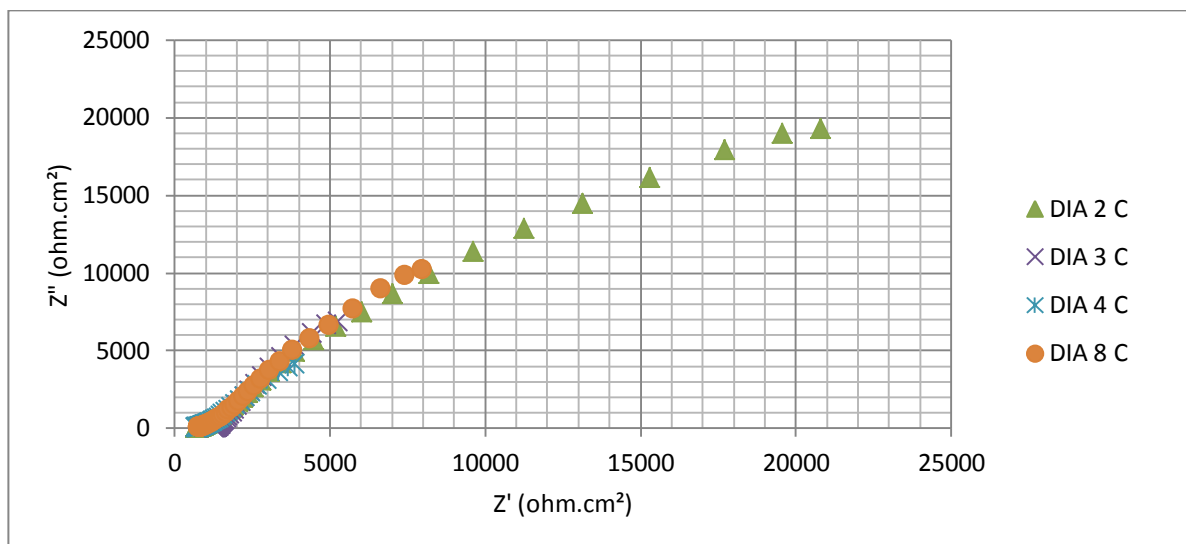
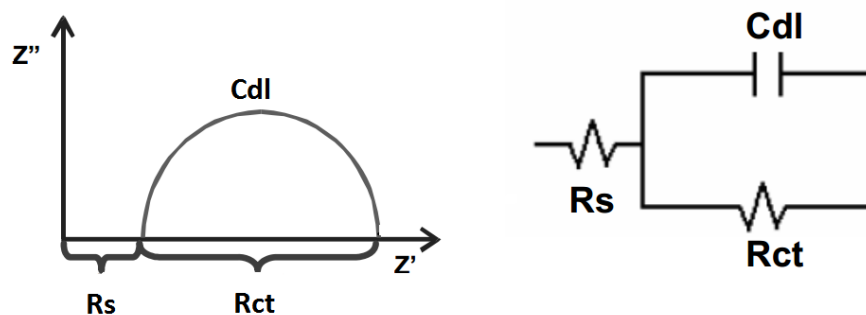


Figura 46. Diagramas de Nyquist para los días 2, 3, 4 y 8 de la probeta blanco 0% de geopolímero.



Para la determinación de los parámetros importantes en el estudio de la corrosión en la varilla de acero embebida en el concreto, se determinaron los valores que proporcionaron los diagramas de Nyquist y Bode, de resistencia de la Solución (R_{sol}) y resistencia a la polarización (R_p) siguiendo todos un modelo simple del circuito de Randles como el mostrado en la **Figura 47**, para describir el comportamiento del sistema del material compuesto.

Figura 47. Circuito equivalente de Randles.



Fuente: Autor

Los valores para los componentes del circuito equivalente en cada probeta a cada día se muestran en la **Tabla 9**.

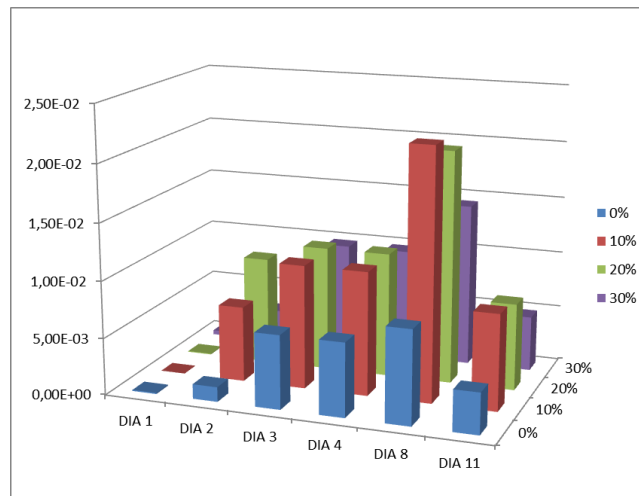
Tabla 9. Valores de los diferentes componentes de los circuitos equivalentes de Randles sencillos para cada probeta, a los diferentes días de análisis.

PROBETAS	DIA	R_{sol} (ohm*cm ²)	R_p+R_{sol}	R_p (ohm*cm ²)	C_p (μF)	F_{max} HZ	i_{corr} mA/cm ²	RateCorr mm/year
0%	1	23525	301220	277695	5,7313E-05	0,01	9,3628E-05	0,001187108
	2	693,21	20817	20123,79	0,00079088	0,01	0,001292	0,016381308
	3	1254,4	5265	4010,6	0,00057512	0,069	0,00648282	0,082195681
	4	699,83	3861	3161,17	0,00058543	0,086	0,0082248	0,104282275
	8	779,25	7984,8	7205,55	0,00220878	0,01	0,00360833	0,045750012
	11	22275	470070	447795	9,8727E-06	0,036	5,8062E-05	0,000736172
10%	1	191870	20700000	20508130	1,694E-10	45,812	1,2678E-06	1,60743E-05
	2	222,41	4139,2	3916,79	0,00090298	0,045	0,00663809	0,084164328

PROBETAS	DIA	Rsol (ohm*cm2)	Rp+Rsol	Rp (ohm*cm2)	Cp (μF)	Fmax HZ	icorr mA/cm2	RateCorr mm/year
	3	285,25	2672,5	2387,25	0,00077522	0,086	0,01089119	0,138089433
	4	179,78	1361,4	1181,62	0,00084182	0,16	0,02200369	0,278984784
	8	243,05	3323,7	3080,65	0,00092255	0,056	0,00843978	0,107007937
	11	152440	8363500	8211060	9,3187E-11	208	3,1665E-06	4,01476E-05
20%	1	260530	646100	385570	4,1278E-06	0,1	6,7433E-05	0,000854978
	2	239,02	2987,7	2748,68	0,00082717	0,07	0,00945909	0,119931749
	3	1388	3754,1	2366,1	0,0004204	0,16	0,01098855	0,139323782
	4	218,13	1489,8	1271,67	0,00096272	0,13	0,02044556	0,259229203
	8	250,51	3656,7	3406,19	0,00103834	0,045	0,00763316	0,096780861
	11	141260	932260	791000	2,0121E-05	0,01	3,287E-05	0,000416756
30%	1	13756	82134	68378	1,1638E-05	0,2	0,00038024	0,004821054
	2	616,02	9312,2	8696,18	0,00063109	0,029	0,00298982	0,037907909
	3	3316,6	5972,8	2656,2	0,00029959	0,2	0,00978842	0,124107371
	4	600,87	2405	1804,13	0,00051892	0,17	0,01441138	0,182721866
	8	669,57	6018,2	5348,63	0,00064687	0,046	0,00486106	0,061633353
	11	26154	323020	296866	5,3612E-05	0,01	8,7582E-05	0,001110447

Los valores de la corriente de corrosión (icorr) de todas las probetas fueron representados en la gráfica de la **Figura 48**,

Figura 48. Representación gráfica de los valores de corriente de corrosión encontrados para todas las probetas de concreto.



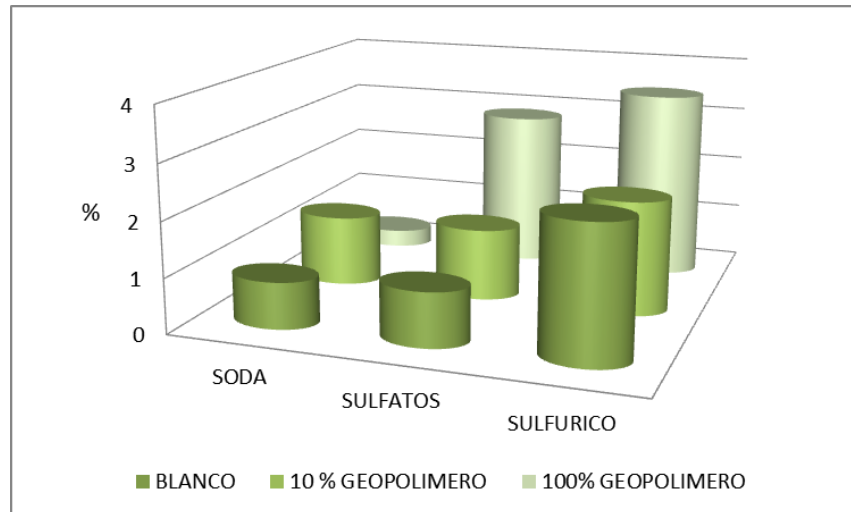
Fuente: Autor

3.4.3 Análisis de las pruebas de resistencia química. Los resultados se muestran en la **Tabla 10**, además se realizó un análisis grafico mostrando el porcentaje perdido en cada muestra y con cada solución que se puede observar en la **Figura 49**.

Tabla 10. Ataque químico al concreto.

PRUEBA DE RESISTENCIA QUÍMICA					
MUESTRA	PRUEBA	PESO EN GRAMOS			
		DIA 1	DIA 2	DIA 3	% DE PERDIDA EN PESO
BLANCO	SODA	10,519	10,501	10,43	0,85
BLANCO	SULFATOS	26,652	26,621	26,389	0,99
BLANCO	SULFURICO	15,28	15,098	14,921	2,35
10% GEOPOLIMERO	SODA	15,411	15,365	15,212	1,29
10% GEOPOLIMERO	SULFATOS	33,208	32,89	32,773	1,31
10% GEOPOLIMERO	SULFURICO	31,191	30,93	30,539	2,09
100% GEOPOLIMERO	SODA	31,121	31,11	31,02	0,32
100% GEOPOLIMERO	SULFATOS	26,814	26,393	26,045	2,87
100% GEOPOLIMERO	SULFURICO	18,989	18,745	18,332	3,46

Figura 49. Porcentajes de pérdida de peso por ataques químicos realizada a los diferentes concretos fabricados.



Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a ataques químicos, presentados en la **Figura 49**, se pueden encontrar comportamientos similares de resistencia entre muestras de las probetas hechas sin remplazo de cemento con geopolímero y las muestras de las probetas de 10%.

Los geopolímeros son bastante susceptibles a ataque por ácidos en especial al ácido sulfúrico, esto se puede evidenciar en los altos porcentajes de masa perdida por el ataque de ácido sulfúrico presentado en la **Figura 49**.

En cuanto a resistencia a sulfatos la muestra con un porcentaje del 10% de remplazo de cemento por geopolímero presentó una menor resistencia a los sulfatos, al de las muestras del cemento.

Comportamientos como el de las probetas del 10% de remplazo de cemento por geopolímero que tienen un ligero aumento en la resistencia al ataque de ácido sulfúrico es debido al aumento en el pH que se origina por la adición del geopolímero al concreto ya que este geopolímero es de una naturaleza básica.

4. CONCLUSIONES

- Con la realización del presente trabajo se pudo obtener un concreto que disminuyó la emisión de CO_2 durante su preparación, usando como agente cementante el geopolímero sintetizado a partir del mineral mullita y este reemplazó al cemento portland en la formulación del concreto en un 10% presentando buenas propiedades mecánicas y químicas.
- Los geopolímeros de mullita tienen como propiedad inherente una resistencia mecánica moderada, sin embargo si se mezclan en una proporción de 9:1 con cemento portland dan como resultado morteros de concreto con valores de resistencia mecánica a la compresión superiores en un 4% comparado a los concretos de solo cemento Portland tipo 1 como conglomerante.
- El comportamiento en general frente a ataques químicos de sulfatos, cloruros y ácidos, en especial ácido sulfúrico, de los concretos a base de geopolímeros es similar al del concreto preparados con cemento Portland tipo 1, en especial si el porcentaje de reemplazo de geopolímero por cemento es bajo, es decir los concreto preparados con geopolímero de mullita en relación 1:9 con cemento portland tipo 1 tendrán muy similar comportamiento frente a los ataques químicos.
- Cuando se reemplaza en un 10% el cemento en el concreto por geopolímero, se ven alteradas las propiedades electroquímicas y de resistencia a la corrosión de la varilla de acero embebida en este. Disminuyendo el grado de pasividad que ocurre en la varilla debido al aumento de las especies oxidantes en la matriz de concreto, generado por el aporte de los OH^- del geopolímero, todo esto se ve representado en una menor resistencia a la corrosión.

- Llevar a cabo la reacción de geopolimerización es un procedimiento efectivo y de bajo costo energético, donde se pueden obtener materiales con prestaciones similares a las del cemento portland tipo 1 que pueden ser ampliamente utilizados en la industria.

5. RECOMENDACIONES

- Para las próximas investigaciones con geopolímeros a base de mullita se deben realizar pruebas de conductividad térmica que muestren los beneficios y bondades en concretos u otras estructuras en general hechas con este geopolímero, que justifiquen el uso de este mineral refractario como material de partida en la preparación de geopolímeros.
- En trabajos posteriores de geopolimerización se pueden utilizar silicatos neutros, de tal forma se pueda regular más estrictamente la cantidad de OH presente en la reacción con la intención de disminuir posibles reacciones posteriores adversas al acero que se utiliza como refuerzo estructural.
- Utilizar bases diferentes al NaOH y estudiar el cambio en las propiedades químicas, físicas y eléctricas de los materiales geopoliméricos producidos a partir de mullita.
- Realizar mezclas de cemento - geopolímero con valores más cercanos al 10 % en los porcentajes de reemplazo de geopolímero por cemento, para encontrar un valor óptimo que se pueda usar posteriormente en la industria cementera.
- En investigaciones futuras las probetas para los análisis electroquímicos eléctricos se deben hacer con 3 electrodos: Referencia, trabajo y contra electrodo, para mejorar las mediciones espectroscopias de impedancia, para el estudio de la corrosión.
- Para caracterizaciones próximas de los materiales geopoliméricos de mullita se pueden implementar métodos como Microscopía SEM.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE; Boletín de prensa, ESTADISTICAS DE CEMENTO GRIS, Bogotá D. C. 2 de febrero de 2012 pp. 1-14 consultado: 14/02/12 disponible en:

http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/bol_cem_gris_dic11.pdf

[2] GIELEN D. J. BUILDING MATERIALS AND CO₂, Western European emission reduction strategies, OCTUBRE 1997, pp 3-13 14/02/2012 disponible en: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/1997/c97065.pdf>

[3] GARTNER Ellis, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1489 – 1498 disponible en: www.sciencedirect.com

[4] DAVIDOVITS J.; Geopolymer: Inorganics Polymeric New Materials; JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS; Vol. 37, p. 1633-1656; 1991. Saint Quentin, France. pp. 2-4. Disponible en: <http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/3-geopolymers-inorganic-polymeric-new-materials>

[5] DAVIDOVITS J.; Geopolymer Chemistry and Applications. 3rd edition. Institut Geopolimer. Saint Quentin, France. 2011 pp. 4-12. Consultado 15/01/2012. Disponible en: www.geopolimer.org

[6] NUGTEREN H.W., V.C.L. BUTSELAAR-ORTHLIEB, M. IZQUIERDO. HIGH STRENGTH GEOPOLYMERS PRODUCED FROM COAL COMBUSTION FLY ASH. Global NEST Journal, Vol 11, No 2, pp 155-161, 2009. Consultado 25/03/11 disponible en:

http://www.gnest.org/journal/Vol11_No2/155-161_112_593_NUGTEREN_paper.pdf

[7] Balsa M, Barbero N, Gutierrez D, Hisas L, Rosenberg A, Ures R; IPCC Expert Meeting on The Science to Address. UNFCCC; Article 2 including Key Vulnerabilities de INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE disponible en:

<http://www.ipcc.ch/meetings/ar4-workshops-express-meetings/argentina-may-2004.pdf>, consultado 25/03/11

[8] HOUGHTON J.T., MEIRA FILHO L.G., B. LIM., TREANTON K. MAMATY I., BONDUKI Y., GRIGGS D.J. and CALLANDER B.A., LIBRO DE TRABAJO PARA EL INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Módulo 2. Procesos Industriales. Consultado 25/03/2011 ppm 1-10 disponible en:

<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/spnch2-1.pdf>

[9] U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey. MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2010, P 38-39 consultado 26/01/11, disponible en:

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>

[10] Kingdom United. Warming, a guide to climate change. Met Office 2011. Consultado 25/01/11 disponible en :

http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/b/a/Warming_guide_2_Oct2011.pdf

[11] GATES R. J, Fabricación del cemento portland en: Parker Albert .Contaminación del aire por la industria. Barcelona, Diciembre de 2001. Edición en español. P 561-585.

[12] VALERIA F.F. BARBOSA, KENNETH J.D. MACKENZIE, CLEIOLO THAUMATURGO. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000) 309–317. Disponible en: <http://www.geopolymer.com.br/pdf/26.pdf>

[13] POWER POZZ TM; Metakaolin Description, High Reactivity Metakaolin (HRM). Engineered Mineral Admixture for Use with Portland cement. Advanced Cement Technologies, LLC Consultado: 28/04/2011, Disponible en: http://www.bigfreshcontrol.com/documents/act_documents/MetakaolinDescription.pdf

[14] AKASY I. A, DABBS, D. M, and SARIAYAM, Mullite for Structural, Electronic, and Optical Applications. J. Am. Ceram. Soc 74(10), pp. 2343-2358 1991.

[15] JAVANIM L. ALONSO J. MANGLANOJ. J. Estudio por microscopia electrónica de barrido (S.E.M.) de pastas cerámicas refractarias y de la mullita en ellas formada. Bol. Soc. Esp. Cerám. V. 18(2): p. 85-92. 1979.

[16] SOMIYA S and HIRATA Y. Mullite powder technology and applications in Japan. Ceramic Bulletin, 70(10): pP. 1624-1632. 1991.

[17] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC. Conceptos básicos del concreto, capítulo 2: Propiedades del concreto, México D.F julio 2004, disponible en:

http://www.imcyc.com.mx/index_a.htm consultado 30/05/11

[18] Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones IECA, Historia del cemento, disponible en:

http://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5 consultado 01/06/11

[19] TCHICHVILIL, and BUTSCHKOWSKY M., Un aporte al problema de la Mullita. Bol. Soc. Esp. Cerám. V., 14(1): p. 9-22 1975.

[20] DOUGLAS A. SKOOG, STANLEY R. CROUCH, F. JAMES HOLLER Principios de análisis instrumental p 325-330.

[21] ISABEL SIERRA A, PEREZ QUINTANILLA D, GOMEZ RUIZ S, MORANTE ZARCERO S. Análisis Instrumental, Algunas herramientas de enseñanza, aprendizaje al espacio europeo de educación superior. España 2010 pp 68-72. Consultado 28/01/12.

[22] MARTINEZ N, ANDRES A, CHIRALT A. Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno, Universidad politécnica de valencia servicio de publicaciones pp. 254

http://books.google.com.co/books?id=bLQ_Lj6C4p8C&dq=calorimetria+diferencial+de+barrido+dsc&hl=es&sitesec=reviews, consultado 20/04/11.

[23] ISABEL SIERRA A, PEREZ QUINTANILLA D, GOMEZ RUIZ S, MORANTE ZARCERO S. Análisis Instrumental, Algunas herramientas de enseñanza, aprendizaje al espacio europeo de educación superior. España 2010 pp 207-208. Consultado 28/01/12.

[24] COSTA J.M. Diccionario de Química Física. Barcelona 2005. pp 217.

Consultado 28/01/2012, disponible en:

http://www.publicacions.ub.edu/ver_indice.asp?archivo=06380.pdf

[25] RODRIGUEZ F. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión, departamento de ingeniería metalúrgica, facultad química UNAM. México D.F disponible en:

<http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/LPR.PDF>, consultado 28/05/11

[26] DOUGLAS A. SKOOG, STANLEY R. CROUCH, F. JAMES HOLLER Principios de análisis instrumental p 470

[27] MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, BERNAL S, RODRÍGUEZ E. Nuevos concretos para el aprovechamiento de un subproducto industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia, octubre de 2006.

[28] TORRES J, DE GUTIÉRREZ R, CASTELLO R, VIZCAYNO C; Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia; Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Colombia; Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Madrid, España. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2011. Disponible en: www.rlmm.org

[29] JANOTKA I, PUERTAS F, PALACIOS M, VARGAS C, KRAJC L. Metakaolins and a promising addition for Portland cement, en Materiales de Construcción. Vol. 60, 2010. Pp 73-88 Consultado: 28/05/11

[30] GUTIÉRREZ J, RESTREPO O, TOBÓN J, Effects of the addition of metakaolin in portland cement en DynaNro. 150, pp131141 Medellín, Noviembre de 2006

[31] MARÍN C, REYES J, MANZANO A, RUBIO J, PÉREZ J, MUÑOZ M, VENTURA E, Synthesis and characterization of a concrete based on metacaolín geopolymer. Inorganic Materials, 2009, Vol. 45, No. 12, pp. 1528–1531.

[32] TORRES J, DE GUTIÉRREZ R, CASTELLÓ R, VIZCAYNO C. Análisis Comparativo De Caolines De Diferentes Fuentes Para La Producción De Metacaolín. Publicado On-Line el 15-Nov-2010 Disponible en: www.rlmm.org

[33]. PROVIS J. VAN DEVENTER S.J. Modelling the formation of geopolymers, Department of Chemical and Biomolecular Engineering. The University of Melbourne. Chemical Engineering Science 62 2007 Disponible en ELSEVIER.

[34] FRANTIŠEK ŠKVÁRA, TOMÁŠ JÍLEK, LUBOMÍR KOPECKÝ*, GEOPOLYMER MATERIALS BASED ON FLY ASH, Department of Glass and Ceramics, Institute of Chemical Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague, Czech Republic Department of Structural Mechanics, Czech Technical University Prague Thákurova 7, 166 29 Prague, Czech Republic Publicado en: Ceramics – Silikáty 49 (3) 195-204 (2005)

[35] KOSTAS KOMNITSAS, DIMITRA ZAHARAKI. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry de Technical University of Crete, Department of Mineral Resources Engineering, Chania 73100, Greece Publicado en Minerals Engineering 20 (2007) 1261–1277.

[36] CASTRO Diana. Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. Biblioteca, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2010.

[37] PACHECO F. CASTRO J. JALADI S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Castelo Branco Polytechnic Institute, Department of Civil Engineering. Castelo Branco, Portugal, January 2007; ELSEVIER Consultado: 28/03/2012

[38] PRUD'HOMME E. MICHAUD P. JOUSSEIN E. PEYRATOUT C. SMITH A. ARRIL-CLACENS S. CLACENS J. ROSSIGNOL S. Silica fume as porogent agent in geo-materials at low temperature. Francia, February 2010, ELSEVIER, Consultado: 28/03/2012

[39] REES C. PROVIS J. LUKEY G. VAN DEVENTER J. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia. The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. December 2007 ELSEVIER, Consultado: 28/03/2012

[40] DUXON P. LUKEY G. VAN DEVENTER J. Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity MATERIALS AND INTERFACES. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia 2006, ELSEVIER Consultado: 28/03/2012

[41] LEE W. VAN DEVENTER J. Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia 2003 ELSEVIER Consultado: 29/03/2012

[42] SOARES, P., PINTO, A., FERREIRA, V., LABRINCHA, J. "Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros" Geopolymerization of lightweight aggregate waste.

[43] HUANG, YI and HAN, MINFANG. China University of Mining and Technology, Beijing, The influence of α -Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products, Journal of Hazardous Materials 2011, 193, 90–94

[44] BARBOSA V., MACKENZIE K. and THAUMATURGO C. Synthesis and characterisation of materials base on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000) 309–317; Disponible en ELSEVIER

[45] GEOPOLYMER INSTITUTE. Abril 2006, Consultado en 1/1/2013 disponible en: <http://www.geopolymer.org/science/about-geopolymerization>

[46] HUE NGUYEN. Department of tropical plant & soil sciences. Structure of same clay minerals. Consultado (1/1/2013) disponible en : http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/clay_structures.htm

[47] GONZALES M. Ataque químico al concreto. Capitulo peruano sobre corrosión en estructuras de concreto. Consultado el (13/1/2013) disponible en: http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/agregados/mgc22_ataque_concreto.pdf.

[48] MENDOZA J., DURAN R., GENESCÁ J.. Espectroscopia de impedancia en corrosión. Instituto Mexicano del Petroleo. Facultad de Química, UNAM. Consultado el (10/11/2013) disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>

[49] Pérez Quiroz, J. T. Seguimiento por la Técnica de Impedancia Electroquímica de la Protección Catódica del Acero de Refuerzo en Concreto Modificado por un Agente Humectante Universidad Nacional Autónoma de México, (2001)

[50] TORRES A., MARTINEZ M., Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Publicacion técnica No. 181, Secretaria de comunicaciones y transportes . Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Mexico 2001. Consultado el (3/1/2013) disponible en: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt181.pdf>

[51] Blenkinsop, R., Currel, B., Midgley, H and Parsonage, J.. The Carbonation Of High Alumina Cement, Part I. Cement and Concrete Research. V. 15, pp. 276-284. (1985) Disponible en ELSEVIER.

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

[53] TECNOCONCRETOS S.A. Normas Técnicas Diseños de mezclas. Bogotá: Tecbo co.

[54] http://tera.chem.ut.ee/IR_spectra/index.php?option=com_content&view=article&id=41&Itemid=53 .

[55] http://tera.chem.ut.ee/IR_spectra/index.php?option=com_content&view=article&id=41&Itemid=53 .

[55] Microstructure of sodium polysialate siloxo geopolymer, Martin Schmückera, Kenneth J.D. MacKenzieb, MacDiarmid, Pages 433–437 ELSEVIER Consultado Febrero 2012

[56] University of Hawai'i is an equal opportunity/affirmative action institution. 2009-2013 University of Hawai'i - College of Tropical Agriculture and Human Resources http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/clay_structures.htm.

[57] <http://www.chemical-engineering.co/2012/03/24/mullite/>

BIBLIOGRAFIA

AKASY I. A, DABBS, D. M, and SARIAYAM, Mullite for Structural, Electronic, and Optical Applications. J. Am. Ceram. Soc 74(10), pp. 2343-2358 1991.

BALSA M, BARBERO N, GUTIERREZ D, HISAS L, ROSENBERG A, URES R; IPCC Expert Meeting on The Science to Address. UNFCCC; Article 2 including Key Vulnerabilities de INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE disponible en:

<http://www.ipcc.ch/meetings/ar4-workshops-express-meetings/argentina-may-2004.pdf>, consultado 25/03/11

BARBOSA V., MACKENZIE K. and THAUMATURGO C. Synthesis and characterisation of materials base on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000) 309–317; Disponible en ELSEVIER

BLENKINSOP, R., CURREL, B., MIDGLEY, H AND PARSONAGE, J.. The Carbonation Of High Alumina Cement, Part I. Cement and Concrete Research. V. 15, pp. 276-284. (1985) Disponible en ELSEVIER.

CASTRO Diana. Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. Biblioteca, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2010.

COSTA J.M. Diccionario de Química Física. Barcelona 2005. pp 217.
Consultado 28/01/2012, disponible en:

http://www.publicacions.ub.edu/ver_indice.asp?archivo=06380.pdf

DAVIDOVITS J.; Geopolymer Chemistry and Applications. 3rd edition. Institut Geopolimer. Saint Quentin, France. 2011 pp. 4-12. Consultado 15/01/2012. Disponible en:
www.geopolimer.org

DAVIDOVITS J.; Geopolymer: Inorganics Polymeric New Materials; JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS; Vol. 37, p. 1633-1656; 1991. Saint Quentin, France. pp. 2-4. Disponible en:
<http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/3-geopolymers-inorganic-polymeric-new-materials>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE; Boletín de prensa, ESTADÍSTICAS DE CEMENTO GRIS, Bogotá D. C. 2 de febrero de 2012 pp. 1-14 consultado: 14/02/12 disponible en:
http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/bol_cem_gris_dic11.pdf

DOUGLAS A. SKOOG, STANLEY R. CROUCH, F. JAMES HOLLER Principios de análisis instrumental p 470

DUXON P. LUKEY G. VAN DEVENTER J. Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity MATERIALS AND INTERFACES. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia 2006, ELSEVIER Consultado: 28/03/2012

FRANTIŠEK ŠKVÁRA, TOMÁŠ JÍLEK, LUBOMÍR KOPECKÝ*, GEOPOLYMER MATERIALS BASED ON FLY ASH, Department of Glass and Ceramics, Institute

of Chemical Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague, Czech Republic
Department of Structural Mechanics, Czech Technical University Prague
Thákurova 7, 166 29 Prague, Czech Republic Publicado en: Ceramics – Silikáty
49 (3) 195-204 (2005)

GIELEN D. J. BUILDING MATERIALS AND CO₂, Western European emission
reduction strategies, OCTUBRE 1997, pp 3-13 14/02/2012 disponible en:
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/1997/c97065.pdf>

GARTNER Ellis, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements,
Cement and Concrete Research 34 (2004) 1489 – 1498 disponible en:
www.sciencedirect.com

GATES R. J, Fabricación del cemento portland en: Parker Albert .Contaminación
del aire por la industria. Barcelona, Diciembre de 2001. Edición en español. P
561-585.

GEOPOLYMER INSTITUTE. Abril 2006, Consultado en 1/1/2013 disponible en:
<http://www.geopolymer.org/science/about-geopolymerization>

GONZALES M. Ataque químico al concreto. Capitulo peruano sobre corrosión en
estructuras de concreto. Consultado el (13/1/2013) disponible en:
[http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/agregados/mgc22_ataque_](http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/agregados/mgc22_ataque_concreto.pdf)
[concreto.pdf](http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/agregados/mgc22_ataque_concreto.pdf).

GUTIÉRREZ J, RESTREPO O, TOBÓN J, Effects of the addition of metakaolin in
portland cement en DynaNo. 150, pp131141 Medellín, Noviembre de 2006

HOUGHTON J.T., MEIRA FILHO L.G., B. LIM., TREANTON K. MAMATY I.,
BONDUKI Y., GRIGGS D.J. and CALLANDER B.A., LIBRO DE TRABAJO PARA

EL INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Módulo 2. Procesos Industriales. Consultado 25/03/2011 ppm 1-10 disponible en:
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/spnch2-1.pdf>

HUANG, YI and HAN, MINFANG. China University of Mining and Technology, Beijing, The influence of α -Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products, Journal of Hazardous Materials 2011, 193, 90–94

HUE NGUYEN. Department of tropical plant & soil sciences. Structure of same clay minerals. Consultado (1/1/2013) disponible en :
http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/clay_structures.htm

<http://www.chemical-engineering.co/2012/03/24/mullite/>

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC. Conceptos básicos del concreto, capítulo 2: Propiedades del concreto, México D.F julio 2004, disponible en:

http://www.imcyc.com.mx/index_a.htm consultado 30/05/11

[18] Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones IECA, Historia del cemento, disponible en:

http://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5 consultado 01/06/11

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

JANOTKA I, PUERTAS F, PALACIOS M, VARGAS C, KRAJC L. Metakaolins and a promising addition for Portland cement, en Materiales de Construcción. Vol. 60, 2010. Pp 73-88 Consultado: 28/05/11

JAVANIM L. ALONSO J. MANGLANOJ. J. Estudio por microscopia electrónica de barrido (S.E.M.) de pastas cerámicas refractarias y de la mullita en ellas formada. Bol. Soc. Esp. Cerám. V. 18(2): p. 85-92. 1979.

Kingdom United. Warming, a guide to climate change. Met Office 2011. Consultado 25/01/11 disponible en :
http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/b/a/Warming_guide_2_Oct2011.pdf

KOSTAS KOMNITSAS, DIMITRA ZAHARAKI. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry de Technical University of Crete, Department of Mineral Resources Engineering, Chania 73100, Greece Publicado en Minerals Engineering 20 (2007) 1261–1277.

LEE W. VAN DEVENTER J. Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia 2003 ELSEVIER Consultado: 29/03/2012

MARÍN C, REYES J, MANZANO A, RUBIO J, PÉREZ J, MUÑOZ M, VENTURA E, Synthesis and characterization of a concrete based on metacaolín geopolymer. Inorganic Materials, 2009, Vol. 45, No. 12, pp. 1528–1531.

MARTINEZ N, ANDRES A, CHIRALT A. Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno, Universidad politécnica de valencia servicio de publicaciones pp. 254

http://books.google.com.co/books?id=bLQ_Lj6C4p8C&dq=calorimetria+diferencial+de+barrido+dsc&hl=es&sitesec=reviews, consultado 20/04/11.

MENDOZA J., DURAN R., GENESCÁ J.. Espectroscopia de impedancia en corrosión. Instituto Mexicano del Petroleo. Facultad de Química, UNAM. Consultado el (10/11/2013) disponible en:

<http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>

MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, BERNAL S, RODRÍGUEZ E. Nuevos concretos para el aprovechamiento de un subproducto industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia, octubre de 2006.

Microstructure of sodium polysialate siloxo geopolymer, Martin Schmückera, Kenneth J.D. MacKenzieb, MacDiarmid, Pages 433–437 ELSEVIER Consultado Febrero 2012

NUGTEREN H.W., V.C.L. BUTSELAAR-ORTHLIEB, M. IZQUIERDO. HIGH STRENGTH GEOPOLYMERS PRODUCED FROM COAL COMBUSTION FLY ASH. Global NEST Journal, Vol 11, No 2, pp 155-161, 2009. Consultado 25/03/11 disponible en:

http://www.gnest.org/journal/Vol11_No2/155-161_112_593_NUGTEREN_paper.pdf

PACHECO F. CASTRO J. JALADI S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Castelo Branco Polytechnic Institute, Department of Civil Engineering. Castelo Branco, Portugal, January 2007; ELSEVIER Consultado: 28/03/2012

PÉREZ QUIROZ, J. T. Seguimiento por la Técnica de Impedancia Electroquímica de la Protección Catódica del Acero de Refuerzo en Concreto Modificado por un Agente Humectante Universidad Nacional Autónoma de México, (2001)

POWER POZZ TM; Metakaolin Description, High Reactivity Metakaolin (HRM). Engineered Mineral Admixture for Use with Portland cement. Advanced Cement Technologies, LLC Consultado: 28/04/2011, Disponible en: http://www.bigfreshcontrol.com/documents/act_documents/MetakaolinDescription.pdf

PRUD'HOMME E. MICHAUD P. JOUSSEIN E. PEYRATOUT C. SMITH A. ARRIL-CLACENS S. CLACENS J. ROSSIGNOL S. Silica fume as porogent agent in geomaterials at low temperature. Francia, February 2010, ELSEVIER, Consultado: 28/03/2012

REES C. PROVIS J. LUKEY G. VAN DEVENTER J. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Australia. The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. December 2007 ELSEVIER, Consultado: 28/03/2012

RODRIGUEZ F. Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión, departamento de ingeniería metalúrgica, facultad química UNAM. México D.F disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/LPR.PDF>, consultado 28/05/11

SABEL SIERRA A, PEREZ QUINTANILLA D, GOMEZ RUIZ S, MORANTE ZARCERO S. Análisis Instrumental, Algunas herramientas de enseñanza, aprendizaje al espacio europeo de educación superior. España 2010 pp 68-72. Consultado 28/01/12.

SOARES, P., PINTO, A., FERREIRA, V., LABRINCHA, J. "Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros" Geopolymerization of lightweight aggregate waste.

SOMIYA S and HIRATA Y. Mullite powder technology and applications in Japan. Ceramic Bulletin, 70(10): pP. 1624-1632. 1991.

TCHICHVILIL, and BUTSCHKOWSKY M., Un aporte al problema de la Mullita. Bol. Soc. Esp. Cerám. V., 14(1): p. 9-22 1975.

[20] DOUGLAS A. SKOOG, STANLEY R. CROUCH, F. JAMES HOLLER Principios de análisis instrumental p 325-330.

TECNOCONCRETOS S.A. Normas Técnicas Diseños de mezclas. Bogotá: Tecbo co.

[54]http://tera.chem.ut.ee/IR_spectra/index.php?option=com_content&view=article&id=41&Itemid=53 .

TORRES A., MARTINEZ M., Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Publicacion técnica No. 181, Secretaria de comunicaciones y transportes . Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Mexico 2001. Consultado el (3/1/2013) disponible en:

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt181.pdf>

TORRES J, DE GUTIÉRREZ R, CASTELLO R, VIZCAYNO C; Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia; Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Colombia; Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Madrid, España. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2011. Disponible en: www.rlmm.org

TORRES J, DE GUTIÉRREZ R, CASTELLÓ R, VIZCAYNO C. Análisis Comparativo De Caolines De Diferentes Fuentes Para La Producción De Metacaolín. Publicado On-Line el 15-Nov-2010 Disponible en: www.rlmm.org

[33]. PROVIS J. VAN DEVENTER S.J. Modelling the formation of geopolymers, Department of Chemical and Biomolecular Engineering. The University of Melbourne. Chemical Engineering Science 62 2007 Disponible en ELSEVIER.

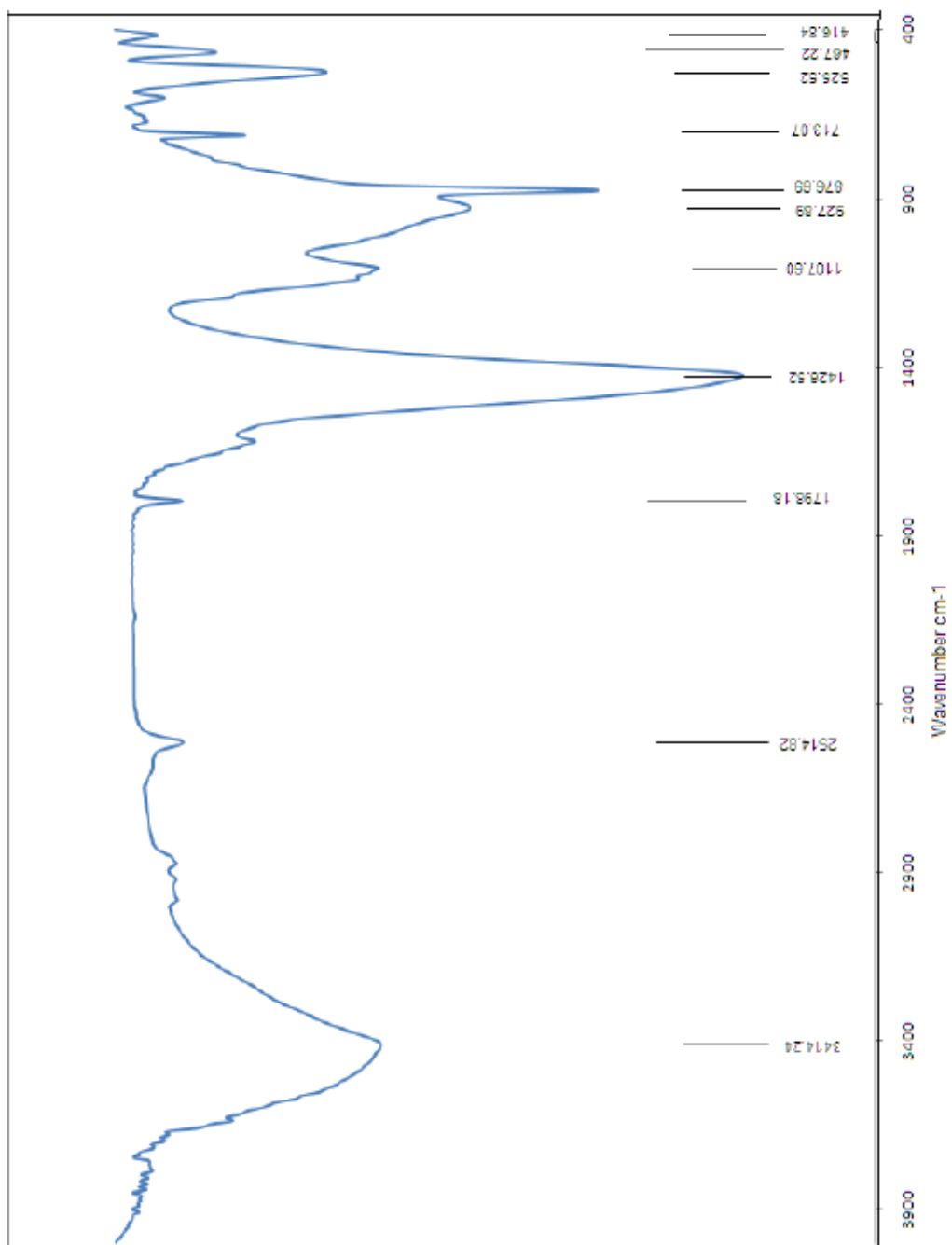
U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey. MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2010, P 38-39 consultado 26/01/11, disponible en:
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>

University of Hawai'i is an equal opportunity/affirmative action institution. 2009-2013 University of Hawai'i - College of Tropical Agriculture and Human Resources http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/clay_structures.htm.

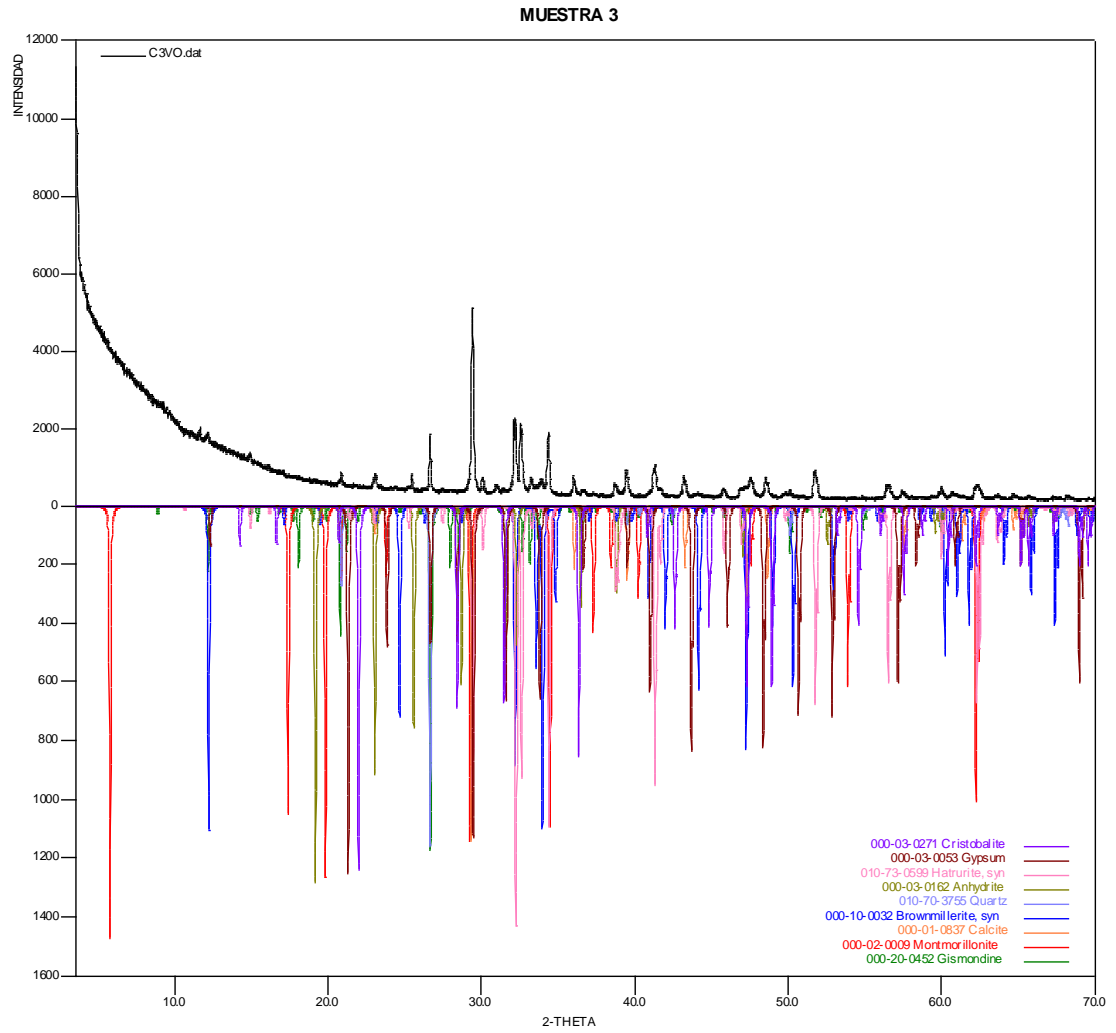
VALERIA F.F. BARBOSA, KENNETH J.D. MACKENZIE, CLEIOLO THAUMATURGO. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000) 309–317. Disponible en:
<http://www.geopolymer.com.br/pdf/26.pdf>

ANEXOS

Anexo A: Espectro IR del cemento



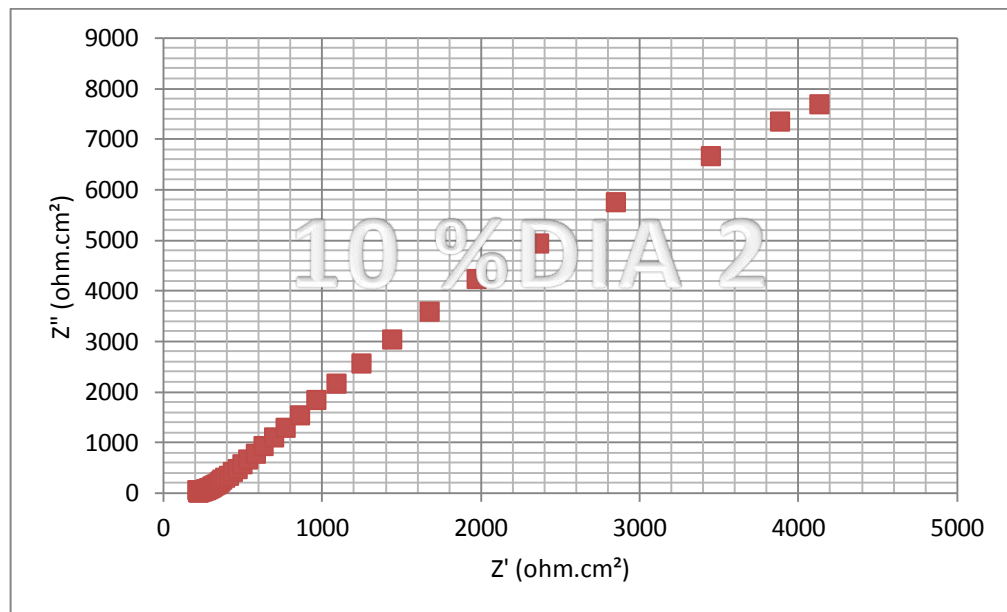
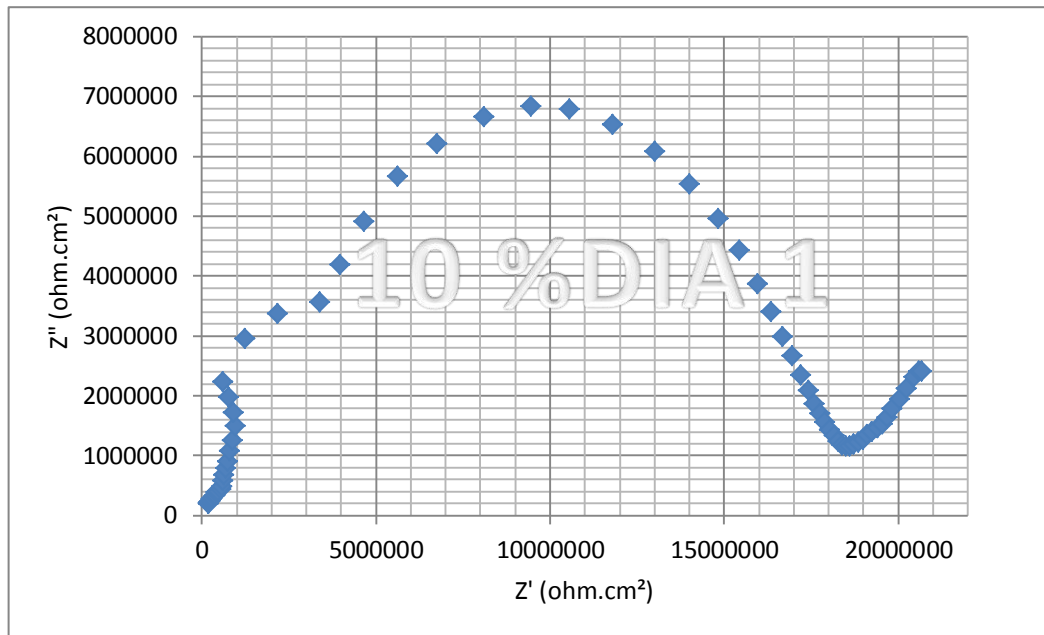
Anexo B: Difractograma del cemento

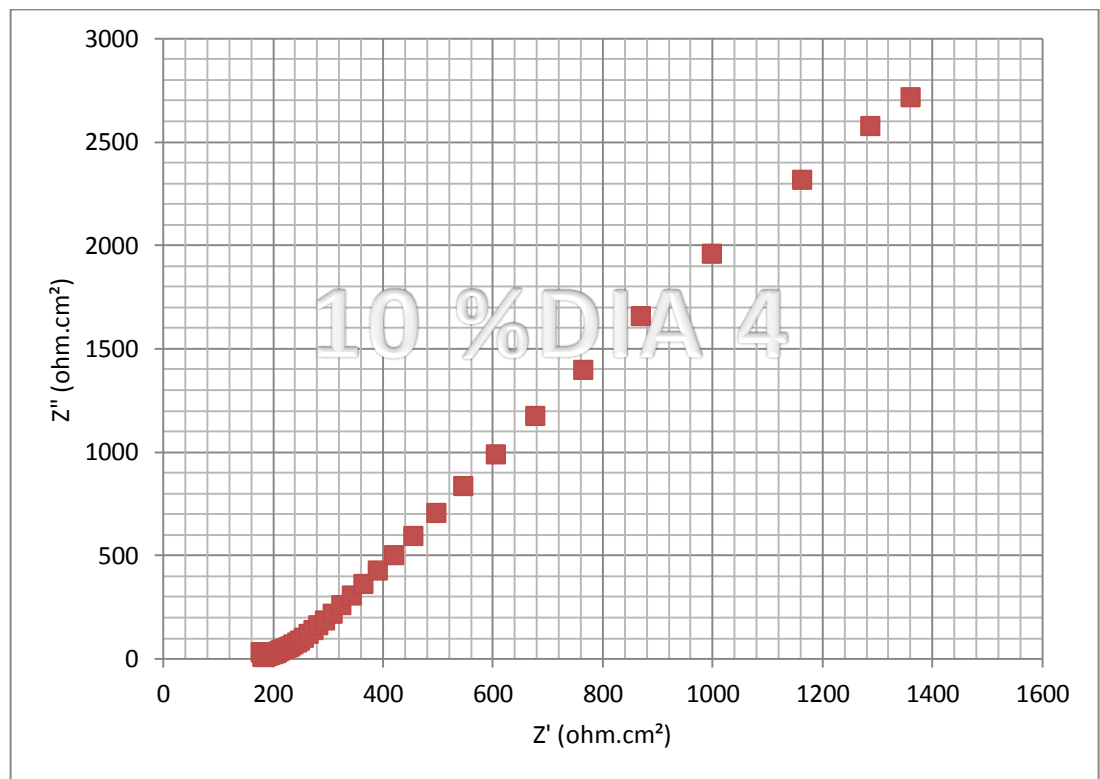
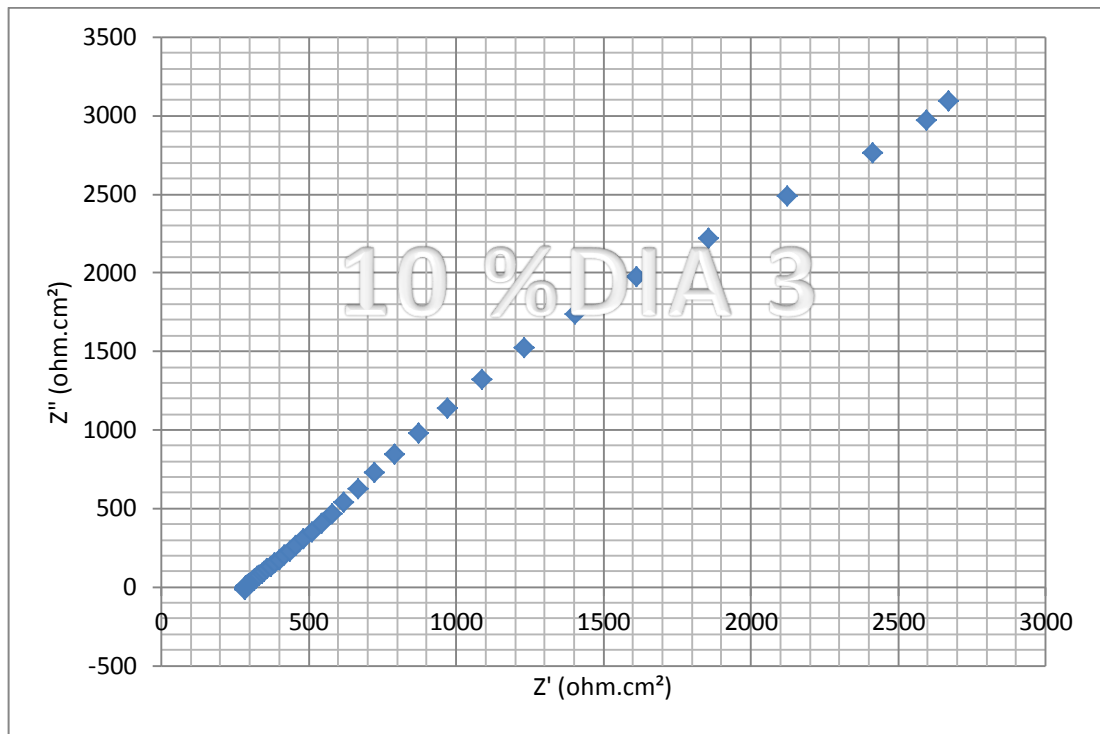


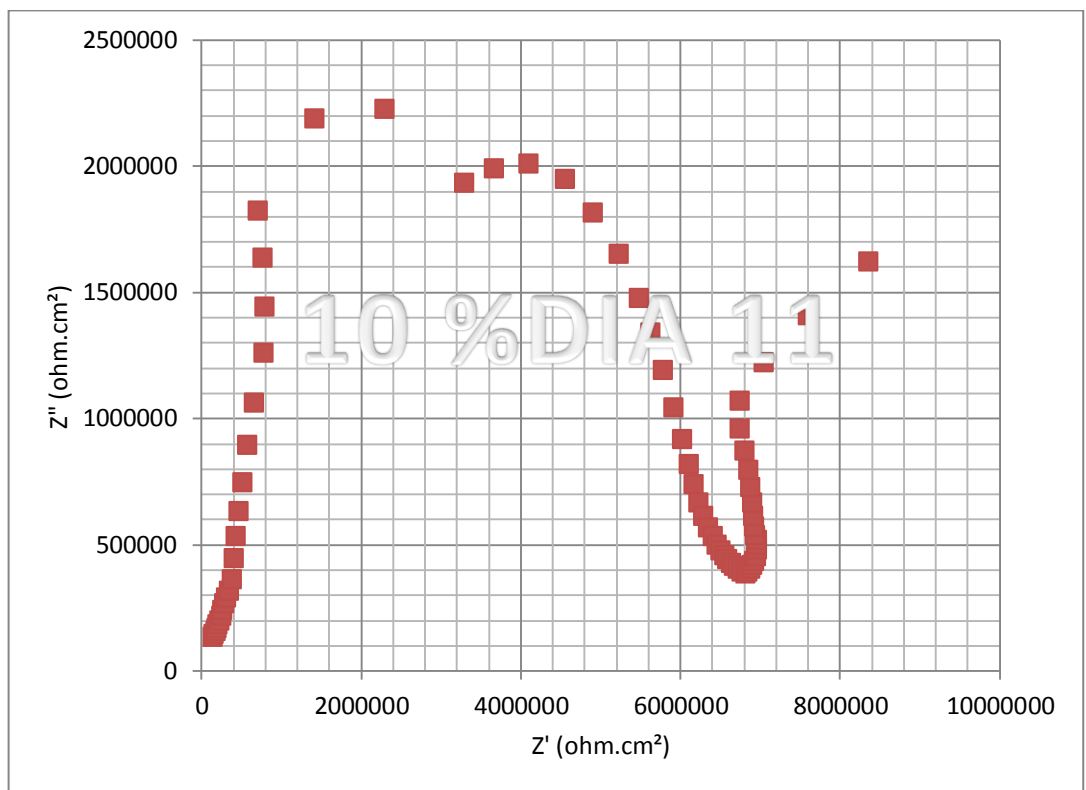
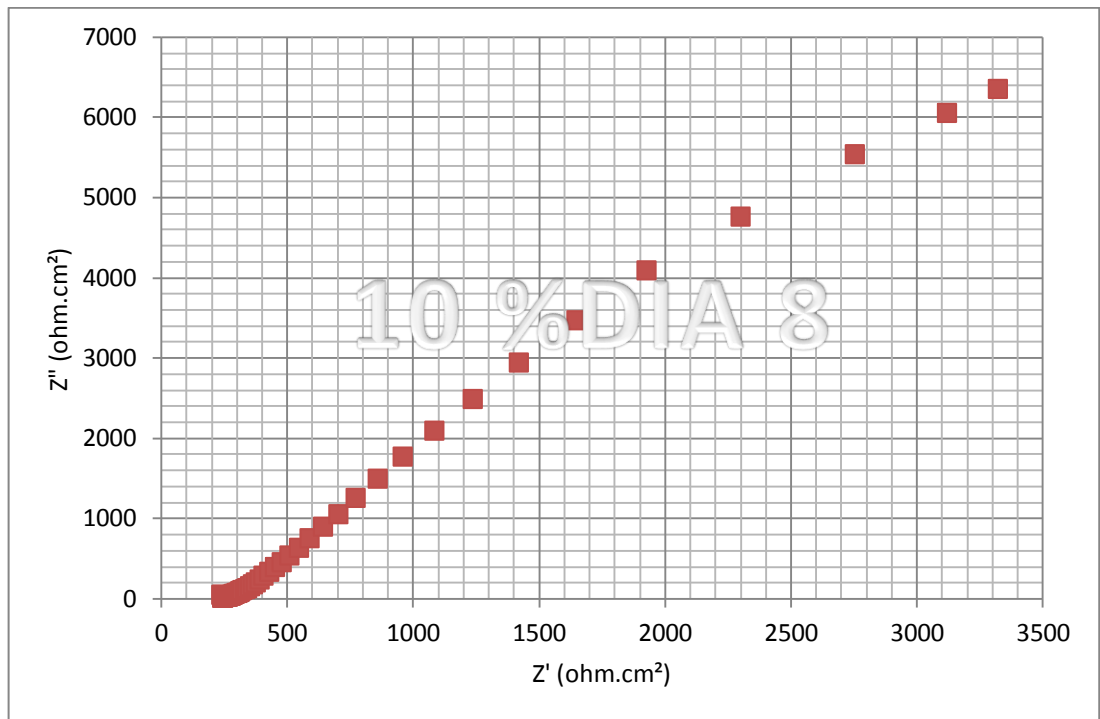
Anexo C: Tabla de los minerales encontrados en el cemento

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE
Cristalinos	$\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	000-03- 0053	Yeso
	Ca CO_3	000-01- 0837	Calcita
	Si O_2	010-70- 3755	Cuarzo
	Si O_2	000-03- 0271	Cristobalita
	$\text{Si}_{3.74} \text{Al}_{2.03} \text{Fe}_{0.03} \text{Mg}_{0.02} \text{O}_{11}$	000-02- 0009	Montmorillonita
	$\text{Ca}_3 (\text{Si O}_4) \text{O}$	010-73- 0599	Hatrurita
	Ca SO_4	000-03- 0162	Anhidrita
	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	000-20- 0452	Gismondina
	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{Fe}_2 \text{O}_{10}$	000-10- 0032	Browmillerita

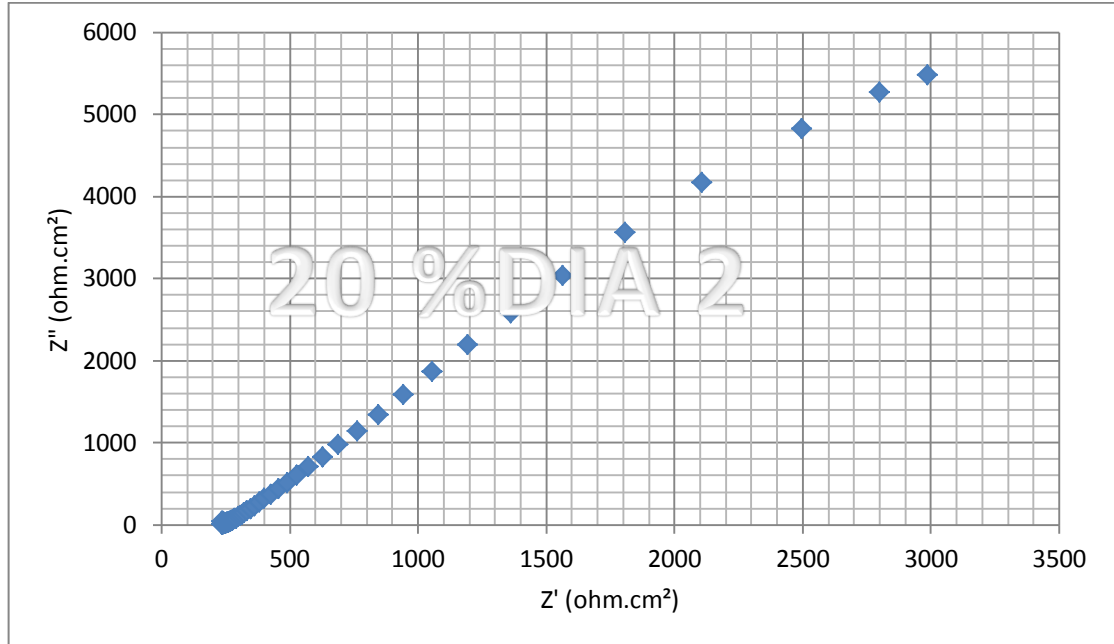
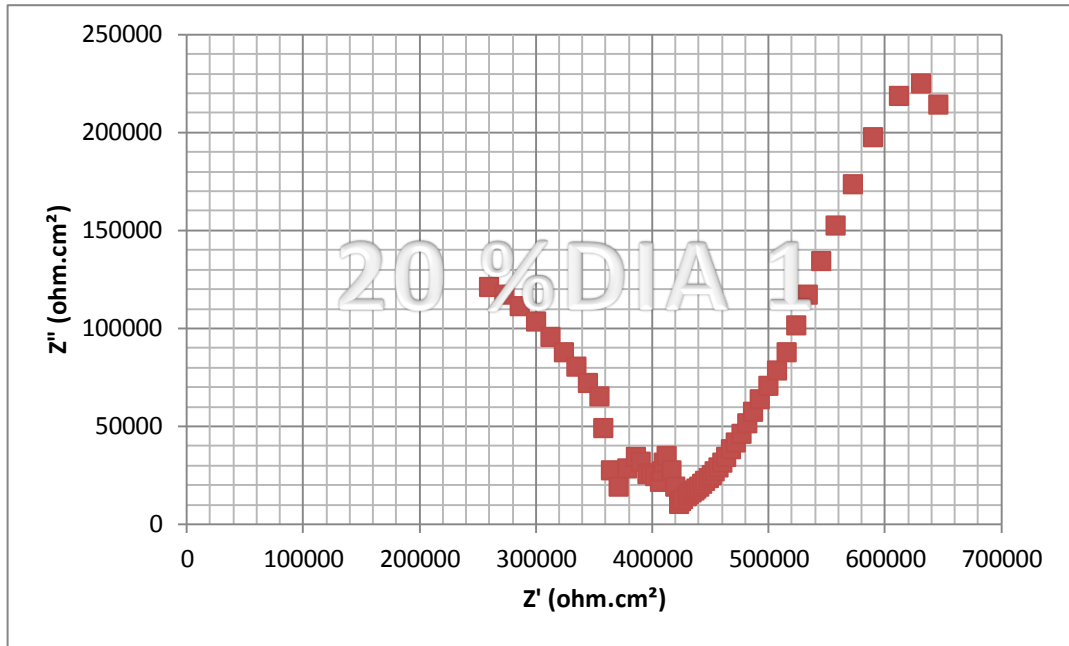
Anexo D: Diagramas de Niquist probeta 10% 28

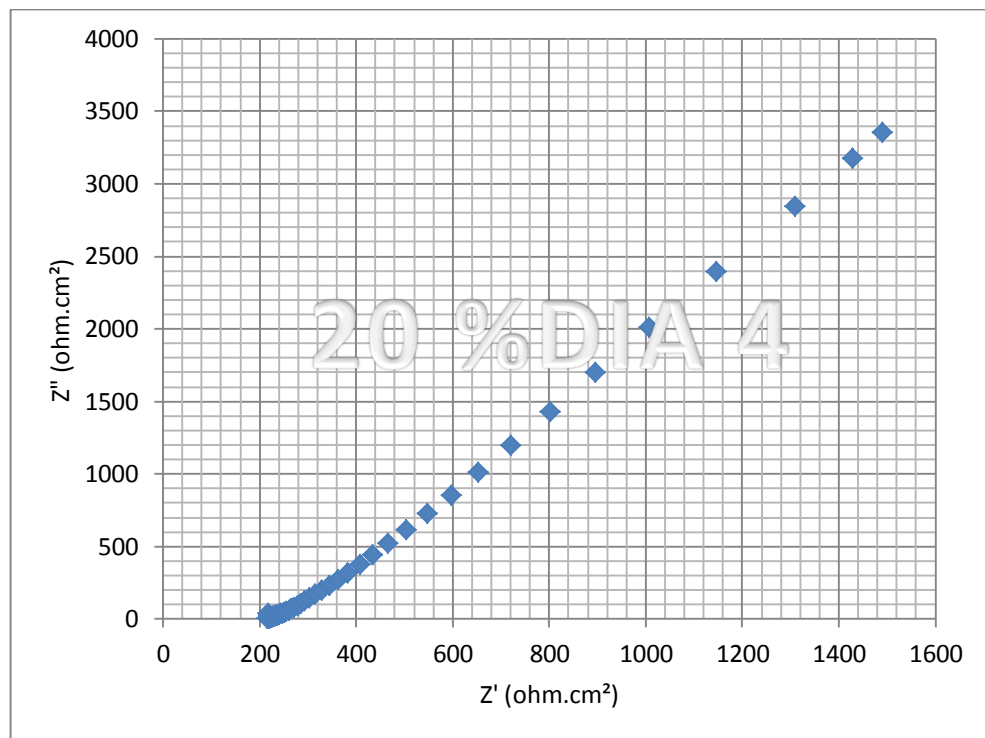
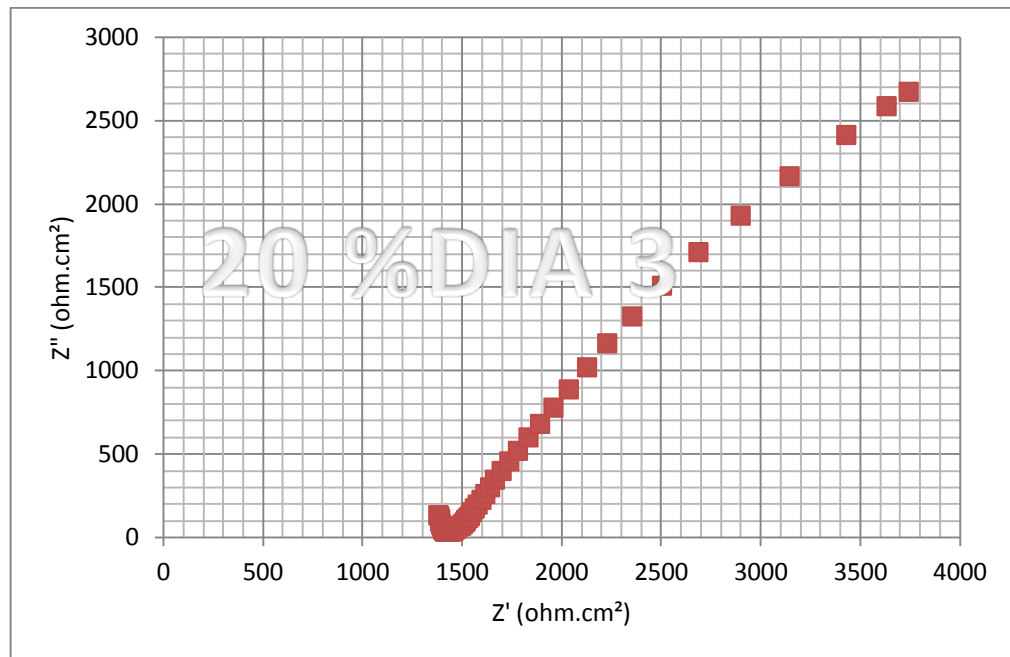


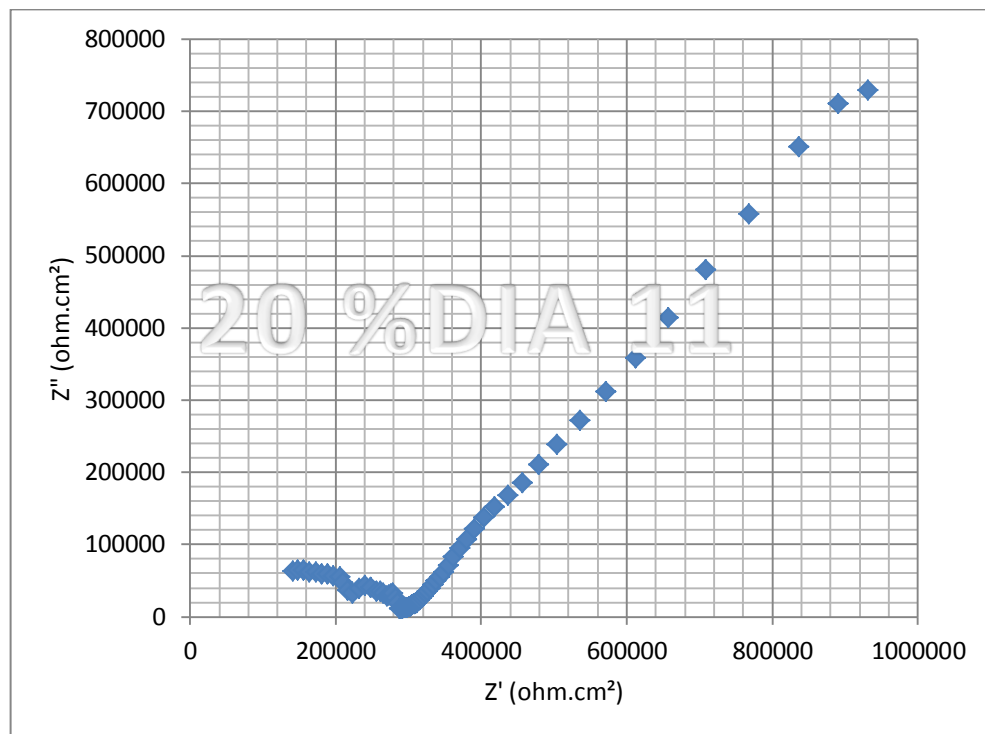
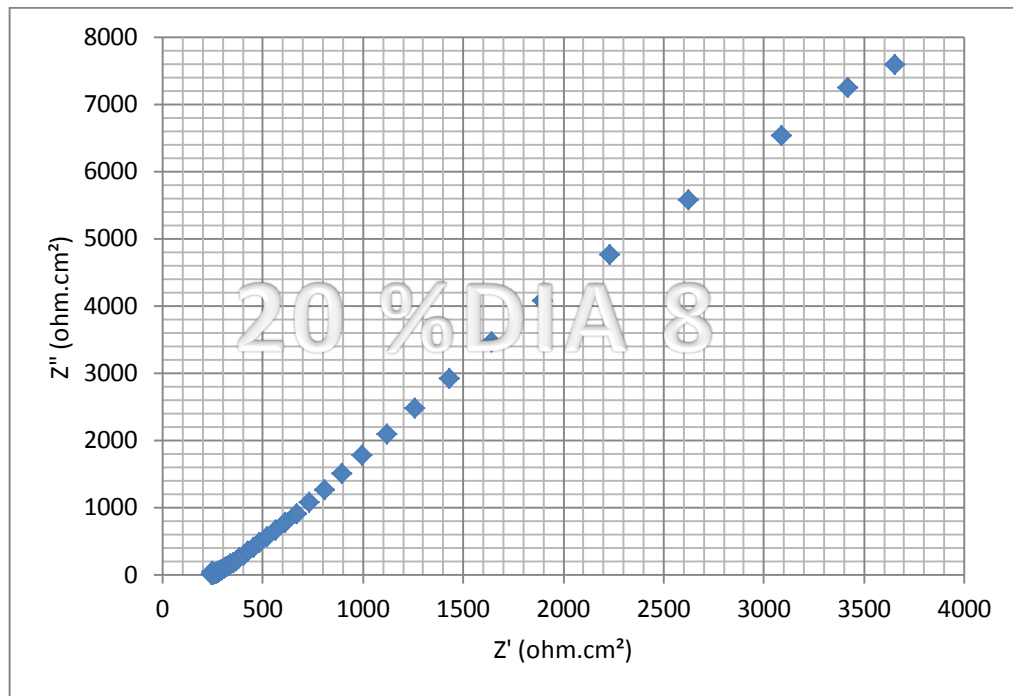




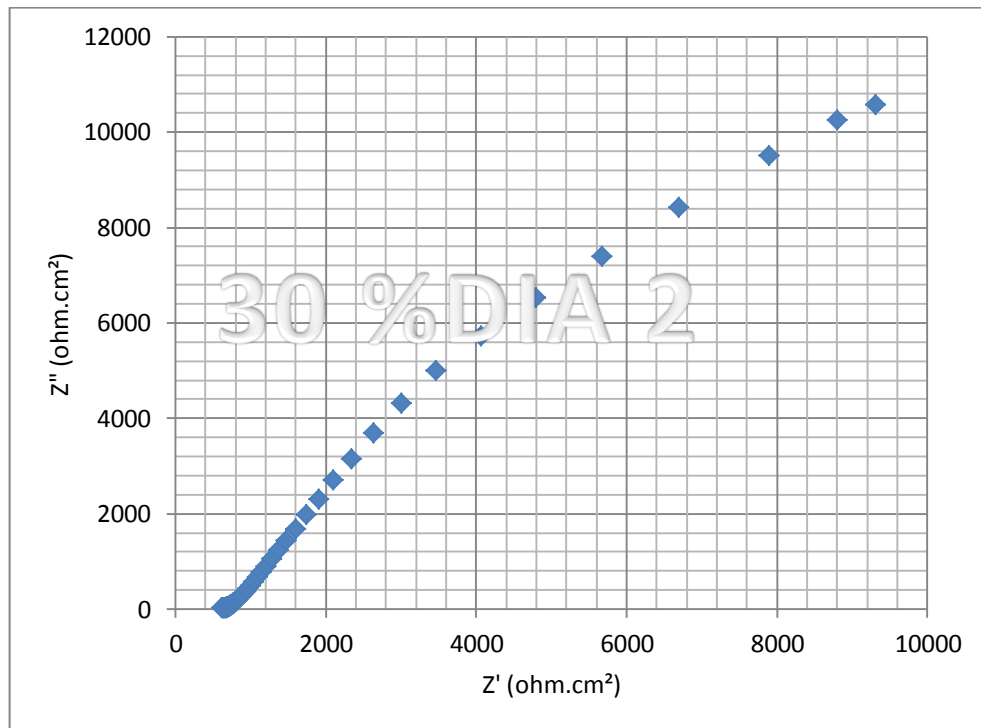
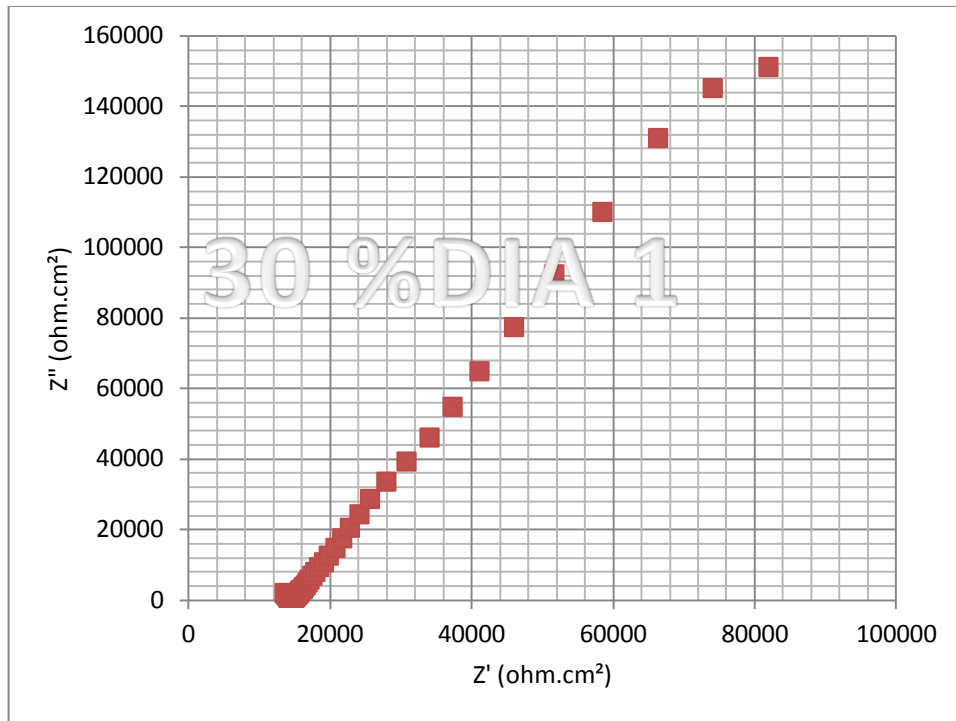
Anexo E: Diagramas de Niquist probeta 20% 28

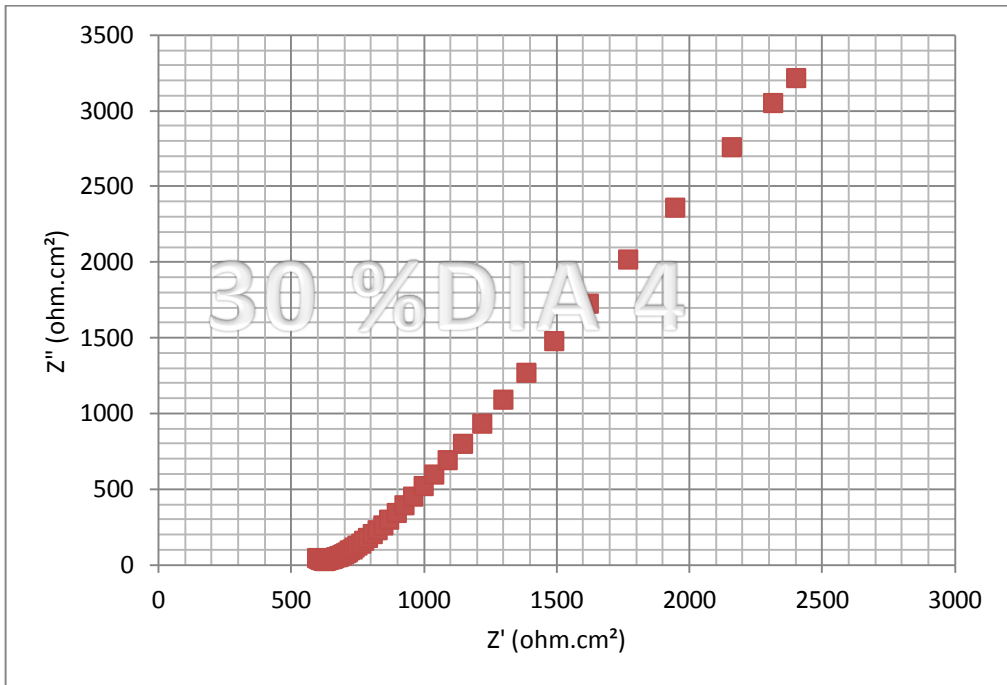
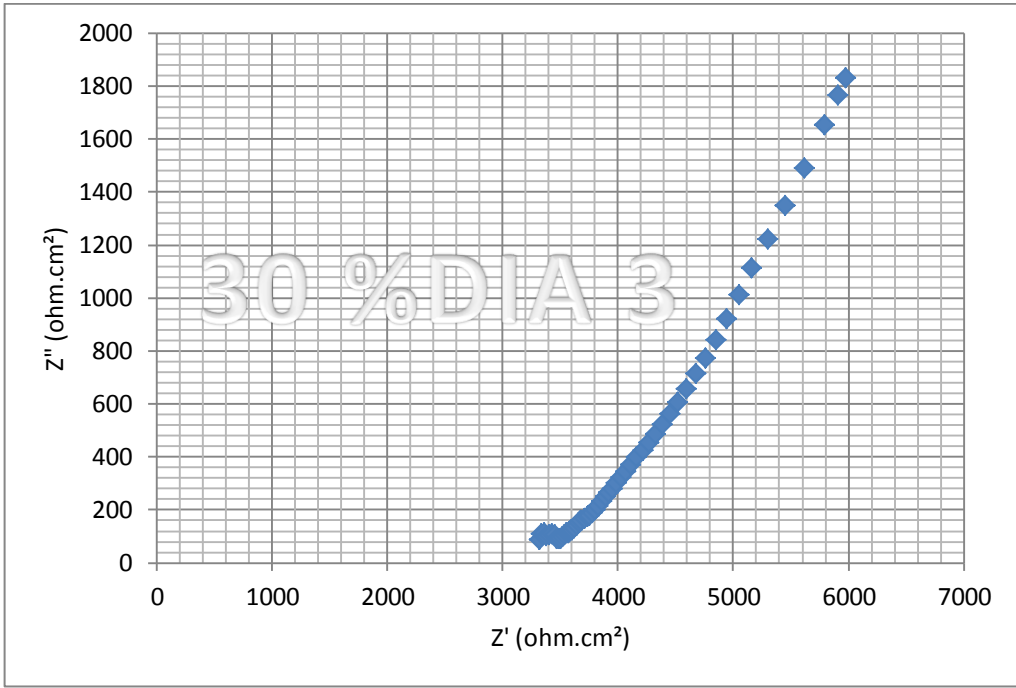


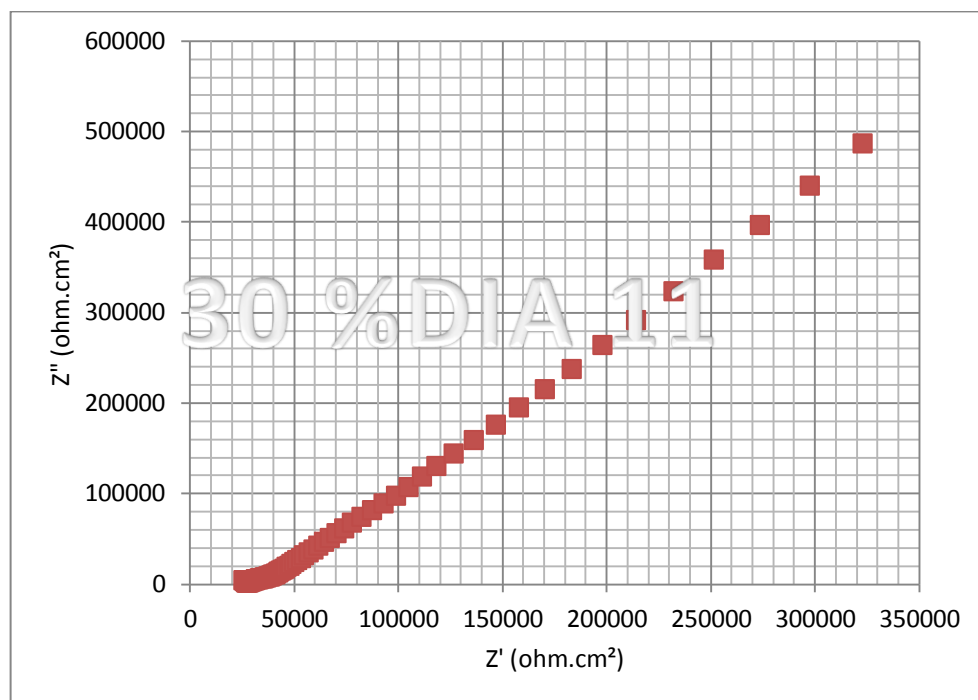
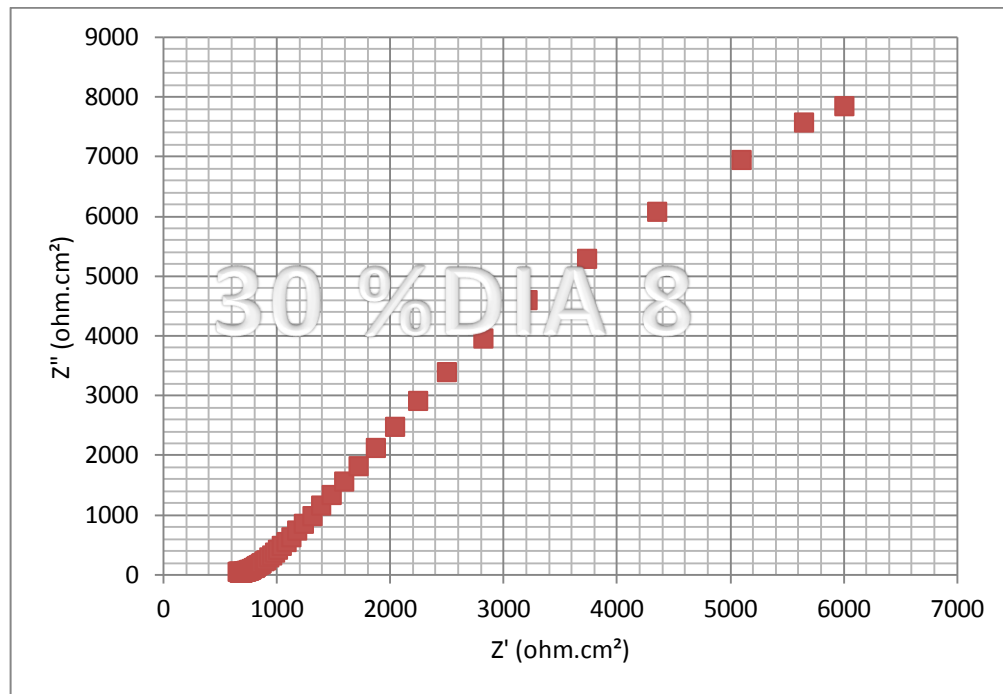




Anexo F: Diagramas de Niquist probeta 30% 28







Anexo G: Diagramas de Niquist probeta 0% 28 (Cemento)

