

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

DIANA CAROLINA SANDOVAL CARREÑO

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

2013

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

DIANA CAROLINA SANDOVAL CARREÑO

Trabajo de grado para optar al título de: QUIMICA

DIRECTORES:

Lic. en química, PhD ANGELA MARCELA MONTAÑO

Lic. en física y matemática PhD CLAUDIA GONZALEZ CUERVO

CODIRECTOR:

Químico M.sc JOSE CARLOS GUTIERREZ GALLEG0

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUIMICA

BUCARAMANGA

2013

*Dedicatoria: Principalmente a mi madre Luz María Carreño por sus grandes esfuerzos, su paciencia, por nunca rendirse y por ese gran amor que nos tenemos a mis Familiares Luisa María Carreño, Jesús María Rueda y Margie Liliana Rueda por apoyarme y quererme siempre
Y mi amigo novio y compañero Leonardo por su apoyo y su amor.*

Diana Carolina Sandoval Carreño

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A La doctora, Ángela Marcela Montaña, por la Dirección de este proyecto, paciencia y colaboración.

Al profesor José Carlos Gutiérrez Gallego, por sacar adelante este proyecto, por sus enseñanzas, por su amistad, por su cariño, su comprensión y su paciencia

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

A mi compañero, amigo y novio Leonardo, por su amor, cariño, compañía y apoyo.

A la familia Jiménez Gabaldón por su amistad, su cariño y por acogerme en sus hogares dándome la paz necesaria para culminar la escritura de esta tesis;

especialmente, Mariivi, Helena, Cres, Maruja, Julios, Paulas, Ángel, Maricarmen, Asin y Antonio

A todos mis amigos del laboratorio, en especial a Elizabeth Rico por su colaboración y amistad.

A las eminencias Jorge, Luis Ernesto, Víctor y Carlos.

A mis amigos y amigas que siempre estuvieron ahí para darme ánimo con su sincera amistad: Raul, Pelys, Lucia, Pilar, Ludwig, Jahir, Martha, Yorquin y familia.

A mi amiga Diana Puentes, por su apoyo, su amistad y colaboración.

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 su colaboración, 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.

Diana Carolina Sandoval.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	18
1.1 GENERAL	18
1.2 ESPECÍFICOS	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2.1 FUNDAMENTO DEL PROBLEMA	19
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. HIPÓTESIS	22
5. MARCO TEÓRICO	23
5.1 ESTADO DEL ARTE	23
5.2 GEOPOLÍMERO	25
5.2.1 Geopolimerización.	27
5.2.2 Campos de aplicación de geopolímeros.	28
5.3 SILICATOS Y ALUMINO SILICATOS	29
5.3.1 Caolín.	30
5.3.2 Metacaolín.	32
5.4 CEMENTO	33
5.4.1 Componentes del cemento.	33
5.4.2 Clasificación de los cementos.	34
5.4.3 Propiedades físicas y mecánicas de los cementos.	35
5.5 CONCRETO	36

5.6. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	37
5.6.1 Difracción de rayos x.	37
5.6.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (Ft-Ir).	37
5.6.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (ESI).	38
5.7 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	41
5.8 RESISTENCIA A LOS SULFATOS	42
5.9 RESISTENCIA A LOS ÁCIDOS	45
5.10 ACCIÓN DE LAS BASES	46
6. PARTE EXPERIMENTAL	48
6.1 CONVERSIÓN DE CAOLÍN A METACAOLÍN	48
6.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL MATERIAL DE PARTIDA (CAOLÍN Y METACAOLÍN)	48
6.2.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier.	48
6.2.2 Análisis por Difracción de Rayos x.	49
6.3 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO	50
6.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO	52
6.4.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier.	52
6.4.2 Análisis por Difracción De Rayos X.	52
6.5 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO	53
6.5.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier.	53
6.5.2 Análisis de Difracción de Rayos X.	53
6.6 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	53
6.7 DISEÑO DE LA MEZCLA	56
6.8 PRUEBAS MECÁNICAS	58
6.9 PRUEBAS ELÉCTRICAS	58
6.9.1 Proceso de corrosión.	58
6.10 PRUEBAS QUÍMICAS	61
7. RESULTADOS	62
7.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE CAOLÍN Y METACAOLÍN	62

7.1.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier de Caolín.	62
7.1.2 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier del Metacaolín.	63
7.1.3 Análisis por Difracción De Rayos X de Caolín.	63
7.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO	66
7.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL GEOPOLÍMERO OBTENIDO	69
7.3.1 Análisis por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier del Geopolímero.	69
7.3.2 Análisis de Difracción por Rayos X del Geopolímero.	70
7.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO	71
7.4.1 Resistencia a la compresión.	71
7.5 PRUEBAS ELÉCTRICAS	74
7.6 ANÁLISIS QUÍMICOS	79
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de polisialatos de sodio con su respectivo nombre abreviatura y formula	26
Tabla 2. Relación entre la formula química y la estructura aniónica de los silicatos	30
Tabla 3 tipos de cementos comunes relacionados con los porcentajes de masa de cada componente.	35
Tabla 4. Parámetros de medición por difracción de rayos x	49
Tabla 5. Composición de la mezcla utilizada en probetas de sustitución 0%	57
Tabla 6. Composición de mezcla para probetas con sustituciones de 10, 20 30% de geopolímero	57
Tabla 7. Composición de la mezcla utilizada para probetas con porcentajes 10, 20 y 30 % de geopolímero destinadas para pruebas eléctricas	57
Tabla 8. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del caolín	64
Tabla 9. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del metacaolín	66
Tabla 10. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del metacaolín	70
Tabla 11. Resultados de resistencia a la comprensión para probetas de sustitución 0, 10, 20 y 30 % de geopolímero en diferentes días de fraguado.	72
Tabla 12. Valores propios para un circuito equivalente sencillo de varias muestras evaluadas en días 1, 2 y 11	79
Tabla 13. Pesos registrados para solidos inmersos en soluciones de base, ácido y sulfato durante 2 días	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura de un polisialato de sodio	27
Figura 2. Piezas de diferentes aplicaciones, fabricadas con geopolímeros	29
Figura 3. Estructura de un caolín en donde se muestran los tetraedros de silicio y octaedros de alúmina.	31
Figura 4. Circuito equivalente sencillo	40
Figura 5. Diagrama de Nyquist para un circuito equivalente sencillo	41
Figura 6. Diagrama de Bode para un circuito equivalente sencillo	41
Figura 7. Caolín calentado a 700 °C para obtención de metacaolín	48
Figura 8. Preparación de muestras de caolín y metacaolín para análisis por Difracción de Rayos x	49
Figura 9. Mezcla de caolín, arena y silicato de sodio agitados mecánicamente	50
Figura 10. Geopolímero al finalizar la síntesis sin triturar	51
Figura 11. Molino de bolas y mezcla en trituración final	51
Figura 12. Macerado del geopolímero en morteros electrónicos de ágata	52
Figura 13. Moldes utilizados para construcción de probetas	54
Figura 14. Construcción de probetas de concreto para fines mecánicos	55
Figura 15. Construcción de probetas de concreto para fines eléctricos	55
Figura 16. Probetas elaboradas, sometidas a diferentes tiempos de fraguado	55
Figura 17. Electrodo de grafito y acero empleados	56
Figura 18. Prueba mecánica en la Máquina Universal de Ensayos	58
Figura 19. Probetas sumergidas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 2% con oxígeno burbujeante. .	59
Figura 20. Medidor de impedancias ACM Instruments del GIC	60
Figura 21. Probeta sometida al seguimiento de corrosión con EIS	60

Figura 22. Solidos de concreto sumergidos en soluciones de ácido, sulfato y base	61
Figura 23. Espectro IRTF de Caolín	62
Figura 24. Espectro IRTF de Metacaolín	63
Figura 25. Difractograma de Caolín	64
Figura 26. Difractograma de Metacaolín	65
Figura 27. Espectro IRTF de Geopolímero	70
Figura 28. Difractograma del geopolímero	71
Figura 29. Esquema comparativo de resistencia a la compresión a las diferentes muestras	73
Figura 30. Grafico comparativo de valores de resistencia a la compresión entre probetas del 10% y cemento teniendo en cuenta los días de fraguado	74
Figura 31. Análisis gráfico de Matlab para seguimiento de corrosión correspondiente a probeta de 0% geopolímero 90 días de fraguado	75
Figura 32. Análisis gráfico de Matlab para seguimiento de corrosión correspondiente a probeta de 10% geopolímero 90 días de fraguado.	75
Figura 33. Diagrama, de Nyquist 10% geopolímero día 1	76
Figura 34. Diagrama, de Nyquist 10% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11	76
Figura 35. Diagrama de bode 10% geopolímero día 1	76
Figura 36. Diagrama de bode 10% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11	77
Figura 37. Diagrama de Nyquist 0% geopolímero día 1	77
Figura 38. Diagrama de Nyquist 0% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11	77
Figura 39. Diagrama de bode 0% geopolímero día 1	78
Figura 40. Diagrama de bode 0% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11	78

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ESPECTRO IR DEL CEMENTO	100
ANEXO B. DIFRACTOGRAMA DEL CEMENTO	101
ANEXO D. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH	103
ANEXO E. LISTA DE PICOS OBTENIDOS POR DRX DE CAOLÍN, USANDO SEARCH MATCH PEAK SEARCH SETTINGS	107
ANEXO F. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH	109
ANEXO G. DATOS OBTENIDOS POR DRX DE METACAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH	113
ANEXO H. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A BASE DE METACAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH	114
ANEXO I. LISTA DE PICOS OBTENIDOS POR DRX DE UN GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A BASE DE METACAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH	117
ANEXO J. DATOS OBTENIDOS POR EIS	118

RESUMEN

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

AUTOR: DIANA CAROLINA SANDOVAL CARREÑO**

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

Actualmente la industria cementera está en constante crecimiento, destacando la evolución y mejoramiento del cemento. Por esta razón desde hace varios años se ha incrementado la investigación en materiales, mostrando el perfeccionamiento del material cementante. Estos mejoramientos se centran en la adición de materiales que confieren propiedades mecánicas, de durabilidad y bajo impacto ambiental; entre estos materiales se destacan los geopolímeros, que son polímeros inorgánicos, originados por la activación de material puzolánico en contacto con soluciones alcalinas. Este tipo de polímeros son usados junto al cemento para la conformación del concreto; generando una disminución de emisiones nocivas (CO₂, óxidos de azufre y nitrógeno) provenientes de la producción del clinker para la fabricación del cemento.

En este trabajo se sintetizó un geopolímero a base de metacaolín, el cual fue adicionado a diferentes mezclas de concreto en diferentes porcentajes, con el fin de reemplazar un porcentaje del cemento por el polímero, posteriormente se realizaron probetas con el fin de efectuar análisis de tipo mecánico (resistencia a la compresión), eléctrico (espectroscopia de impedancia electroquímica EIS) y químico (resistencia a sulfatos, ácidos y bases). Las caracterizaciones estructurales se realizaron por medio de las técnicas de rayos x e infrarrojo, las cuales permitieron identificar tanto las sustancias de partida como el material sintetizado.

Finalmente se obtuvo un concreto con algunas propiedades mejoradas con respecto a las de la mezcla ordinaria de concreto y con menor proporción de cemento.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Directores: Lic. en Química, Ph. D. y M. Sc. Ángela Marcela Montaña; 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 METAKAOLINITE USED IN THE GENERATION OF GREEN CONCRETE.*

AUTHOR: DIANA CAROLINA SANDOVAL CARREÑO**

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

Currently the cement industry is constantly growing, highlighting the evolution and improvement of the cement. For this reason several years has increased research in materials, showing the improvement of the cementitious material. These improvements are centered on the addition of materials which confer mechanical properties, durability and low environmental impact between these materials highlights the geopolymer, which are inorganic polymers, caused by activation of pozzolanic material in contact with alkaline solutions. Such polymers are used together for forming cement concrete; generating a decrease of harmful emissions (CO₂, sulfur and nitrogen oxides) from the production of the clinker for cement production.

In this work was synthesized based geopolymer metakaolin, which was added to concrete mixes different in different percentages, in order to replace a proportion of the polymer cement, test pieces were subsequently carried out in order to perform analyzes of type mechanical (compression resistance), electrical (EIS impedance spectroscopy) and chemical (resistance to sulfates, acids and bases). The structural characterizations were performed by means of x-rays and infrared techniques, which allowed the identification of both the starting materials and the synthesized material.

Finally obtained concrete with some improved properties over those of ordinary concrete mix and with a smaller proportion of cement.

* 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

La industria cementera está en constante crecimiento, por ello las investigaciones han centrado su atención en la evolución de nuevos materiales de construcción y el mejoramiento del material cementante. Estas investigaciones se basan principalmente en la adición de componentes que confieren propiedades mecánicas, de durabilidad y bajo impacto ambiental. Entre estos materiales se destacan los geopolímeros, que son polímeros inorgánicos, originados por la activación de material puzolánico en contacto con soluciones alcalinas. Este tipo de polímeros son usados, junto al cemento convencional, para conformar el concreto; disminuyendo las emisiones nocivas (CO_2 , óxidos de azufre y nitrógeno) provenientes de la producción del Clinker, empleado en la fabricación de cemento. [1,2]

Este trabajo de investigación se evaluó el desempeño de probetas de concreto; elaboradas con cemento, agregados y geopolímero. Este último sintetizado a partir de caolín tratado térmicamente (metacaolín), por la activación de silicato de sodio (Na_2SiO_3) básico. Se obtuvo un material con propiedades mecánicas, químicas y eléctricas mejoradas en comparación al cemento convencional (cemento portland tipo I). Los análisis mecánicos eléctricos y químicos practicados permitieron clasificar el material como eficiente en construcciones civiles y de bajo impacto ambiental debido a la disminución de emisiones generadas en la producción de cemento, en razón a la sustitución por el polímero.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Fabricar un concreto verde a partir de la adición de geopolímero sintetizado a base de metacaolín, que presente buenas propiedades químicas, mecánicas y eléctricas.

1.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar estructuralmente el metacaolín.
- ✓ Elaborar un geopolímero a partir de metacaolín.
- ✓ Establecer la concentración óptima de álcali adicionada en la geopolimerización, para obtener mejores propiedades (eléctricas, químicas y mecánicas) en el concreto.
- ✓ Caracterizar estructuralmente el geopolímero sintetizado.
- ✓ Determinar la relación porcentual óptima de geopolímero, cemento, y arena para la elaboración de concreto.
- ✓ Identificar la relación del geopolímero empleado en la formación del concreto, con propiedades presentadas por este.
- ✓ Evaluar propiedades mecánicas, químicas y eléctricas del concreto elaborado.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La fabricación de cemento portland comienza con la explotación de piedra caliza de donde se obtiene carbonato de calcio, este material principal, junto con otros materiales arcillosos son combinados, triturados y llevados a un horno en el que se calcinan, liberando dióxido de carbono; proveniente del carbonato de calcio y de los combustibles utilizados durante el calentamiento. Este material es pulverizado y mezclado con yeso, generando emisiones de material particulado a la atmosfera, más conocidas como lluvia sólida (blobbing). Finalmente de esta mezcla es obtenido el cemento. [2]

El concreto se utiliza en la construcción de la mayoría de las edificaciones, en las cuales se combina con un refuerzo de acero, este conjunto se denomina hormigón armado y proporciona gran estabilidad a las construcciones ya que posee alta resistencia mecánica a la compresión y a la tensión.

2.1 FUNDAMENTO DEL PROBLEMA

Las emisiones de CO₂ a la atmosfera constituyen uno de los principales contaminantes mundiales, ya que éste es uno de los gases de efecto invernadero, que no obstante, en concentraciones normales no produce efectos negativos. En los últimos años la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera ha aumentado considerablemente, llegando a superar valores de 370 ppm. Estos valores corresponden al doble de la concentración de los últimos 160.000 años [3]; generándose así el tan renombrado cambio climático, que corresponde a la absorción de radiación infrarroja por parte del CO₂, aumentando la temperatura de la atmosfera debido al bloqueo provocado por este gas. Se estima que para el

año 2100 la temperatura puede aumentar entre 2 y 5 °C, además un aumento progresivo del nivel del mar debido al deshielo y la expansión termal del agua de los océanos. [4, 5, 6]

Las industrias cementeras producen un 5% de las emisiones mundiales de CO₂ en la atmosfera, ya que en la fabricación de cemento se produce aproximadamente 0,55 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento fabricado. Según el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), en Colombia el CO₂ producido por la fabricación de cemento, ha venido aumentando con los años al punto en que se estima que la concentración total de CO₂ se incrementó en un 17,61% entre los años 2000 y 2006, haciendo de esta emisión una problemática que afecta la calidad del ambiente de nuestro país y nuestro planeta en general. [7,8]

Existen otros contaminantes en la fabricación del cemento, la lluvia sólida y los óxidos de azufre. En el caso de la lluvia sólida, esta corresponde a las emisiones de polvos finos por chimeneas, que generar afecciones de tipo respiratorio. Los óxidos de azufre conforman la menor proporción, ya que la mayoría del azufre contenido en el material arcilloso se combina con el *clinker*, sin embargo una mínima parte surge como dióxido de azufre, el cual es un gas de un mayor efecto invernadero. [9]

Las estructuras de cemento reforzadas con barras de acero generan estabilidad, sin embargo son susceptibles a la corrosión reduciendo el tiempo de vida útil de la estructura y generando rupturas. La corrosión comienza con la presencia de cloruros que se introducen a la mezcla en el momento de la preparación o es producto del proceso de carbonatación, el cual se produce en la atmosfera y reduce la alcalinidad del concreto, disminuyendo la eficiencia del material con el paso del tiempo. [10]

3. JUSTIFICACIÓN

Una alternativa para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y mejorar las propiedades presentes en las mezclas de concreto conocidas, es la incorporación de nuevos materiales poliméricos. Con esto se espera reducir la proporción de cemento portland (portland tipo I) en la mezcla de hormigón, igualando o mejorando propiedades mecánicas químicas y eléctricas disminuyendo el impacto ambiental y los efectos producidos por la corrosión.

4. HIPÓTESIS

Al realizar la geopolimerización de un aluminosilicato (metacaolín) y emplearlo para la elaboración de concreto verde se disminuirá: la emisión de CO₂ y los efectos originados por la corrosión, se obtendrán materiales con buenas características mecánicas, químicas y eléctricas para ser utilizados en diferentes ambientes y diversos tipos de construcciones.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ESTADO DEL ARTE

Las tendencias mundiales de investigación en materiales de construcción se basan en la utilización 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. [25]

Estos recursos naturales son parte fundamental del mejoramiento del concreto, van desde agregados sencillos como puzolanas en su estado natural, hasta transformaciones y reacciones de varios tipos; tal es el caso de los geopolímeros, que actualmente son protagonistas de nuevos materiales de excelentes propiedades. [26, 27]

La geopolimerización en los últimos años ha surgido como alternativa viable para procesar y agregar valor a los residuos industriales de alúmino-silicato; dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas, altas inercias químicas y altas resistencias eléctricas, que permiten encapsular residuos peligrosos. Los desechos industriales que proceden de diversos tipos de arcillas se han empleado como materiales de partida para la producción de geopolímeros y fabricación de áridos ligeros mediante el proceso de ataque alcalino.

Además de obtener valor agregado a los residuos por medio de geopolimerización, cabe destacar su desempeño como agente inmovilizador de materiales peligrosos. Los polímeros inorgánicos se han fabricado con fórmulas diferentes, con el fin de otorgar propiedades mecánicas, composiciones y

microestructuras específicas; que dan lugar a un material interesante con características diversas. [28, 29]

Van Denventer, describe los polímeros inorgánicos como un material que puede constituirse de diferentes tipos de aluminosilicatos y activarse con diferentes bases, sin embargo, un estudio realizado en la universidad de Melbourne, estableció que con el uso de NaOH, los geopolímeros muestran un mejor grado de disolución que con otras bases activadoras, a diferencia del uso de KOH, que disminuye la disolución generando un efecto polimerizante, obteniendo geopolímeros únicamente con alta resistencia al impacto.[30]

Uno de los materiales más utilizados para la síntesis de geopolímeros son las cenizas, las cuales después de ser activadas, presentan un carácter amorfo, con diferentes fases cristalinas minoritarias. Los materiales preparados a base de cenizas volantes activadas por álcalis exhiben resistencia a la acción corrosiva de soluciones salinas, buena resistencia a las heladas y pueden soportar exposición a temperaturas aproximadas a 600 ° C. Existen otros aluminosilicatos con los que se obtienen buenos resultados como metacaolines provenientes de la transformación térmica de caolines, que también pueden activarse con KOH obteniendo así hormigones con buenas propiedades mecánicas que dependen del tiempo de reacción de la metacaolín y de la solución activadora usada. [31]

Actualmente la síntesis de geopolímeros no solo se hace en el laboratorio si no que existen técnicas de modelamiento matemático, que se basan en la construcción de modelos estadísticos termodinámicos, que proporcionan una representación precisa de la distribución de los átomos, de tal manera que pueden prepararse geopolímeros con mayor precisión y teniendo una información más detallada, acerca del mecanismo por el cual se generan las reacciones y las propiedades que pueden obtenerse. [32]

Además de las aplicaciones y buenas propiedades que tienen los geopolímeros mezclados con el cemento, existen aplicaciones diversas no relacionadas con el campo de materiales de construcción. Una de estas aplicaciones es la clarificación de agua potable, donde se eliminan las partículas coloidales en procesos como coagulación y floculación, remplazando sales de aluminio por geopolímeros en el tratamiento de aguas residuales. [33]

5.2 GEOPOLÍMERO

Los Geopolímeros constituyen gran parte de los llamados nuevos materiales, que según sus propiedades exhiben diversas aplicaciones; Siendo la elaboración de súper concretos su uso más destacado, debido a la alta resistencia mecánica, alta resistencia térmica, baja conductividad eléctrica y bajas emisiones de CO₂, que presentan los concretos elaborados con geopolímeros, esta última característica lo convierte en un material amigable con el medio ambiente, ya que puede sintetizarse a partir de aluminosilicatos, algunos de ellos procedentes del suelo o desechos generados en la industria, que disminuyen la producción de CO₂ por producción de cemento

Se denomina geopolímero al conjunto de microestructuras amorfas, que consisten en una red tridimensional de aluminosilicatos; formadas principalmente de aluminio, silicio y oxígeno. [11]

El término de geopolímero fue conferido por Davidovits, quien no solo se interesó por la estructura; sino que también definió términos particulares y abreviados para algunos de ellos, entre ellos los polisialatos que se muestran en la *tabla 1*

Tabla 1 Clasificación de polisialatos de sodio con su respectivo nombre abreviatura y formula

NOMBRE	FORMULA	
Poli (Sialato)	(O-Si-O-Al-)	
Poli (sialato siloxo)	(O-Si-O-Si-O-Al-)	
Poli (sialato disiloxo)	(-O-Si-O-Si-O-Si-O-Al)	

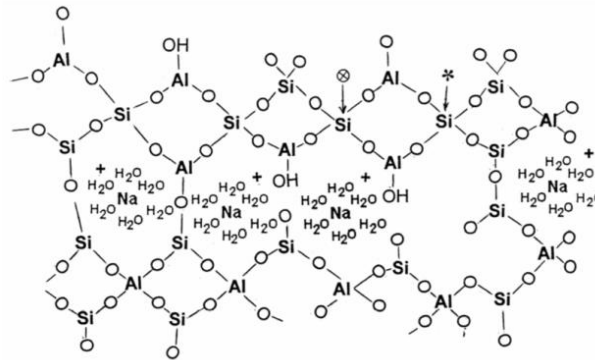
Los polisialatos son polímeros inorgánicos semicristalinos que consisten en cadenas y anillos, contienen Si y Al y O combinados con número de coordinación 4 y con formula empírica definida como:

$$M_n^+ - SiO_2 \quad z - AlO_2 \quad \bar{n} * wH_2O$$

Donde z puede tomar valores de: 1, 2 o 3; M es un catión monovalente y n es el grado de polimerización, de esta manera se puede ilustrar como Z define la cantidad de grupos sialatos, para dar lugar a varios tipos de polisialatos mostrados en la *tabla 1*. [34]

En la *figura 1* se muestra una pequeña parte de la red que puede formar un geopolímero, ilustrándolo de una manera más detallada

Figura 1. Estructura de un polisialato de sodio



Fuente [35]

5.2.1 Geopolimerización. La geopolimerización consiste en una reacción química de aluminosilicatos (Si_2O_5 , Al_2O_3), con polisilicatos alcalinos, con el fin de obtener enlaces Si-O-Al. Los polisilicatos son generalmente silicatos de sodio o de potasio, que se activan al disolverse en una solución básica, esta solución hidroliza los materiales de partida para crear monómeros inorgánicos (geonómeros).

La geopolimerización depende de la capacidad del ion aluminio para cristalizar, es decir la capacidad que posee este ion para cambiar su número de coordinación en 6 o 4.

Davidovits y colaboradores propusieron tres etapas fundamentales en la geopolimerización, que tiene una dependencia exclusiva de la naturaleza misma de los aluminosilicatos, la concentración de la solución activadora, por ende la concentración de los silicatos, la temperatura y el contenido de agua. Estas etapas ocurren de manera simultánea, se muestran a continuación

- Disolución o hidrolisis
- Restructuración
- Policondensación

a) Disolución/hidrólisis:

La Geopolimerización comienza con la hidrólisis de H^+ con cationes monovalentes (Na^+ , K^+); posteriormente los aluminosilicatos (materiales de partida) se disuelven, originando así la ruptura de bandas de Si-O-Si o Si-O-Al presentes, seguido de esta ruptura se forman especies reactivas de $Si(OH)_4$ y $Al(OH)_4^-$. Las cuales son la pieza fundamental en la policondensación.

b) Reestructuración:

En la solución, los precursores de aluminio poseen movilidad para situarse en un estado termodinámicamente más estable.

c) Policondensación

En esta etapa las especies precursoras culminan con la polimerización de Al^{3+} y Si^{4+} , generando como producto secundario H_2O . [36]

5.2.2 Campos de aplicación de geopolímeros. Los geopolímeros son materiales utilizados desde hace mucho tiempo, por lo cual en el transcurso del mismo, la industria de polímeros inorgánicos ha evolucionado en su fabricación y uso.

Las primeras aplicaciones de estos polímeros se registran en 1973, con productos de construcción resistentes al fuego, en aglomerados de madera desarrollados por JJ Legrand; seguido de esta aplicación en 1977 la empresa AGS (Argiles y Minéraux) fabricó una mezcla de caolinita y cuarzo, de donde se obtuvo un polisialato llamado SILIFACE COR 70, con propiedades excepcionales; tales como estabilidad y resistencia térmica; estos polímeros se usaron para la fabricación de fusibles eléctricos.

A partir de las anteriores aplicaciones y de las nuevas terminologías propuestas por Davidovits, la producción e investigación de polímeros inorgánicos comenzó a crecer, muestra de ello fueron las diversas aplicaciones que tendrían en poco

tiempo, algunas de ellas en: fabricación de Ladrillos; cerámicas tradicionales y de alta calidad; policondensación de resinas orgánicas; piezas propias de ingeniería mecánica, aeronáutica y nuclear; reproducción de objetos de arte; aislamiento térmico de edificios y hornos e investigación arqueológica. Ver *figura 3*

Figura 2. Piezas de diferentes aplicaciones, fabricadas con geopolímeros



Fuente [36]

La aplicación más importante del uso de geopolímeros es la elaboración de cementos de alta resistencia, que comenzó en 1983 con la asociación de Lone Star Industries y Shell; con el fin de desarrollar, producir y comercializar una nueva clase de materiales con gran impacto y de gran alcance en la construcción, la arquitectura y la ingeniería debido a la alta resistencia térmica, mecánica, eléctrica, bajo coste de fabricación y disminución de la contaminación por emisiones de CO₂ que los geopolímeros presentan. Esta aplicación siendo la más importante hasta el momento ha revolucionado el campo de investigación en materiales de construcción. [37]

5.3 SILICATOS Y ALUMINO SILICATOS

Los silicatos y aluminosilicatos son una clase de materiales muy variados que se encuentran en estado natural, están constituidos por minerales que se mezclan

con los diferentes aniones del silicato, estos iones de silicato se unen con diferentes cationes como se muestra en la *tabla 2*.

Tabla 2. Relación entre la formula química y la estructura aniónica de los silicatos

Relación Si:O	Numero de Oxígenos por Si		Tipo de anión silicato	Ejemplo
	punto	No punto		
1:4	0	4	SiO_4^{-4}	MgSiO_4 Olivino
1:3.5	1	3	Dímero $\text{Si}_2\text{O}_7^{-6}$	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ Rankinita
1:3	2	2	Cadenas $(\text{Si}_2\text{O}_3)_n^{-2n}$ Anillos $(\text{Si}_3\text{O}_9^{-6})$ $(\text{Si}_6\text{O}_{18}^{-12})$	Na_2SiO_3 , MgSiO_3 Piroxeno
1:2.5	3	1	Hojas infinitas $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{-2n}$	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$
1:2	4	0	Armazón tridimensional	SiO_2

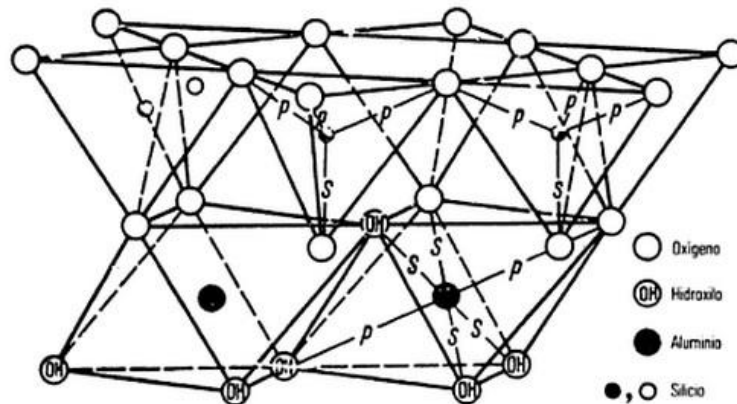
Fuente [40]

En La anterior tabla se aprecia que cationes metálicos pertenecientes al grupo de los alcalinos y alcalinotérreos no forman parte de los silicatos, sin embargo el ion silicato puede unirse a Cationes de aluminio para dar lugar a los aluminosilicatos, que están presentes en diferentes minerales arcillosos. [41]

5.3.1 Caolín. Los Caolines son rocas formadas fundamentalmente por minerales arcillosos del grupo del Caolín algunas de ellas son: caolinita, dickita, nacrita, halloysita; acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales. Para su utilización, deben ser refinadas y procesadas para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes.

La Caolinita $[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$, corresponde estructuralmente a un mineral arcilloso del tipo 1:1, es decir, formado por una capa de tetraedros de silicio, combinada con otra capa de octaedros de alúmina a través de grupos hidroxilo, que están compartidos entre las dos láminas. 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, su estructura se muestra en la *figura 3*. [12]

Figura 3. Estructura de un caolín en donde se muestran los tetraedros de silicio y octaedros de alúmina.



Fuente: <http://books.google.es/books?isbn=8429114033>

Las arcillas como los caolines pueden sufrir transformaciones durante un proceso de cocción, que pueden ser de naturaleza químico-física (variación de la estructura química y cristalina) o de naturaleza mecánica (referentes a dilatación, porosidad y resistencia mecánica).

En estas transformaciones se pueden apreciar varias etapas:

- Calentamiento hasta 200 °C: Se elimina la humedad residual que se encuentra en entre los planos moleculares de la arcilla.
- Calentamiento de 200°C a 350°C: no se producen variaciones.

- Calentamiento de 350°C a 700°C: las sustancias orgánicas se queman y se volatilizan.
- Calentamiento de 700°C a 900°C: Eliminación del agua de combinación, este fenómeno requiere una absorción de calor (reacción endotérmica).
- Calentamiento por encima de 900°C: El silicato se enriquece en alúmina y tiende a transformarse en mulita. [38]

5.3.2 Metacaolín. La calcinación del caolín como se menciona anteriormente, en un rango de temperatura determinado da origen a una metacaolín de alta reactividad, la cual es una puzolana de clase N (natural). Por definición, una Puzolana es un material de silicio o aluminosilicato, que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido cálcico, Ca(OH)_2 , a temperatura ordinaria y forma compuestos de propiedades cementantes. Las puzolanas pueden ser de origen natural (algunas rocas volcánicas) o de origen artificial, en cuyo caso algunas corresponden a subproductos y desechos industriales (arcillas activadas, cenizas volantes, humo de sílice, ceniza de cascarilla de arroz, etc.)

Entre 500° y 800° el caolín se convierte en metacaolín por la pérdida de agua (deshidroxilación), este es un proceso endotérmico ya que es necesaria gran cantidad de energía para eliminar los iones hidroxilo unidos químicamente; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina. Fundamentalmente su aplicación se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial, en la producción de morteros y hormigones, pues se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad [12].

5.4 CEMENTO

Es un conglomerante hidráulico que posee propiedades de adhesión y cohesión, empleado para la construcción, debido a su composición (arcilla, caliza y yeso), a su abundancia en la naturaleza y a la estabilidad que poseen los compuestos resultantes después de su hidratación.

5.4.1 Componentes del cemento. El cemento contiene varios componentes que se indican a continuación de acuerdo con las proporciones de dichos componentes y a la dosificación dan origen a los distintos tipos de cementos:

a) Clínteres portland:

Es el producto de la calcinación mezclas preparadas artificialmente que contienen calizas y arcillas hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes.

b) Clínteres aluminosos:

Son productos obtenidos por fusión de una mezcla de calizas y bauxitas de composición y granulometría adecuadas para conseguir un contenido mínimo de Alúmina del 36 %.

c) Escorias siderúrgicas :

Son granulados procedentes de hornos, que se obtienen por templado o por enfriado violento con agua o con aire, de subproductos de procesos siderúrgicos.

d) Puzolanas naturales:

Son principalmente rocas volcánicas, vítreas y de naturaleza alcalina contienen constituyentes (sílice y alúmina) capaces de fijar cal a la temperatura ambiente en presencia de agua, formando compuestos de propiedades hidráulicas.

e) Cenizas volantes:

Son sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica, de los polvos que acompañan a los gases de la combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

f) Humo de sílice:

Es un subproducto de la obtención del silicio y del ferrosilicio, se reduce en horno eléctrico cuarzo muy puro y carbón, recogándose del humo generado, mediante filtro electrostático, partículas de muy pequeño diámetro formadas, principalmente, por sílice muy reactiva.

g) otros (Rellenos calizos):

Son compuestos principalmente de carbonato cálcico en forma de calcita (superior al 85 %), que molidos conjuntamente con el clinker portland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos.

h) otros (Reguladores de fraguado):

Son materiales naturales o artificiales que se añaden a los clínkeres, en pequeñas proporciones, con el fin de obtener un fraguado adecuado.

i) Aditivos de los cementos:

Son productos que facilitan el proceso de molienda.

5.4.2 Clasificación de los cementos. Los cementos según su aplicación y la resistencia que posean pueden ser:

- Cementos comunes.
- Cementos resistentes a los sulfatos y/o agua de mar.
- Cementos blancos.
- Cementos de bajo calor de hidratación.

- Cementos para usos especiales.

A continuación en la *tabla 3* se muestran algunas especificaciones para diferentes tipos de cementos comunes.

Tabla 3 tipos de cementos comunes relacionados con los porcentajes de masa de cada componente.

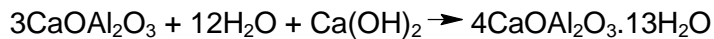
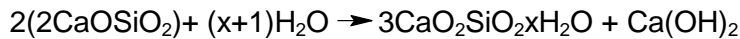
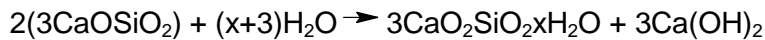
Tipo de cemento	clase	% de masas						
		clinker	Escoria	Humo de sílice	Puzolanas naturales	Cenizas volantes	caliza	otros
CEM I	Cemento portland tipo I	95-100						0-5
CEM II	Cemento portland con escoria	65-94	6-35					0-5
	Cemento portland con humo de sílice	90-94		6-10				0-5
	Cemento portland con puzolana	65-94			6-35			0-5
	Cemento portland con ceniza volante	65-94				6-35		0-5
	Cemento portland con caliza	80-94					6-20	0-5
	Cemento portland mixto	80-94				6-35	4-6	
CEM III		20-64	36-80					0-5
CEM IV		45-89			11-55			0-5
CEM V		40-64	18-30		18	30		0-5

5.4.3 Propiedades físicas y mecánicas de los cementos. El cemento posee muchas propiedades que hacen de él un material ampliamente utilizado y uno de los más importantes en materia de construcción, las características físicas y mecánicas más importantes son:

- Fraguado.
- Expansión.
- Resistencia a la compresión.

a) Fraguado:

Hace referencia a un período de tiempo continuo, que se inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento, están presentes las siguientes reacciones:



b) Expansión:

Consiste en determinar el tiempo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debida a la hidratación del óxido de calcio y/o del óxido de magnesio libres.

c) Resistencias a la compresión:

La resistencia a la compresión se establece como la característica más importante asociada a un material cementante y hace referencia a la cantidad de fuerza (presión) que puede soportar un mortero antes de su deformación. [42]

5.5 CONCRETO

Es una mezcla que contiene cemento, grava (agregado grueso), arena (agregado fino) y agua; esta mezcla posee propiedades de resistencia, durabilidad, moldeado y cohesividad. Las anteriores propiedades se observan en los diferentes estados del concreto:

- Forma líquida (moldeado)
- Forma sólida (cohesividad, resistencia y durabilidad)

Para llevar a cabo el proceso de fabricación del concreto es indispensable seleccionar una relación agua/cemento, que asegure la calidad de la matriz cementante, la cual constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto. El porcentaje restante corresponde a los agregados, los cuales se dividen en dos grupos.

Los agregados finos que consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que no superan los 10mm y los agregados gruesos, aquellos cuyas partículas alcanzan un máximo de 152mm, siendo el tamaño entre 19mm y 25mm el usado con mayor frecuencia. Generalmente en edificaciones se utiliza el concreto junto con refuerzos de acero, a este material se denomina hormigón armado. [18]

5.6. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

5.6.1 Difracción de rayos x. Es un método de análisis no destructivo, que puede ser usado sobre muestras en polvo o mono cristal, permitiendo el estudio en compuestos químicos y biológicos, proporcionando medidas precisas de dimensiones moleculares fundamentales. En el análisis de polímeros inorgánicos, es utilizada para la caracterización estructural de materiales e identificación de fases cristalinas, confirmando las condiciones termodinámicas y cinéticas favorables en la obtención de un producto semicristalino. [19]

5.6.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (Ft-Ir). Este método de análisis se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los

niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y al acoplamiento vibracional. Posee amplias aplicaciones en análisis cualitativo y cuantitativo. Usada especialmente en investigación y en la industria como una simple y confiable practica para realizar mediciones y control de calidad. Al medir a una frecuencia específica a lo largo del tiempo, se pueden medir cambios en el carácter o la cantidad de un enlace particular, esto es útil para medir el grado de polimerización en la manufactura de polímeros. [20]

5.6.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (ESI). Esta técnica micro analítica consiste en un método electroquímico que se utiliza en estudios de corrosión de materiales, la cual se basa fundamentalmente en el uso de una señal de corriente alterna que es aplicada a un electrodo. En este procedimiento generalmente se aplica una señal de potencial a un electrodo y se mide la respuesta en términos de corriente, variando la frecuencia; existen casos en que se puede aplicar la señal de corriente y esperar la respuesta en términos de potencial del sistema. Finalmente para todos los casos se obtiene un espectro de impedancias. [23]

En otras palabras la técnica consiste en la aplicación de una perturbación sinusoidal de potencial y frecuencia variable matemáticamente definida como el cociente entre el potencial y la intensidad medida a la salida como se muestra en la siguiente ecuación

$$Z = \frac{E_0}{I_0} = \frac{E_0 * \text{sen}(\omega * t)}{I_0 * \text{sen}(\omega * t + \varphi)} = Z_0 \frac{\text{sen}(\omega * t)}{\text{sen}(\omega * t + \varphi)}$$

De donde: $E_0 = \text{potencial}$, $I_0 = \text{intensidad}$, $\omega = \text{frecuencia}$ y $\varphi = \text{desfase}$

Donde la impedancia puede representarse en función de una magnitud Z_0 y un desfase φ .

Como la impedancia está determinada por números complejos, puede ser representada en coordenadas cartesianas y polares, de la parte real Z' se puede obtener la conductancia G y de la parte imaginaria Z'' la capacitancia C mediante las siguientes ecuaciones:

$$Z = \frac{Z'}{\cos \varphi} + b * \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} i = Z' + Z'' i \frac{1}{G} - \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$Z = \frac{a^2 + b^2}{a} \cos \varphi + \frac{b}{a} \sin \varphi i$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

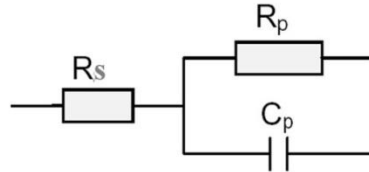
Existen dos formas gráficas para analizar los datos obtenidos en un ensayo de impedancia que son: Diagramas de Nyquist y Bode, que permiten una interpretación cualitativa y cuantitativa de los resultados de la técnica

- Diagrama de Nyquist: La grafica se construye con los valores de Z y Z' , decir el valor real e imaginario de las impedancias, El análisis cualitativo se realiza observando la forma que adopta el grafico.
- Diagrama de Bode:
Donde se representa el logaritmo del módulo de la impedancia ($\log |Z|$) y el desfase φ , en función del log de la frecuencia ($\log \omega$).

En el análisis de impedancias se hace necesaria la selección de un modelo eléctrico que se ajuste con los datos obtenidos de manera experimental, obteniendo así medidas de resistencia de la disolución, la resistencia de

polarización y la capacitancia de la doble capa, todo lo anterior representado en un circuito equivalente (*figura 4*)

Figura 4. Circuito equivalente sencillo



Fuente [43]

R_s representa la resistencia del electrolito, (R_p) es el término de la resistencia a la transferencia de carga, (C_p) la capacitancia de la doble capa.

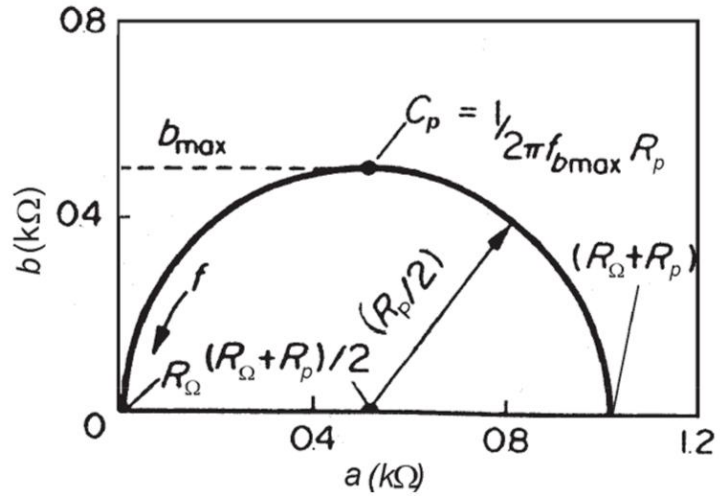
Esta última puede relacionarse con la frecuencia angular de acuerdo con la frecuencia máxima obtenida a partir de una gráfico de Nyquist, las frecuencias están relacionadas de la siguiente manera:

$$\omega = 2\pi f$$

Se debe tener en cuenta que ω es la frecuencia en rad/s; siendo f la frecuencia en Hz).

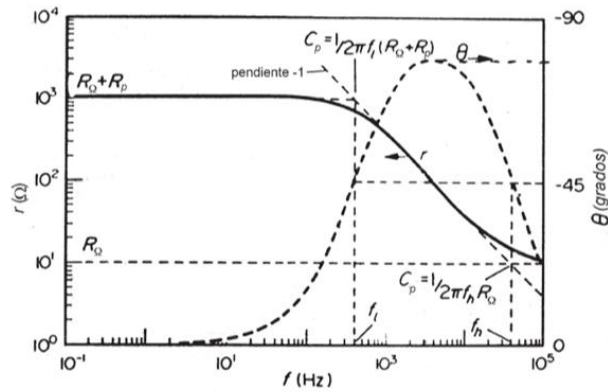
Mediante el análisis gráfico y la aplicación de las ecuaciones mostradas para esta técnica, las señales de impedancia pueden relacionarse con circuitos equivalentes más elaborados, para ello se recurre a las gráficas de Nyquist y Bode, que son una herramienta de gran utilidad para encontrar valores correspondientes a un circuito equivalente (*figuras 5 y 6*). [43]

Figura 5. Diagrama de Nyquist para un circuito equivalente sencillo



Fuente [43]

Figura 6. Diagrama de Bode para un circuito equivalente sencillo



Fuente [43]

5.7 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Ensayo mediante el cual se mide la resistencia a la compresión de un material, mediante la aplicación de una carga, con control de deformación, esta prueba es una de las medidas más comunes para determinar la resistencia mecánica de un

material, generalmente se mide comprimiendo probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión.

El valor de resistencia se calcula mediante la división de la magnitud de la carga de ruptura y el área de la sección que resiste la carga; estos valores se reportan en mega pascales (MPa).

Los valores mínimos aceptados de resistencia a la compresión pueden variar de acuerdo con aplicaciones estructurales del concreto; así pues para estructuras residenciales es 17 MPa, estructuras comerciales 28 y otras hasta 170 MPa. [52]

5.8 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

El concreto sufre deterioro, cuando se pone en contacto con sulfatos, ya que este tipo de compuestos reacciona con los componentes del cemento, originando nuevas sustancias, que en la mayoría de reacciones son de gran volumen; provocando un hinchamiento en el concreto, cuyas tracciones internas asociadas pueden superar la resistencia a tracción del material, causando su fisuración.

Los sulfatos suelen estar presentes en efluentes, desechos industriales y algunas veces hacer parte de los agregados en forma de contaminantes. Los más comunes son los de: amonio, magnesio, sodio, potasio y calcio ya que se encuentran presentes en el suelo o disueltos en las aguas. La agresión del ataque depende de la cantidad de sulfato y los aniones disueltos. [44]

Existen dos formas conocidas de ataque, debidas a la concentración y fuente de iones del sulfato.

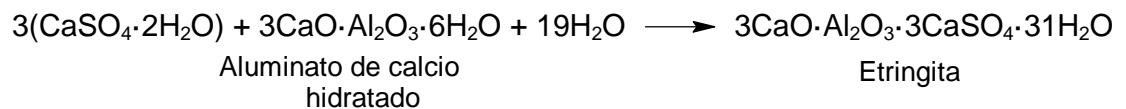
- Expansión del hormigón por cristalización de sales complejas, que tienen origen en dos reacciones químicas:

- a) Reacción con aluminato tricálcico hidratado para formar Etringita, como consecuencia se provoca una disgregación en el concreto permitiendo fácilmente la entrada de agua produciendo por tanto fisuras.
- b) Reacción con otros componentes como cal y magnesio hidratados, para producir sulfato cálcico hidratado; favoreciendo la formación de yeso como resultado del intercambio de cationes. Este tipo de reacciones conlleva a una disminución en resistencia y rigidez del concreto además su expansión y fisuración.

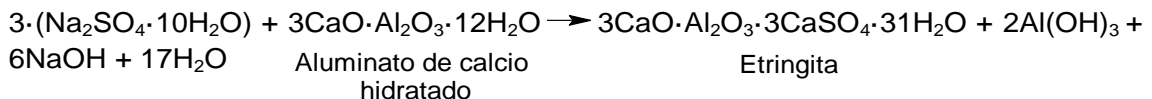
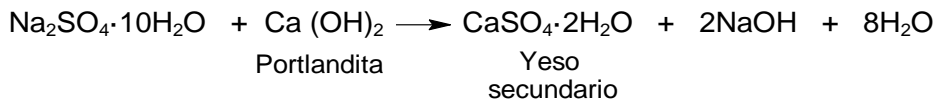
Estas reacciones provocan una disminución de resistencia y de masa debido al deterioro en la cohesión de los productos de hidratación del cemento, y a la acción de sulfatos magnésicos, o bien por la formación de la Thaumásita.

Las reacciones ocurridas dependen del sulfato:

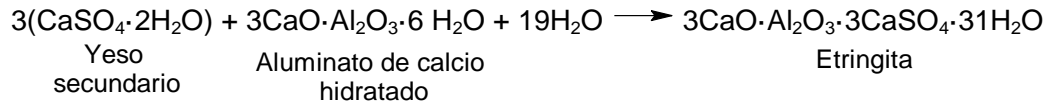
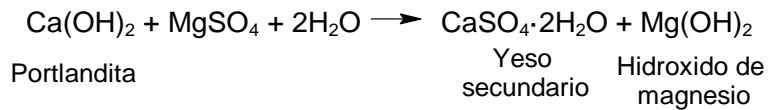
- o Sulfato cálcico:



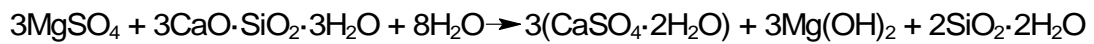
- o Sulfato de sodio: se tienen dos reacciones:



- o Sulfato de magnesio: se obtiene como producto final Etringita:



- Sulfato de sodio:

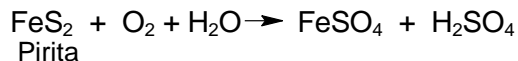


- Sulfuros de hierro:

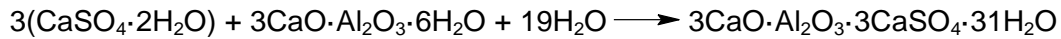
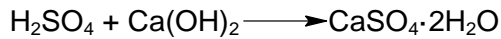
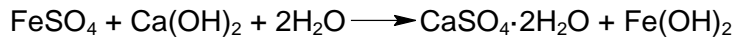
Algunos de ellos como la pirita, pirrotina, marcasita o calcopirita se oxidan en presencia de oxígeno gracias a las condiciones alcalinas del hormigón, produciendo hidróxidos de hierro y ácido sulfúrico.

Sulfato ferroso y ácido sulfúrico reaccionan con los constituyentes alcalinos del hormigón para dar una serie de sulfatos alcalinos y de calcio, además de hidróxido férrico; Posteriormente se produce una expansión secundaria debida a la formación de Etringita:

Oxidación de los sulfuros:



Ataque por sulfatos:



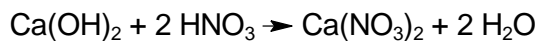
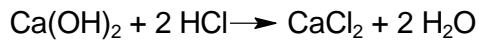
Si el ataque del sulfato se da en presencia de carbonatos, elevada humedad, temperaturas de entre 0 y 10 °C y el contenido de Al_2O_3 de los aluminatos iniciales del cemento está entre 0,4 y 1,0 %, puede formarse $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ (Thaumasita), su formación tiene consecuencias más drásticas que la Etringita, ya que ataca el silicato cálcico hidratado, lo que conlleva a una desintegración completa el hormigón endurecido.

Generalmente la thaumasita se forma como consecuencia de la evolución de etringita, en la que se incorporan grupos Si^{+4} como sustituyentes del aluminio, además de la incorporación de sulfatos y carbonatos en los intersticios. [51]

5.9 RESISTENCIA A LOS ÁCIDOS

El ataque químico más importante que se produce en el concreto por contacto con ácidos, lo ocasiona el ácido sulfúrico, que se forma por oxidación de los sulfuros de hierro descritos anteriormente, ocasionando tensiones internas que llevan a la rotura del material, generalmente precedido por una coloración localizada de color marrón. El concreto en contacto de otros ácidos puede sufrir algunos daños, aunque más leves.

Las reacciones que sufre con los demás ácidos, como el HCl y HNO_3 , son perjudiciales debido a la solubilidad en agua presentada por las sales obtenidas de dichas reacciones:



[45]

5.10 ACCIÓN DE LAS BASES

En la fabricación del cemento, al hidratar el cemento portland se tiene una solución interna que contiene hidróxidos de calcio en forma cristalizada; sodio y potasio en solución.

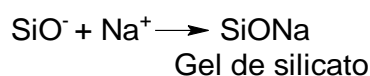
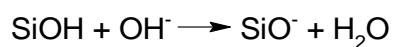
Se produce una reacción denominada álcali-sílice, cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos ácidos reaccionan para formar un gel, que al estar en contacto con agua la absorbe y aumenta de volumen.

Esta reacción depende exclusivamente del grado de cristalización de la sílice, incidiendo en la cinética, dándose más rápidamente cuanto menor es este grado.

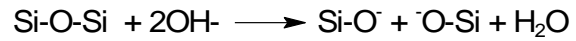
La expansión de volumen que provoca esta reacción está causada por la presión osmótica que alcanzan los geles de silicato alcalino, que se producen de la siguiente manera:

- Reacción ácido-base: neutralización de los grupos silanol (Si-OH)

Por contacto con una solución alcalina.



- Ataque de los puentes de silicio- oxígeno (siloxeno): esta reacción provoca la desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución



Para que estas reacciones se lleven a cabo, será necesario la disponibilidad de grupos OH (álcalis sodio y potasio), sílice reactiva, y agua. Sin embargo los daños por fisuras y expansiones, serian ocasionados siempre y cuando se tuvieran cantidades significativas. [51].

6. PARTE EXPERIMENTAL

6.1 CONVERSIÓN DE CAOLÍN A METACAOLÍN

Se calentó el material (caolín comercial) hasta 700°C a una razón de 10°C por min, durante 5 horas, en un horno marca TERRIGENO modelo D8 serie 2163, ubicado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. (Figura 7)

Figura 7. Caolín calentado a 700 °C para obtención de metacaolín



Fuente: Autor

6.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL MATERIAL DE PARTIDA (CAOLÍN Y METACAOLÍN)

6.2.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier. Los materiales de partida (caolín y metacaolín) fueron sometidos a un análisis por medio de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier, Este ensayo se llevó a cabo por medio de la técnica ATR (attenuated total reflection). El ensayo se llevó a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker

modelo Tensor 27 perteneciente a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

6.2.2 Análisis por difracción de Rayos X. Las muestras de caolín y metacaolín se pasaron por un tamiz malla 400 (*figura 8*), con el fin de preparar las muestras para el análisis, éstas se colocaron en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA), mediante la técnica de llenado frontal y se analizaron en un difractómetro de marca Bruker modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará.

Figura 8. Preparación de muestras de caolín y metacaolín para análisis por difracción de Rayos X



Fuente: Autor

Los parámetros utilizados para esta técnica están consignados en la *tabla 4*

Tabla 4. Parámetros de medición por difracción de rayos X

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 CuKα1

Parámetro	Datos
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0.4 segundos

6.3 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO

El geopolímero se sintetizó a partir de metacaolín (transformación térmica del caolín comercial Faraón), arena, óxido de aluminio Al_2O_3 y una solución activadora de silicato de aluminio (comercial) Na_2SO_3 .

Los componentes se mezclaron en un recipiente de plástico, hasta que la mezcla se homogenizó, con ayuda de un agitador electro mecánico (*figura 9*)

Figura 9. Mezcla de caolín, arena y silicato de sodio agitados mecánicamente



Fuente: Autor

La reacción tuvo una duración de 20 horas, en las que se agitó constantemente con un agitador de plástico, en esta síntesis se realizó en un rango de temperatura de $60^{\circ}C$ a $120^{\circ}C$, la mezcla se solidificó y se realizó el secado en una estufa a

60°C. Seguido de este proceso se procedió al triturado del geopolímero de acuerdo con la norma ASTM 11-87, que establece un tamaño de partícula de 4,75 mm para preparación de concretos; inicialmente se utilizó un triturador manual para finalizar con molino de mordazas y molido de bolas (pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Química de la universidad industrial de Santander) [46]

A continuación se muestran imágenes de la descripción del proceso anterior *figuras 10 y 11*

Figura 10. Geopolímero al finalizar la síntesis sin triturar



Fuente: Autor

Figura 11. Molino de bolas y mezcla en trituración final



Fuente: Autor

6.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL GEOPOLIMERO

6.4.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier. El geopolímero fue sometido a un análisis por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja, para ello se elaboró una pastilla con KBr. Este ensayo se llevó a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker modelo Tensor 27 perteneciente a la escuela de química de la Universidad Industrial de Santander.

6.4.2 Análisis por Difracción De Rayos X. Las muestras de caolín y metacaolín se maceraron en un mortero de ágata (*figura 12*), se pasaron por un tamiz malla 400. Con el fin de preparar las muestras para el análisis por difracción de rayos x, estas se colocaron en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal, y se analizaron en un difractómetro de marca Bruker modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. Los parámetros utilizados para la medición se encuentran especificados en la tabla 4

Figura 12. Macerado del geopolímero en morteros electrónicos de ágata



Fuente: Autor

La identificación de fases cristalinas presentes en las diferentes muestras se realizó mediante la comparación de picos obtenidos con el software Search Match y los difractogramas existentes en la base de datos PDF 2 del International Center for Diffraction Data (ICDD)

6.5 CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DEL CEMENTO

6.5.1 Análisis Por Espectroscopia Infrarroja De Transformada De Fourier. El cemento Diamante se analizó por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja mediante elaboración de pastillas con KBr. Dicho análisis fue llevado a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier Bruker modelo Tensor 27 ubicado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Estos resultados se muestran en anexo 1.

6.5.2 Análisis de Difracción de Rayos X. La muestra de cemento fue pulverizada y tamizada hasta un tamaño de partícula de 38 μm y fue montado en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

La toma de datos de la muestra se llevó a cabo en un difractómetro BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. Los parámetros utilizados para esta medición se encuentran especificados en la *tabla 4*

6.6 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Se elaboraron 52 probetas de concreto para análisis de resistencia mecánica y eléctrica, además de los testigos. Se dispusieron dos tipos de moldes de PVC

troceados por una cortadora perteneciente al Grupo de Investigación en Química Industrial y de Polímeros de la Universidad Industrial de Santander. Con dimensiones diferentes según cada análisis, de la siguiente manera

- Probetas para análisis mecánicos, dimensiones 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura.
- Probetas para análisis eléctricos, dimensiones 3 cm de diámetro por 6 cm de altura.

Las probetas se construyeron basadas en las normas ICONTEC NTC 1377 [47] ver *Figura 13*

Figura 13. Moldes utilizados para construcción de probetas



Fuente: Autor

La mezcla se adiciono en los moldes de la siguiente manera: según norma ICONTEC NTC 1377 [48]; en tres partes compactándola con una varilla de acero (método apisonado), con golpes ligeros con el fin de obtener buena dispersión y eliminar burbujas de aire, seguido de este tratamiento (*figuras 14 y 15*) se dejaron secar durante 24 horas y se desmoldaron.

Figura 14. Construcción de probetas de concreto para fines mecánicos



Fuente: Autor

Figura 15. Construcción de probetas de concreto para fines eléctricos



Fuente: Autor

El diseño y cantidad de probetas estuvieron determinadas por dos factores principales: tiempos de fraguado y el porcentaje de remplazo de geopolimero por cemento portland tipo I (DIAMANTE), así que para pruebas de tipo mecánico se realizaron 8 replicas de cada porcentaje (0%, 10%, 20% 30% y 100% de geopolimero), de estas se tomaron 2 probetas de cada concentración para someterlas a distintos tiempos de fraguado (7, 14, 28 y 90 días) *figura 16*

Figura 16. Probetas elaboradas, sometidas a diferentes tiempos de fraguado



Fuente: Autor

6.7 DISEÑO DE LA MEZCLA

Se diseñaron dos tipos de mezcla, teniendo en cuenta el análisis mecánico y eléctrico a practicar. Para las probetas con fines de tipo mecánico, se utilizó una mezcla de agua, agregados (grueso y fino), cemento y geopolímero.

Las mezclas variaron en relación al contenido de geopolímero, así pues para probetas con porcentajes del 0% se mezcló agua, agregados y cemento. Las probetas del 100% contenían agua agregados y geopolímero. Cabe resaltar que los porcentajes descritos (0%, 10%, 20%, 30% y 100%) se refieren al porcentaje de remplazo de geopolímero por cemento; de esta manera se puede explicar, que las probetas del 0% corresponden a un testigo elaborado de concreto y sin remplazos de geopolímero por cemento; y las probetas de 100% a testigos que no contienen cemento, solo geopolímero, pues su remplazo es del 100%.

Para análisis eléctricos cada probeta construida se componía de agua, agregado fino, cemento, geopolímero, una varilla de acero y un electrodo de grafito, La varilla de acero es comúnmente utilizada como refuerzo en estructuras de concreto, por esta razón, se utilizó como electrodo de trabajo y el grafito como electrodo de referencia (*Figura 17*). Estas probetas se construyeron con los mismos parámetros que las probetas con fines mecánicos omitiendo el agregado grueso ya sus dimensiones no lo permitían.

Figura 17. Electrodo de grafito y acero empleados



Fuente: Autor

Los diseños de las mezclas fueron realizados según las normas de TECNOCONCRETOS S.A. que se encuentran especificados en las *tablas 5, 6 y 7* [48].

Tabla 5. Composición de la mezcla utilizada en probetas de sustitución 0%

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

Tabla 6. Composición de mezcla para probetas con sustituciones de 10, 20 30% de geopolímero

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

Tabla 7. Composición de la mezcla utilizada para probetas con porcentajes 10, 20 y 30 % de geopolímero destinadas para pruebas eléctricas

COMPONENTE	CANTIDADES		
AGREGADO FINO	675.51Kg/m ³ Concreto		
CEMENTO – GEOPOLIMERO	90:10	80:20	70:30
	352.8 :39.2	313.6 : 78.4	274.4 : 117.6
AGUA	200 Kg/m ³ Concreto		
RELACIÓN AGUA-CEMENTO	0.51		

6.8 PRUEBAS MECÁNICAS

Las pruebas mecánicas se realizaron en una Máquina Universal de Ensayos ubicada en la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, de acuerdo con la NORMA ICONTEC 673 [49] ver *Figura 18*

Figura 18. Prueba mecánica en la Maquina Universal de Ensayos



Fuente: Autor

6.9 PRUEBAS ELÉCTRICAS

Para esta prueba se construyó una celda electroquímica con las probetas, las cuales contenían un electrodo de grafito, como electrodo de referencia y una varilla de acero como electrodo de trabajo.

6.9.1 Proceso de corrosión. Esta prueba se aplicó a las probetas con mejor desempeño en las pruebas mecánicas, sumergiéndolas en una solución corrosiva de cloruro de sodio (NaCl) al 2% con oxígeno burbujeante. *Figura 19*

Figura 19. Probetas sumergidas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 2% con oxígeno burbujeante. .



Fuente: Autor

El seguimiento de proceso de corrosión se realizó mediante la técnica de espectroscopia de impedancia (EIS) en corriente alterna.

Para llevar a cabo los ensayos de EIS se lijaron las superficies de los electrodos que sobresalían en la parte superior de las probetas, la parte inferior se cubrió con una pintura epoxica. Lo anterior para garantizar la medición desde el electrodo al centro de la probeta, donde no había contacto directo con la solución corrosiva, de esta manera se dispuso la probeta conectada a un equipo de medición de impedancia, la medición se realizó con ACM Instruments, en quipos ubicados en las instalaciones del Grupo de Investigación a la Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatigará, lo anterior se ilustra mediante las *figuras 20 y 21*

Figura 20. Medidor de impedancias ACM Instruments del GIC



Fuente: Autor

Figura 21. Probeta sometida al seguimiento de corrosión con EIS



Fuente: Autor

Para este análisis se siguieron los siguientes parámetros, establecidos con base en la norma ASTM G3. [50]

- Rango de frecuencia de barrido desde 200 KHz -20 mHz
- Amplitud de 50 mV

6.10 PRUEBAS QUÍMICAS

Las pruebas químicas realizadas al concreto de mejor resistencia mecánica y eléctrica, consistieron en sumergir un trozo de concreto previamente pesado en 3 tipos de soluciones diferentes

- Solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 10% en peso volumen
- Solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 10% en volumen volumen
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 10% en peso volumen

El ensayo se aplicó durante 3 días. Los sólidos se pesaron consecutivamente después de cada día, para determinar la pérdida de peso y así considerar el ataque sufrido. *Figura 22*

Figura 22. Sólidos de concreto sumergidos en soluciones de ácido, sulfato y base



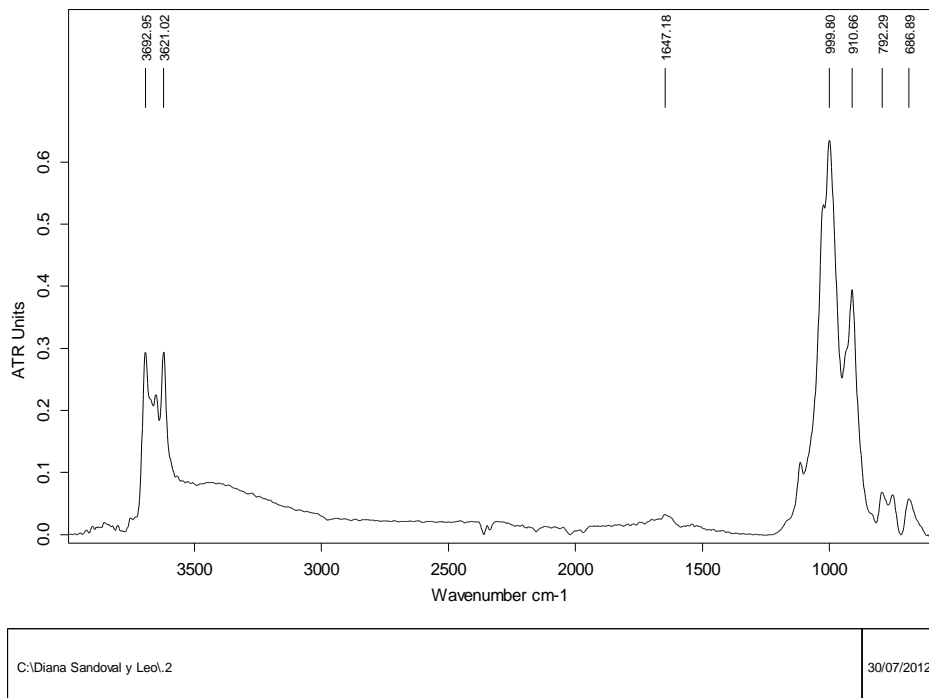
Fuente: Autor

7. RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE CAOLÍN Y METACAOLÍN

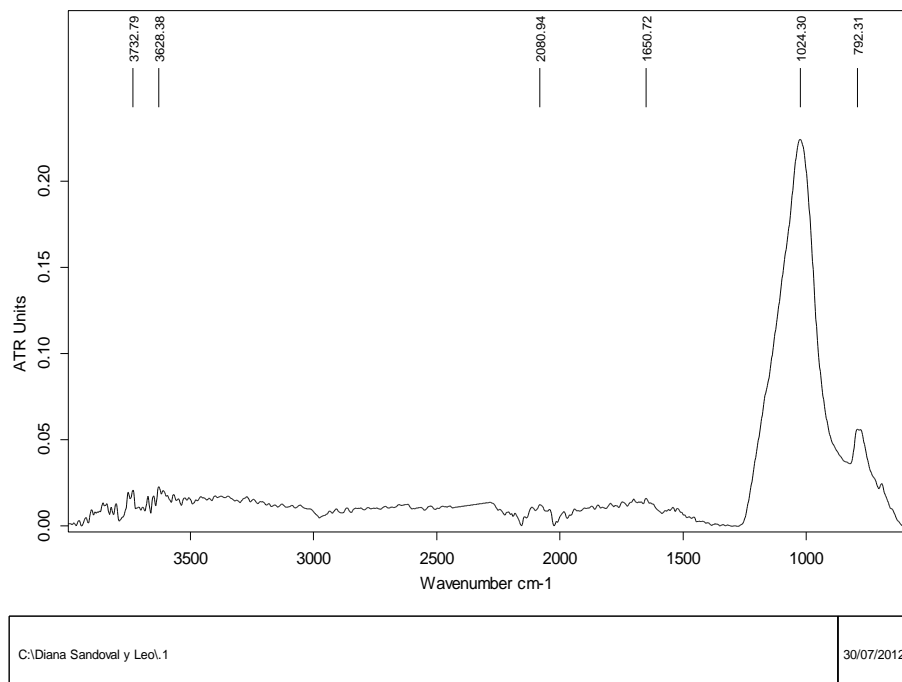
7.1.1 Análisis Por espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier de Caolín. En el espectro infrarrojo del Caolín (*figura 23*) se pueden apreciar unas bandas extensas encontradas entre 900 y 1200 cm^{-1} , estas hacen parte de las bandas características de los aluminosilicatos ya que están relacionadas con vibraciones de tipo Al-O-Si y Si-O-Al, en este espectro las señales más sobresalientes se encuentran a $999,8\text{ cm}^{-1}$ y bandas correspondientes al OH que se encuentran ubicadas entre 3500 y 2700 cm^{-1} .

Figura 23. Espectro IRTF de Caolín



7.1.2 Análisis Por espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier del metacaolín. En este espectro (*figura 24*) se observa la usencia del grupo OH que corresponde a las bandas ubicadas entre 3500 y 3700 cm^{-1} observadas en el espectro IR de la caolín, de igual forma se conservan las bandas características propias de los aluminosilicatos ubicadas entre 900 y 1200 cm^{-1} , por lo cual se corrobora la obtención del metacaolín por medio de calentamiento.

Figura 24. Espectro IRTF de Metacaolín



7.1.3 Análisis por Difracción De Rayos X de Caolín. En la *Figura 25* se observa la presencia de la caolinita, se observa una buena definición de los picos correspondientes a las reflexiones localizadas en 12,342; 20,354°, también se observa la presencia de otras fases como moscovita, anatasa, microclina y cuarzo; estas reflexiones se muestran en la *tabla 8*

Figura 25. Difractograma de Caolín

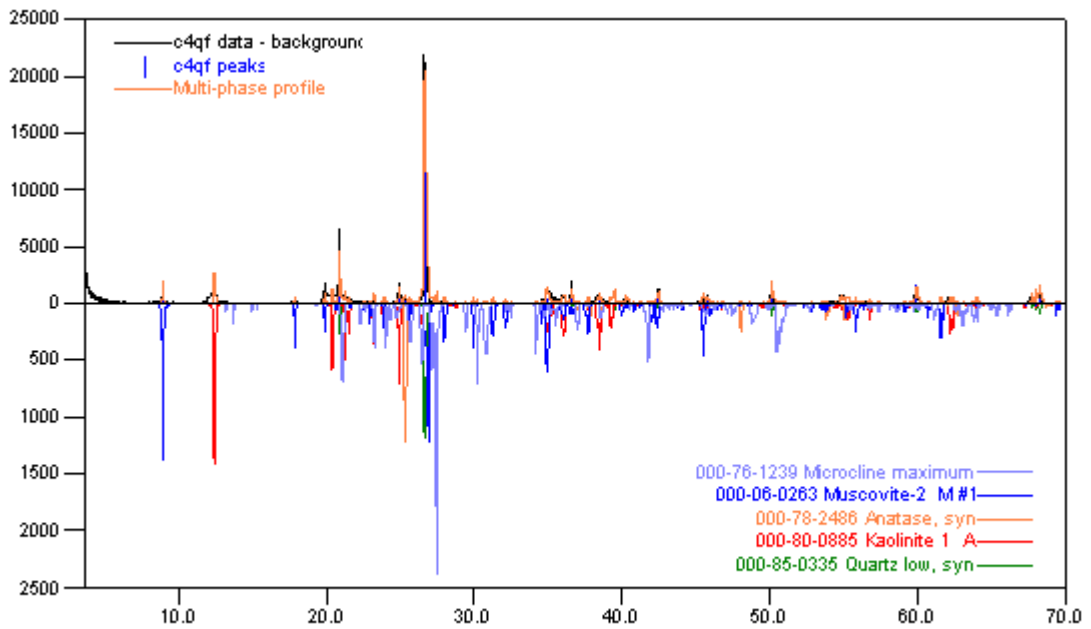


Tabla 8. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del caolín

FASES PRESENTES	REFLEXIONES 2θ
Caolinita	12,342
	20,354
	38,466
Moscovita	8,839
	17,776
	31,251
Anatasa	27,435
Cuarzo	20,851
	36,538
	67,713
Microclina	27,435

Debido a la proporción entre el tamaño de los picos, se puede deducir que en la caolinita se encuentra como componente mayoritario de los aluminosilicatos

presentes, (Microclina, Moscovita y Caolinita); además se encontraron fases de Anatasa TiO_2 y Cuarzo SiO_2 , en el anexo 2 se encuentra la información detallada de la comparación de picos con el uso de Search Match y la base de datos (ICDD)

7.1.4 Análisis de Difracción por Rayos X del Metacaolín. Las reflexiones correspondientes a la caolinita desaparecieron del difractograma, debido al cambio en la estructura cristalina del mineral, transformándose en metacaolín, en el cual se evidencia que carece de una estructura cristalina definida, es decir es amorfo, el cual no registra un perfil de difracción. De igual manera confirma que las fases presentes en el caolín de partida siguen estando presentes (ver *tabla 9*)

Figura 26. Difractograma de Metacaolín

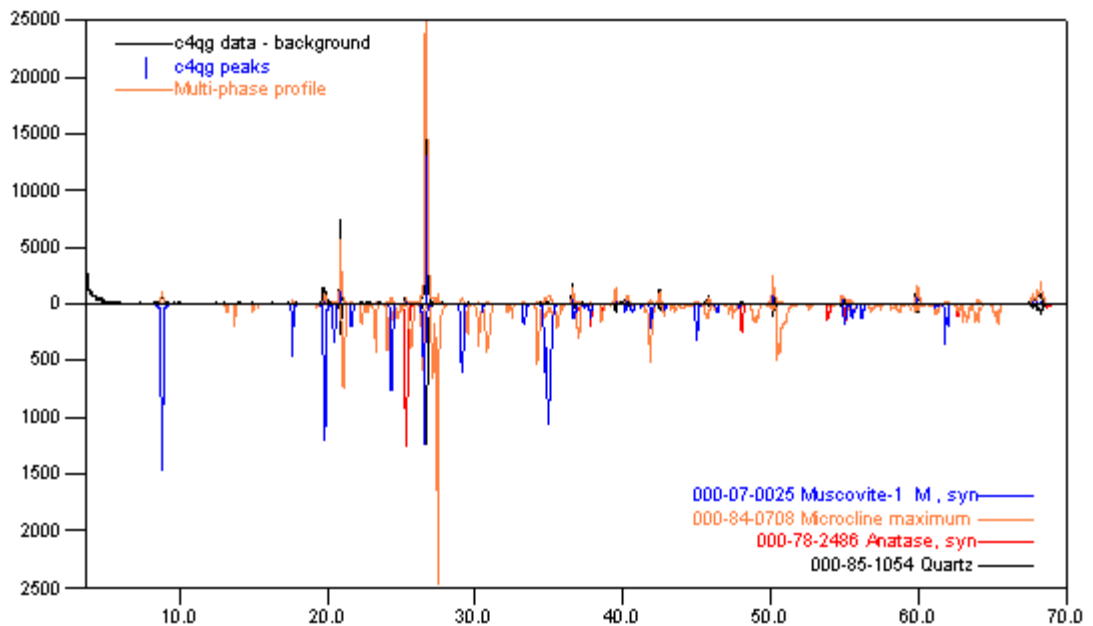


Tabla 9. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del metacaolín

FASES PRESENTES	REFLEXIONES 2θ
Moscovita	8,765
	17,601
	19,713
Anatasa	25,295
Microclina	22,281
	22,713
Cuarzo	20,855
	26,641
	36,544

En el anexo 3 se encuentran las especificaciones del análisis con Search Match con lo que se determinaron las fases presentes.

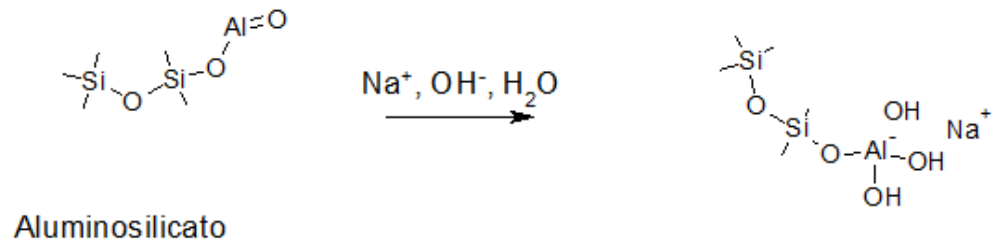
7.2 SÍNTESIS DEL GEOPOLÍMERO

Según la teoría consultada se presume que la geopolimerización ocurrió de acuerdo con el mecanismo planteado a continuación:

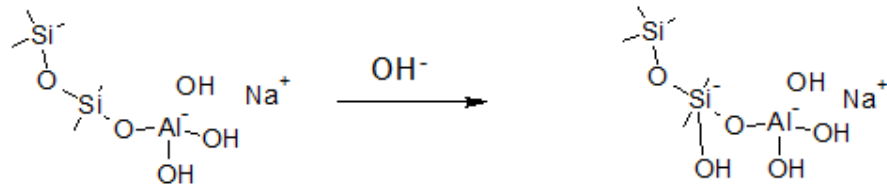
La reacción inicio con la formación del ion tetravalente Al, seguido de la disolución alcalina que ocurre con el grupo OH de la base con átomos de silicio, este toma una valencia pentavalente, Luego el oxígeno se une al silicio formando el siloxano (Si-O-Si) por transferencia de electrones. Posteriormente se forma el silanol (Si-OH) y la base del siloxo (Si-O), este al encontrarse en un medio básico, se transforma en Si-O-Na. La formación de estas especies garantiza una condensación entre el orto-sialato e hidróxido de aluminio, formando así un ciclo de tri-sialatos con ayuda de la base, de esta manera el NaOH se libera y vuelve a reaccionar.

La policondensación se realiza entre el silicato, el di-siloxano y el orto-sialato, se ilustra a continuación.

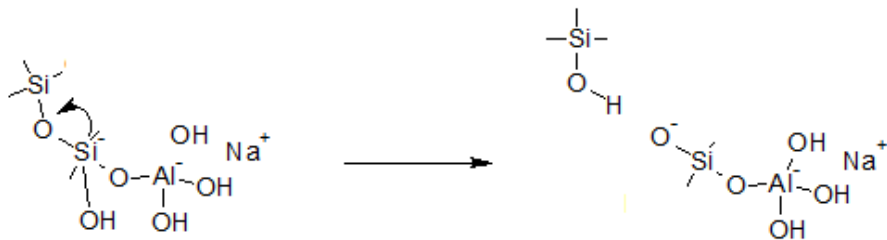
Inicialmente ocurre una alcalinización, donde los grupos OH^- , Na^+ , presentes en el silicato de sodio, que se encuentra en medio acuoso, reaccionan con parte del aluminosilicato, generando una estructura que contiene parte del grupo sialato y aluminio tetravalente.



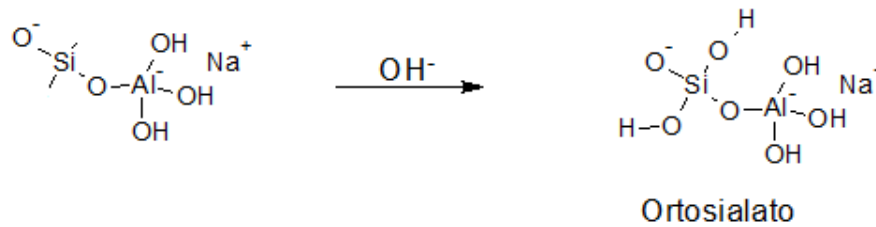
En el siguiente paso, el ion OH^- ataca al átomo de silicio, como resultado éste queda monovalente. Este paso se denomina disolución acuosa



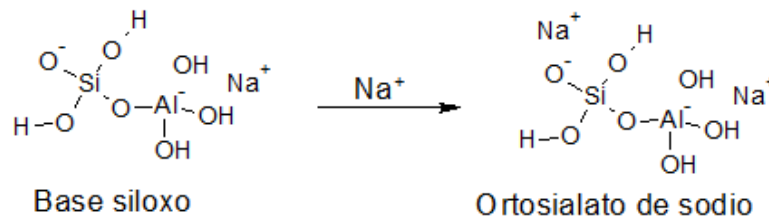
Luego el átomo de silicio transfiere un electrón al oxígeno, de esta manera sufre una ruptura, eliminando una molécula de silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$)



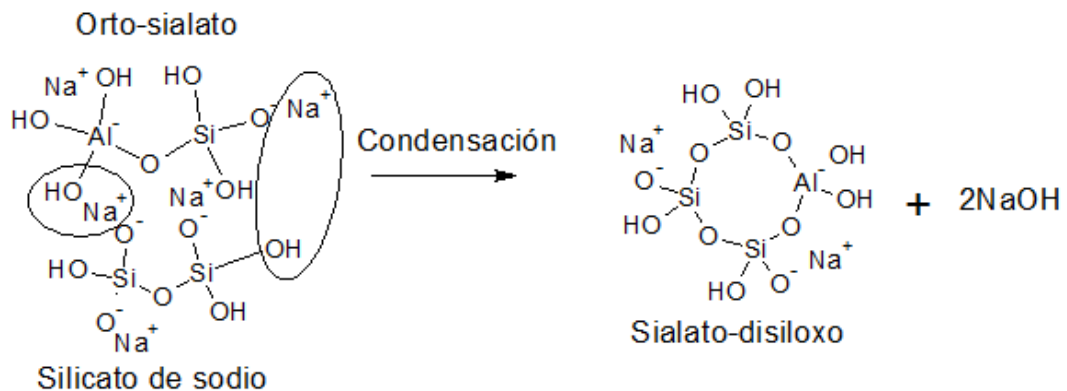
Hay una formación de silanol adicional debido a la gran cantidad de grupos OH⁻ disponibles; además de la formación aislada de una molécula de ortosialato, que es la unidad primaria de geopolimerización



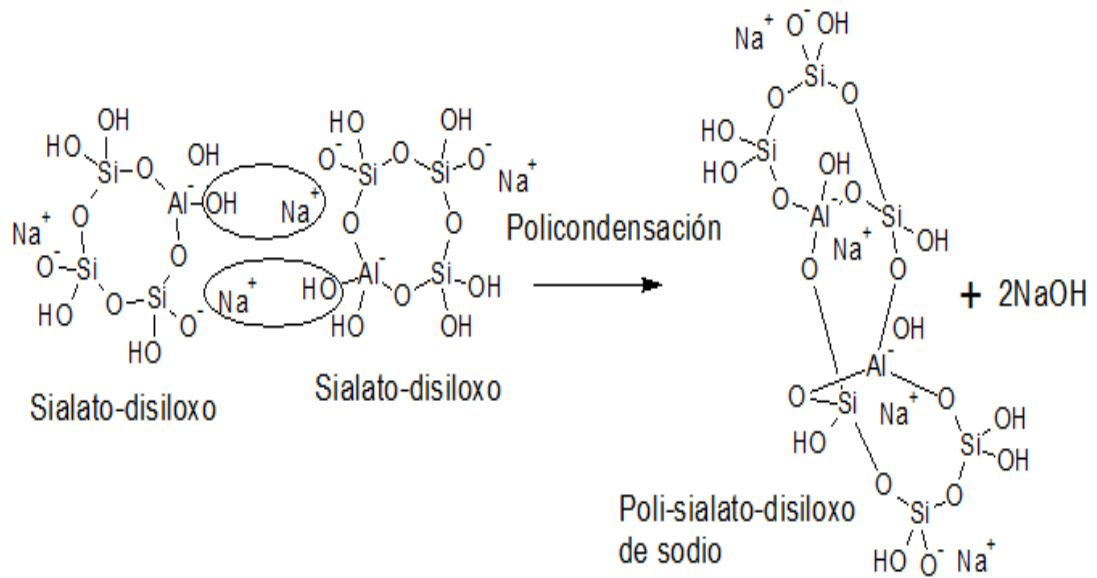
La especie anterior denominada base siloxo reacciona con los cationes de Na⁺ presentes generando enlaces Si-O-Na



Se produce una condensación entre el di-siloxonato (proveniente del silicato de sodio) y las moléculas de orto-sialato, Se obtiene una estructura cíclica denominada sialato-disiloxo; conformado por los grupos reactivos -Si-O-Na, -Si-OH y -Al-OH, en esta condensación se elimina NaOH, el cual reacciona nuevamente.



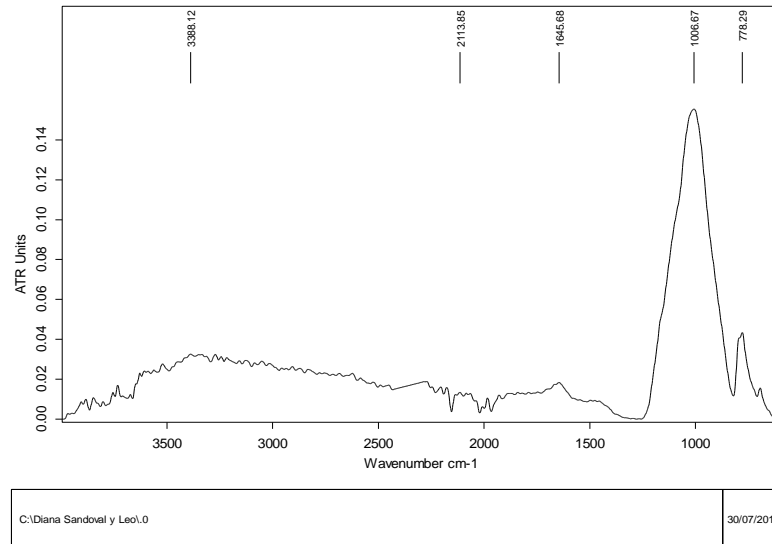
Como paso final ocurre una policondensación entre las estructuras de sialatos-disiloxos.



7.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL GEOPOLÍMERO OBTENIDO

7.3.1 Análisis por Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier del Geopolímero. En el espectro infrarrojo del geopolímero sintetizado a base de metacaolín (*figura 27*) no se distinguen muchas diferencias con respecto al IRTF del metacaolín aluminosilicato precursor, ya que se observan bandas las mismas bandas características correspondientes a la presencia de silicatos propios de los mismos, las diferencias entre estos IRTF se harían notorias con longitudes de onda bajas entre 700 y 400 cm^{-1} , que corresponden a vibraciones del enlace Al-O; lo cual no se muestra en los espectros analizados debido a limitaciones del equipo utilizado, ya que este equipo realiza mediciones hasta 700 cm^{-1}

Figura 27. Espectro IRTF de Geopolímero

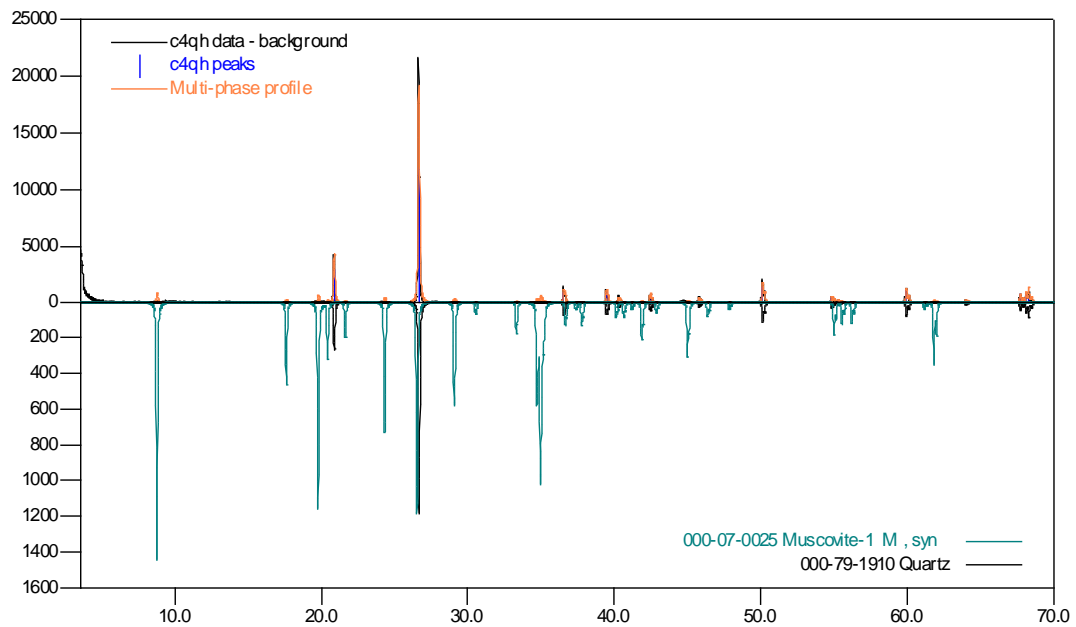


7.3.2 Análisis de Difracción por Rayos X del Geopolímero. Debido a la imprecisión de la información obtenida por el espectro IFTR del geopolímero, se recurre a esta técnica por ser más poderosa. El perfil de difracción del geopolímero (*figura 28*) muestra una ausencia de picos notable con respecto al perfil de difracción de metacaolín (*figura 26*), ya que los polímeros inorgánicos de este tipo se caracterizan por no tener estructura cristalina definida (materiales amorfos). Sin embargo en este difratograma continua presente la moscovita, propia del material de partida caolín, los picos característicos se encuentran en la *tabla 10* que corresponden a las fases de moscovita y cuarzo en su mayor proporción.

Tabla 10. Reflexiones principales encontradas en el perfil de difracción del metacaolín

FASES PRESENTES	REFLEXIONES (Å)
Moscovita	19,749
cuarzo	26,639
	20,852
	50,126

Figura 28. Difractograma del geopolímero



En el anexo 4 se encuentran las especificaciones del análisis realizado con Search Match

7.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

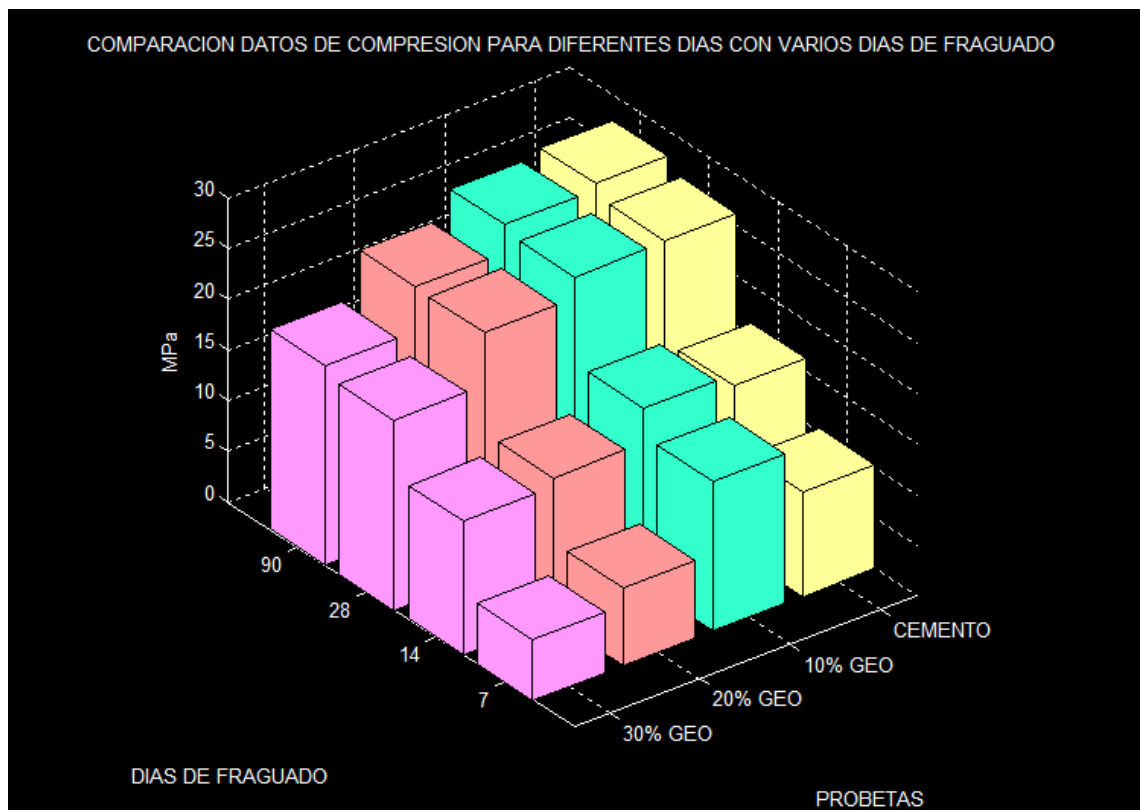
7.4.1 Resistencia a la compresión. Se sometieron al análisis mecánico dos probetas de cada concentración y mismo tiempo de fraguado, garantizando así un promedio para los resultados, como se muestra en la *tabla 11*

Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión para probetas de sustitución 0, 10, 20 y 30 % de geopolímero en diferentes días de fraguado.

PROBETA	EDAD DE LA PROBETA EN DIAS DE FRAGUADO	RESISTENCIA (kg fuerza/cm²)	RESISTENCIA (Mpa)
10%	7	150,53	14,76
20%		78,09	7,66
30%		61,12	5,99
0%		105,25	10,32
10%	14	178,82	17,54
20%		143,73	14,10
30%		134,68	13,21
0%		166,37	16,32
10%	28	265,97	26,08
20%		244,46	23,97
30%		191,27	18,76
0%		267,10	26,19
10%	90	272,76	26,75
20%		245,59	24,08
30%		200,32	19,65
0%		279,55	27,41

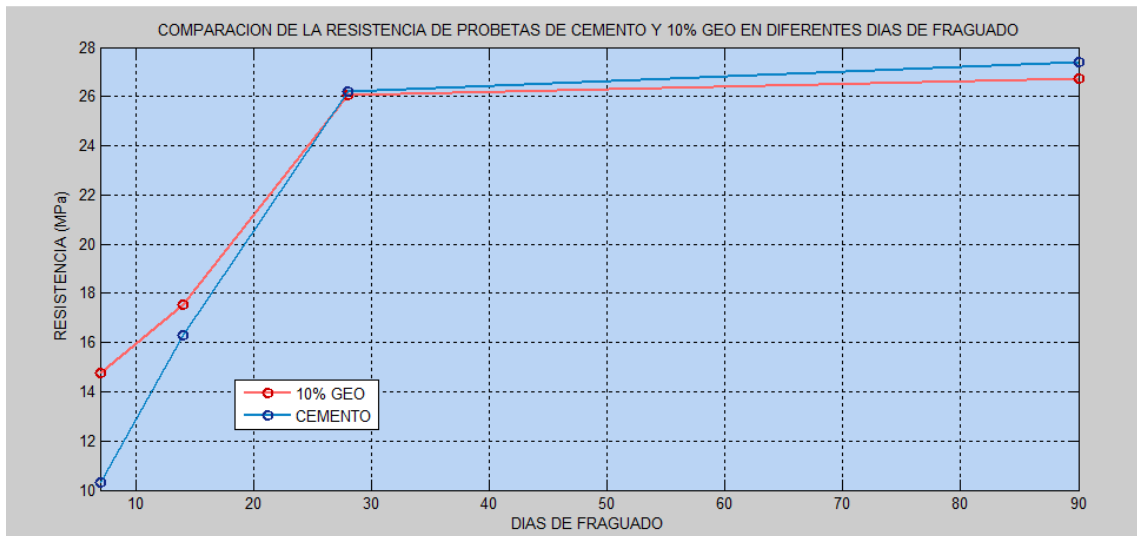
En la tabla anterior se resaltan algunos valores, correspondientes a las probetas con sustitución de cemento portland por geopolímeros en porcentajes de 10% y 0%, como los de valores de resistencia a la compresión más altos en cada tiempo de fraguado; sin embargo los valores más altos se observaron para probetas con 90 días de fraguado. Un esquema comparativo se muestra en la *figura 29*

Figura 29. Esquema comparativo de resistencia a la compresión a las diferentes muestras



Se observó en el gráfico de comparación anterior que las probetas de cemento (0%) y 10% mostraron valores de resistencia a la compresión más altos, en comparación con las demás probetas, sin embargo en tiempos de fraguado cortos las de probetas de 10% mostraron valores mayores a las de cemento. Ver *figura 30*

Figura 30. Grafico comparativo de valores de resistencia a la compresión entre probetas del 10% y cemento teniendo en cuenta los días de fraguado



7.5 PRUEBAS ELÉCTRICAS

Análisis de impedancia (EIS)

Se realizaron ensayos de impedancia, como seguimiento de la corrosión durante 15 días, con tres tipos de muestras fundamentales, 0%, 10%, 20% y 100% a 90 días de fraguado, En un primer tipo de gráficos se compararon los valores de impedancia de cada una de las muestras durante 11 días (seguimiento de la corrosión) versus el número de mediciones, donde se observaron valores de impedancia altos para probetas de 10% y 0% y muy bajas para 20% y 100%, por lo cual se descartaron las de valores bajos de impedancia, ya que la impedancia está definida como la suma de un componente resistivo y otro capacitivo, por lo cual altos valores de impedancia coinciden con resistencias mayores.

El análisis fue consecutivo los 4 primeros días, luego se realizó a los 6, 8 y 11 días comenzando desde el día 1. Ver datos en anexo 5

Se realizó un análisis gráfico con el programa para cálculos de Matlab, que permitió evidenciar su el comportamiento de cada probeta. Figuras 31, 32

Figura 31. Análisis gráfico de Matlab para seguimiento de corrosión correspondiente a probeta de 0% geopolímero 90 días de fraguado

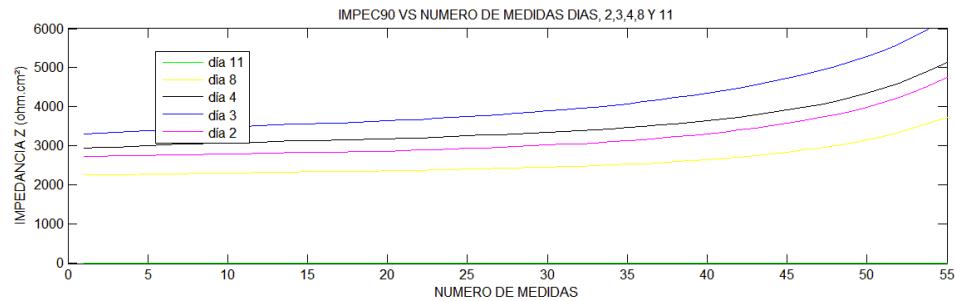
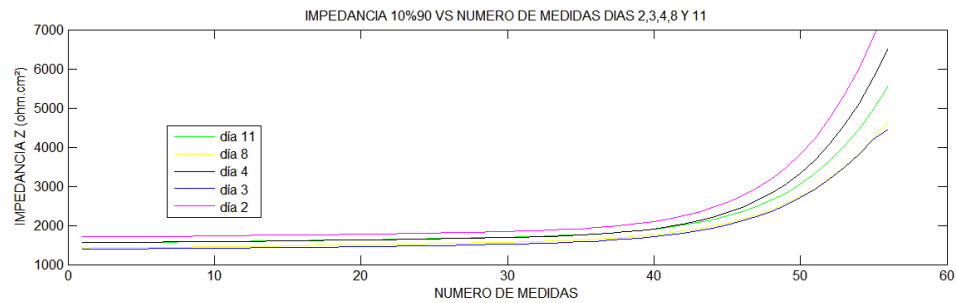


Figura 32. Análisis gráfico de Matlab para seguimiento de corrosión correspondiente a probeta de 10% geopolímero 90 días de fraguado.



Con el análisis grafico anterior se realizaron diagramas de Nyquist y bode para los días 1, 2 y 11 ver figuras 33-40

Figura 33. Diagrama, de Nyquist 10% geopolímero día 1

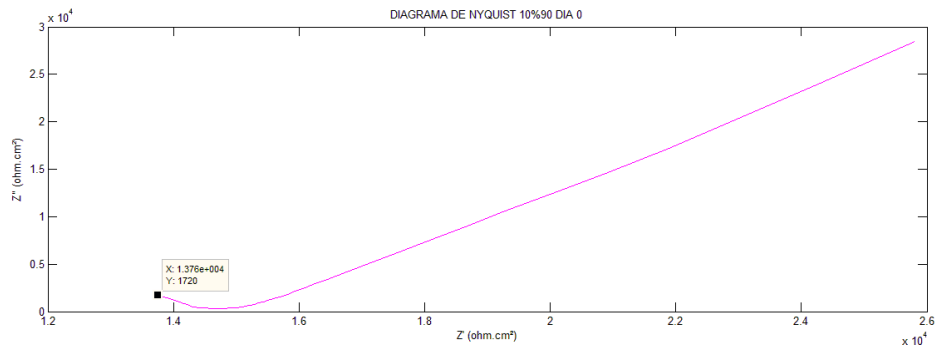


Figura 34. Diagrama, de Nyquist 10% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11

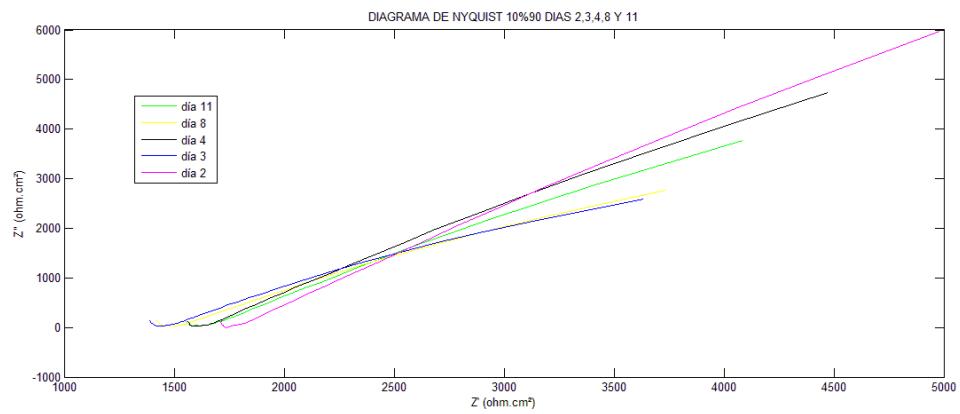


Figura 35. Diagrama de bode 10% geopolímero día 1

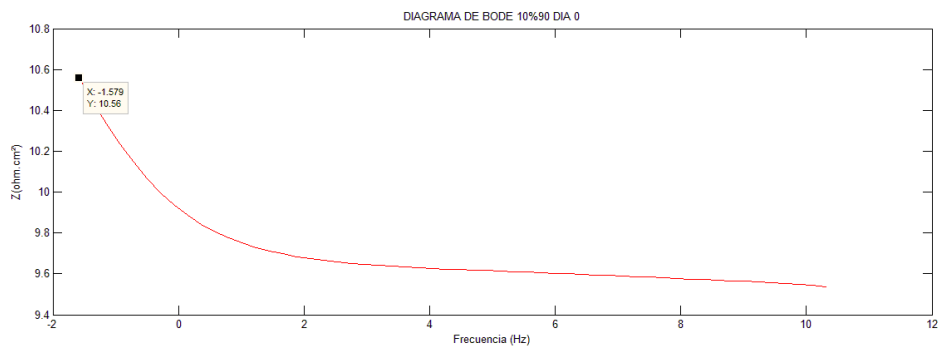


Figura 36. Diagrama de bode 10% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11

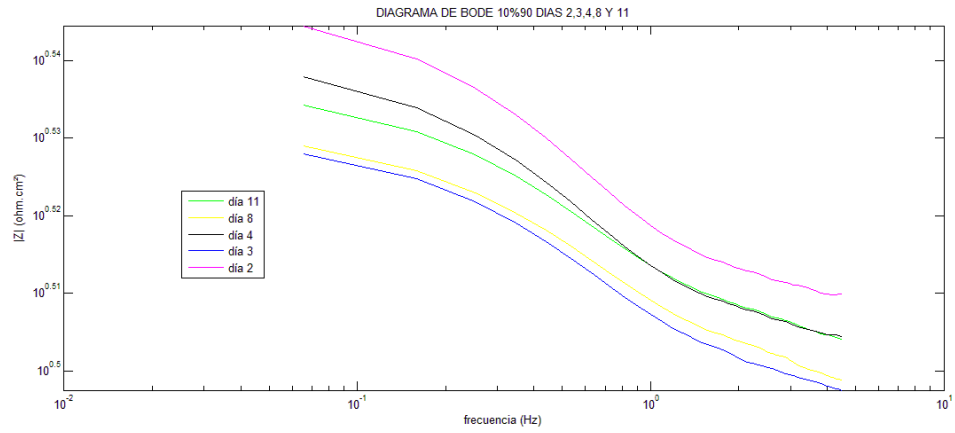


Figura 37. Diagrama de Nyquist 0% geopolímero día 1

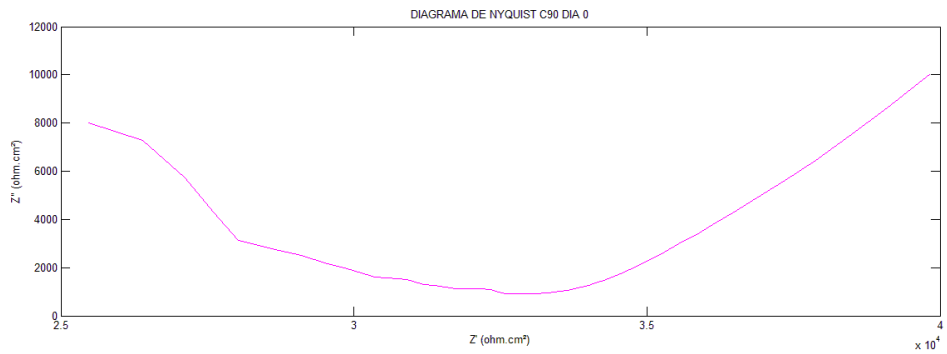


Figura 38. Diagrama de Nyquist 0% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11

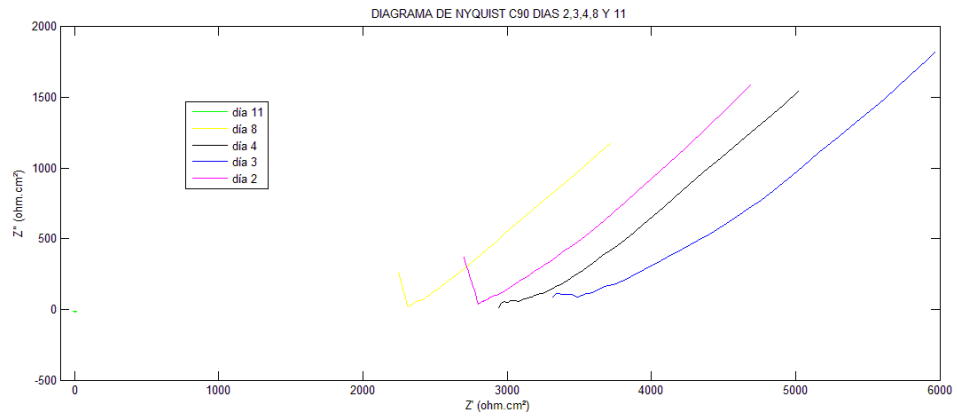


Figura 39. Diagrama de bode 0% geopolímero día 1

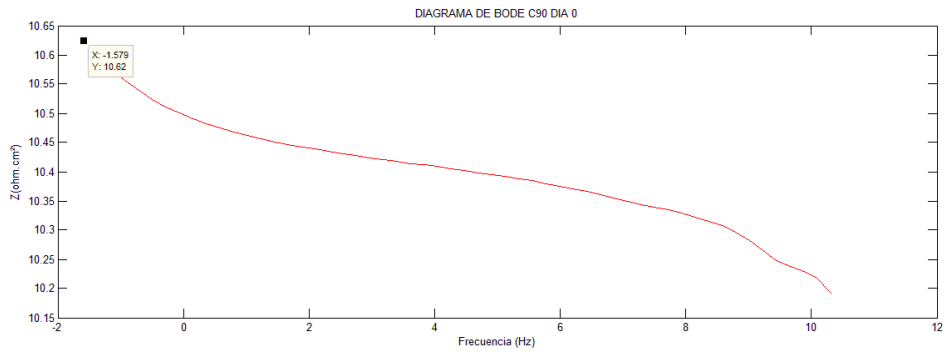
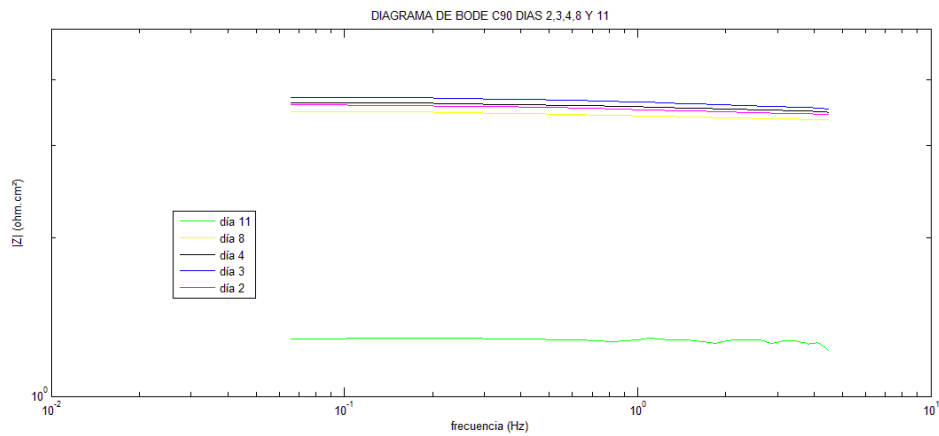


Figura 40. Diagrama de bode 0% geopolímero días 2, 3, 4, 8 y 11



De los anteriores diagramas, se determinaron valores importantes de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, en el cual los diagramas de Nyquist y bode proporcionaron valores de resistencias solución (R_{Ω}) y resistencia a la polarización (R_p) con esta información se procedió a la creación de un circuito equivalente simple, para describir el comportamiento del sistema.

El circuito puede tomar diferentes valores de resistencias y capacitancias lo cual se resumió en la *tabla 12*

Tabla 12. Valores propios para un circuito equivalente sencillo de varias muestras evaluadas en días 1, 2 y 11

PROBETAS	DÍA	$R\Omega$ (ohm*cm ²)	R_p (ohm*cm ²)	C_p (μF)
10%	1	1720	3,6E10	2,12E-11
	2	132,1	3052,1	252,94
	11	128,3	2514,1	307,08
0%	1	8001	4,17E10	1,85E-11
	2	369,1	3432,8	224,89
	11	-19,48	38,8	0.21

En este circuito se puede analizar que la resistencia a la corrosión que es directamente proporcional al valor de R_p es mayor en el día uno de cada muestra, ratificando con ello que no se presentaba el fenómeno en este tiempo, por el contrario para los días 2 y 11 aumentan; sin embargo los valores de C_p capacitancia de doble capa indican un menor valor en el día 11 de la probeta del 0% y del día 2 en la probeta del 10%, estableciendo con ellos la aparición de una capa protectora en aquellos días.

7.6 ANÁLISIS QUÍMICOS

Los sólidos se pesaron como se describió en el procedimiento para pruebas químicas, los resultados se encuentran consignados en la *tabla 13*

Tabla 13. Pesos registrados para solidos inmersos en soluciones de base, ácido y sulfato durante 2 días

MUESTRA	PRUEBA SULFATOS (Na ₂ SO ₄) PESO EN (g)			PRUEBA ACIDO (H ₂ SO ₄) PESO EN (g)			PRUEBA BASE (NaOH) PESO EN (g)		
	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 0	DIA 1	DIA2	DIA 0	DIA 1	DIA 2
10%GEO	26,25	26,19	25,99	29,6	28,19	27,30	29,58	29,17	29,09
CEMENTO	24,54	24,16	23,93	25,02	24,89	24,58	29,31	28,86	28,07
GEOPOLIMERO	26,29	26,18	26,02	22,29	22,10	21,92	13,26	9,950	5,34

En los anteriores resultados se puede evidenciar que el concreto es susceptible a ataque con sulfatos, ácidos y bases, sin embargo la mezclas que contienen geopolímero también sufrieron cambios de peso frente al ataque de las diferentes soluciones, algunas en menor proporción como lo son muestras de 10% frente al ataque con sulfatos y bases. En el caso de los ácidos, los mejores resultados se observaron en el cemento, ya que su pérdida de peso es menor en comparación a las demás muestras

CONCLUSIONES

Se logró mediante el tratamiento térmico del material de partida, Caolín comercial, obtener Metacaolín por calentamiento a 700 °C; con ello se mostró que el Caolín comercial es una fuente efectiva de aluminosilicatos, a los que se pueden dar valor agregado con la geopolimerización.

Mediante los análisis por Difracción de Rayos X y Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier, se determinó que el metacaolín es un mineral muy reactivo, ya que su geopolimerización se efectuó de manera exitosa, generando un material de buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas

La sustitución de geopolímero por cemento en pequeñas cantidades (10%) en una mezcla de concreto habitual; genera no solo una disminución en la contaminación por generación de CO₂, si no también un mejor desempeño en el ámbito químico; tales como ataques con ácidos y bases.

Se puede afirmar que el material obtenido (concreto) con un 10% de geopolímero en remplazo del cemento, tiene buen desempeño mecánico en tiempos de fraguado cortos, ya que para los primeros 7 días, mostró valores superiores en comparación a los obtenidos para una probeta de concreto habitual sin remplazos de geopolímero, Sin embargo con el paso de tiempo (90 días) los valores de resistencia a la compresión, fueron superados por mezclas de concreto habitual (0% geopolímero)

Según los análisis eléctricos mediante identificación de un circuito equivalente, en las probetas 10% de remplazo de cemento Portland por geopolímero, se puede afirmar que al iniciar la medición (día 1) se presentan grandes valores de Rp, lo

que se traduce en una velocidad de corrosión cercanas a cero, ya que en este instante no se experimentaba fenómeno de corrosión. Por el contrario para los días 2 y 11 la velocidad de corrosión aumenta, sin embargo es un valor similar entre los dos últimos días mencionados, a razón de la formación de una capa protectora de óxido.

En el análisis eléctrico, muestras sin remplazo de geopolímero por cemento (patrón), muestran un comportamiento similar al registrado por probetas 10% en los días 1 y 2, siendo las de un cemento mejores, ya que los valores de R_p y C_p denotan velocidades de corrosión bajas, es decir, se experimenta el fenómeno de corrosión de manera más lenta. Sin embargo para el día final en las probetas de cemento, los valores muestran la ausencia de una capa protectora a la corrosión, ya que R_p tiene un valor pequeño, es decir una velocidad de corrosión mayor, muestra de que la probeta ha fallado eléctricamente.

Los sólidos tomados de cada una de las probetas de 10% y 100% de remplazo de geopolímero por cemento presentaron los mejores resultados en cuanto a ataque por sulfatos y ácido, ya que su pérdida de peso es menor a la presentada por el sólido correspondiente al 0% de remplazo de geopolímero (patrón), por lo cual se puede afirmar que la inserción de polímeros en mezclas de concreto mejora la resistencia química a ataques químicos por sulfatos y ácidos.

RECOMENDACIONES

La investigación debe continuarse con la inclusión de otros álcalis ya que el concreto sufre daños físicos debido a la migración de cationes de sodio, productos de las interacciones con bases y sales de este tipo.

Es recomendable que la preparación del geopolímero se hiciera in situ, en el momento de elaborar el clinker, ya que podría conferirle propiedades diferentes, por las interacciones que se podrían generar con el Clinker

Es recomendable el replanteamiento de los valores de la mezcla de concreto, teniendo en cuenta el porcentaje de absorción de agua y la densidad del material polimérico, de tal manera que se realicen variaciones y remplazos con respecto al clinker y no del cemento

Se recomienda usar 3 electrodos, a la hora de evaluar eléctricamente las probetas por medio de EIS, ya que en este trabajo el grafito actúo como electrodo de referencia y contra electrodo, lo cual dificulto la estabilización de las mediciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] CARDENAS Mauricio, MEJIA Carolina y GARCIA Fabián; La industria del cemento en Colombia; 2007; presentado en *Working Papers* series como documento de trabajo.

[2] CEMEX, Historia del cemento y concreto, El origen del producto (http://www.cemexcolombia.com/in/in_hc.html), consultado el (2/2/2011).

[3] 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

[4] <http://es.wikipedia.org/wiki/Geopol%C3%ADmero>, consultado (6/12/2010)

[5] http://epa.gov/climatechange/endangerment/downloads/hallazgodesituaciondepeligro_medioambiental.pdf consultado (6/12/2010)

[6] <http://www.atmosfera.cl/HTML/TEMAS/CALENTAMIENTO/menucalen.htm> consultado (7/12/2010)

[7] 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.

[8] TICKELL Oliver. Kioto 2 como gestionar el efecto invernadero global. Barcelona noviembre de 2009, primera edición en español, p 118.

[9] BUITRAGO Dalia, GUTIERREZ María, Modulo de procesos industriales de: IDEAM, inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero 200-2004-2009, República de Colombia p 121-142, disponible en: <http://intranet.ideam.gov.co:8080/openbiblio/Bvirtual/021471/InventarioGEI/IDEAM3.pdf> consultado (6/12/2010)

[10] TUFÍÑO Luis, corrosión de concreto reforzado, compañía *Engineering Universal Service* EUS CORROSION, febrero de 2008, disponible en: <http://www.eus-corrosion.com/CVs/EUS-CONCRETO-ARTICULO.pdf> consultado 30/05/11

[11] GUTIERREZ F., MORA K. C., GURETTA, J. L. y ROUBORT A., Deformación plástica a altas temperaturas de geopolímeros. XI congreso Nacional de propiedades mecánicas de sólidos 25 junio 2004, Pág. 132.

[12] VAN JAARVELDJ G. S., VAN DEVENTER J. S., y LORENZEN j., *The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I.Theory and applications. Minerals Engineering* Volume 10, Issue 7, July 1997, Pág. 659-669

[13] *METAKAOLIN DESCRIPTION High Reactivity Metakaolin (HRM).Engineered Mineral Admixture for Use with Portland cement.*

[14] AKSAY I. A, DABBS D. M., and SARIKAYA M., Mullite for Structural, Electronic, and Optical Applications. *J. Am. Ceram. Soc.*, 74(10): p. 2343-2358 1991.

[15] JOVANI M., ALONSO J. J., y MANGLANO J. 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): p. 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] TCHEICHVILI L. and BUTSCHKOWSKYI M., Un aporte al problema de la Mullita. Bol. Soc. Esp. Cerám. V., 14(1): p. 9-22 1975.

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

[21] MARTINEZ Nuria, ANDRES Ana, CHIRALT Amparo, termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno, Universidad politécnica de valencia servicio de publicaciones página 254, disponible en: http://books.google.com.co/books?id=bLQ_Lj6C4p8C&dq=calorimetria+diferencial+de+barrido+dsc&hl=es&sitesec=reviews, consultado 20/04/11.

[22] WILCHES Mauricio, RUIZ Luis, p 249-250 bioingeniería VI, fundamentos de instrumentación para la química clínica y radiaciones ionizantes, editorial universidad de Antioquia 2005, paginas 249-250, disponible en:

http://books.google.com.co/books?id=2DZYwx7p8csC&pg=PA247&dq=tga+termogravimetria&hl=es&ei=kMu2TYaHCsTw0gGo8_n9Dw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDMQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false consultado 20/04/11.

[23] Flórez Juan, Romero Rubén, Llongueras Joan, manual de espectroscopia en impedancia electroquímica en corrosión, instituto mexicano del petróleo y facultad de química de la UNAM., México D.F Disponible en: <http://depa.pquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>. Consultado 28/05/11.

[24] RODRIGUEZ francisco, 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.

[25] MEJIA DE GUTIERREZ R., BERNAL S. y RODRIGUEZ E., Nuevos concretos para el aprovechamiento de un subproducto industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia, octubre de 2006.

[26] JANOTKA I., PUERTAS F., PALACIOS M., VARGAS C. y KRAJC L., *Metakaolin sand a promising addition for Portland cement*, en *Materiales de Construcción* Vol. 60, 298, 73-88 abril-junio 2010.

[27] GUTIERREZ Juan, RESTREPO Oscar y TOBÓN Jorge, *Effects of the addition of metakaolin in portland cement* en *Dyna* Nro. 150, pp131141 Medellín, Noviembre de 2006.

[28] MARIN C., REYES J., MANZANO A., RUBIO J., PEREZ J. y MUÑIZ M., Ventura-E, *Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolin geopolymer*. *Inorganic Materials*, 2009, Vol. 45, No. 12, pp. 1528–1531.

[29] TORRES Janneth, DE GUTIERREZ Ruby, CASTELLO Ricardo, VIZCANO Carmina. Análisis Comparativo De Caolines De Diferentes Fuentes Para La Producción De Metacaolín. Publicado On-Line el 15-Nov-2010 Disponible en: www.rlmm.org

[30] KOSTAS Komnitsas, DIMIYTRA 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

[31] FRANTIŠEK Škavara, TOMÁŠ Jilek, LUBOMÍR Kopecky, *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)

[32] PROVIS John. *Modelling the formation of geopolymers*, *Department of Chemical and Biomolecular Engineering The University of Melbourne* Marzo 2006.

[33] ROMERO Carlos, SORLOZANO Rafael, ABREU Omar, BRIZUELA Luis, PEREZ Zuleima. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua de facultad de ingeniería publicado en: *REVISTA INGENIERÍA UC*. Vol. 14, No 3, 16-23, 2007

[34] HARDJITO D., RANGAN B., *Development and properties of low- calcium fly ash-based geopolymer concrete*, *Curtin University of technology, Perth Australia* 2005

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

[36] HERMANN E., KUNZE C., GATZWEILER R.; KIEBIG G. y DAVIDOVITS J. Proc of Geopolymers. 1999. 211.

[37] DAVIDOVITS J., 30 years of successes and failures in geopolymer aplications. Market trends and potential breaktroughs, Geopolymer institute Saint- Quentin, France, Geopolymer 2001 confernce, october 28-29, Melbourne, Australia.

[38] MORALES Juan, Tecnología de los materiales cerámicos, Consejería de educación comunidad de Madrid, Diaz de Santos 2005 pags 66-69 disponible en <http://books.google.es/books?id=4H6OXgN1w6wC&printsec=frontcover&dq=tecnologia+de+los+materiales+ceramicos&hl=en&sa=X&ei=eVb9UOy9C9SwhAfcl0CYAw&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q=tecnologia%20de%20los%20materiales%20ceramicos&f=false>

[39] BENSTED J. y BARNES P., Structure and performance of cements, segunda edición, London 2002, pags 373 y 374 disponible en: [ooks.google.es/books?id=6wPpkyrWE5oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](http://books.google.es/books?id=6wPpkyrWE5oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)

[40] WEST. A. R., Solid State Chemistry and its applications, pags 5- 45 (1985)

[41] HERNANDEZ R., Utilización de aluminosilicatos cubanos no tradicionales en la fabricación de vidrio sódico- cálcico, tesis doctoral, Instituto de ciencia y tecnología de materiales, cuba 2005

[42] GIL G., Cementos, Montoya-Meseguer-Morán Hormigón armado, Barcelona 2000 disponible en: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos_RC08.pdf consultado 22/12/12

[43] VASQUEZ J, MUÑOZ A., Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímica para la caracterización de biomateriales aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo, tesis de master, universidad politécnica de valencia programa oficial de posgrado, ingeniería de producción industrial, valencia 2007

[44] Instituto mexicano del cemento y del concreto Imcyc, concreto en obra problemas causas y soluciones , capitulo 9 , cemento y concreto resistentes a los sulfato México D.F octubre de 2006, disponible en: <http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf>

[45] GONZALES M., Ataque químico al concreto, Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto Diciembre 1991

[46] ASTM C94 /C 94M – 09: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM – American Society for Testing and Materials.

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

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

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

[50] ASTM G3 - 89(2010) Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing

[51] Segarra J, Aguado A Y Buil J, Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón, Capítulo 2, LAS REACCIONES EXPANSIVAS, Universidad Politecnica de Cataluña, julio de 2005, disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3315/4/55864-4.pdf>, consultado 04/02/13.

[52] Instituto mexicano del cemento y del concreto Imcyc, el concreto en obra problemas causas y soluciones , Pruebas de resistencia a la compresión del concreto México D.F Junio de 2006, disponible en: <http://www.imcyc.com/problemas.htm> consultado 04/02/13.

BIBLIOGRAFÍA

AKSAY I. A, DABBS D. M., and SARIKAYA M., Mullite for Structural, Electronic, and Optical Applications. J. Am. Ceram. Soc., 74(10): p. 2343-2358 1991.

ASTM C94 /C 94M – 09: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM – American Society for Testing and Materials.

ASTM G3 - 89(2010) Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing

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 characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.

BENSTED J. y BARNES P., Structure and performance of cements, segunda edición, London 2002, pages 373 y 374 disponible en: books.google.es/books?id=6wPpkyrWE5oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

BUITRAGO Dalia, GUTIERREZ María, Modulo de procesos industriales de: IDEAM, inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto

invernadero 200-2004-2009, República de Colombia p 121-142, disponible en: <http://intranet.ideam.gov.co:8080/openbiblio/Bvirtual/021471/InventarioGEI/IDEAM3.pdf> consultado (6/12/2010)

CARDENAS Mauricio, MEJIA Carolina y GARCIA Fabián; La industria del cemento en Colombia; 2007; presentado en *Working Papers* series como documento de trabajo.

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

CEMEX, Historia del cemento y concreto, El origen del producto (http://www.cemexcolombia.com/in/in_hc.html), consultado el (2/2/2011).

DAVIDOVITS J., 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs, Geopolymer institute Saint- Quentin, France, Geopolymer 2001 conference, october 28-29, Melbourne, Australia.

FLOREZ Juan, ROMERO Rubén, LLONGUERAS Joan. Manual de espectroscopia en impedancia electroquímica en corrosión, instituto mexicano del petróleo y facultad de química de la UNAM., México D.F Disponible en: <http://depa.pquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>. Consultado 28/05/11.

FRANTIŠEK Škavara, TOMÁŠ Jilek, LUBOMÍR Kopecky, 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)

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.

GIL G., Cementos, Montoya-Meseguer-Morán Hormigón armado, Barcelona 2000 disponible en: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos_RC08.pdf consultado 22/12/12

GONZALES M., Ataque químico al concreto, Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto Diciembre 1991

GUTIERREZ F., MORA K. C., GURETTA, J. L. y ROUBORT A., Deformación plástica a altas temperaturas de geopolímeros. XI congreso Nacional de propiedades mecánicas de sólidos 25 junio 2004, Pág. 132.

GUTIERREZ Juan, RESTREPO Oscar y TOBÓN Jorge, *Effects of the addition of metakaolin in portland cement* en *Dyna* Nro. 150, pp131141 Medellín, Noviembre de 2006.

HARDJITO D., RANGAN B., Development and properties of low- calcium fly ash-based geopolymer concrete, Curtin University of technology, Perth Australia 2005

HERMANN E., KUNZE C., GATZWEILER R.; KIEBIG G. y DAVIDOVITS J. Proc of Geopolymers. 1999. 211.

HERNANDEZ R., Utilización de aluminosilicatos cubanos no tradicionales en la fabricación de vidrio sódico- cálcico, tesis doctoral, Instituto de ciencia y tecnología de materiales, cuba 2005

http://epa.gov/climatechange/ endangerment/downloads/hallazgodesituaciondepeiligro_medioambiental.pdf consultado (6/12/2010)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Geopol%C3%ADmero>, consultado (6/12/2010)

<http://www.atmosfera.cl/HTML/TEMAS/CALENTAMIENTO/menucalen.htm>
consultado (7/12/2010)

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.

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

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 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

Instituto mexicano del cemento y del concreto Imcyc, concreto en obra problemas causas y soluciones , capítulo 9, cemento y concreto resistentes a los sulfato México D.F octubre de 2006, disponible en: <http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf>

Instituto mexicano del cemento y del concreto Imcyc, el concreto en obra problemas causas y soluciones, Pruebas de resistencia a la compresión del concreto México D.F Junio de 2006, disponible en: <http://www.imcyc.com/problemas.htm> consultado 04/02/13.

JANOTKA I., PUERTAS F., PALACIOS M., VARGAS C. y KRAJC L., *Metakaolin sand a promising addition for Portland cement*, en *Materiales de Construcción* Vol. 60, 298, 73-88 abril-junio 2010.

JOVANI M., ALONSO J. J., y MANGLANO J. 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.

KOSTAS Komnitsas, DIMIYTRA 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

MARIN C., REYES J., MANZANO A., RUBIO J., PEREZ J. y MUÑIZ M., Ventura-E, *Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolin geopolymer. Inorganic Materials*, 2009, Vol. 45, No. 12, pp. 1528–1531.

MARTINEZ Nuria, ANDRES Ana, CHIRALT Amparo, termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno, Universidad politécnica de valencia servicio de publicaciones página 254, disponible en: http://books.google.com.co/books?id=bLQ_Lj6C4p8C&dq=calorimetria+diferencial+de+barrido+dsc&hl=es&sitesec=reviews, consultado 20/04/11.

MEJIA DE GUTIERREZ R., BERNAL S. y RODRIGUEZ E., Nuevos concretos para el aprovechamiento de un subproducto industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia, octubre de 2006.

MORALES Juan, Tecnología de los materiales cerámicos, Consejería de educación comunidad de Madrid, 2005 pags 66-69 disponible en <http://books.google.es/books?id=4H6OXgN1w6wC&printsec=frontcover&dq=tecnologia+de+los+materiales+ceramicos&hl=en&sa=X&ei=eVb9UOy9C9SwhAfcl0CYAw&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q=tecnologia%20de%20los%20materiales%20ceramicos&f=false>

PROVIS John. *Modelling the formation of geopolymers*, Department of Chemical and Biomolecular Engineering The University of Melbourne Marzo 2006.

RODRIGUEZ francisco, 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.

ROMERO Carlos, SORLOZANO Rafael, ABREU Omar, BRIZUELA Luis, PEREZ Zuleima. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua de facultad de ingeniería publicado en: REVISTA INGENIERÍA UC. Vol. 14, No 3, 16-23, 2007

SEGARRRA J., AGUADO A. Y BUIL J., Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón, Capítulo 2, LAS REACCIONES EXPANSIVAS, Universidad Politecnica de Cataluña, julio de 2005, disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3315/4/55864-4.pdf>, consultado 04/02/13.

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

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

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

TICKELL Oliver. Kioto 2 como gestionar el efecto invernadero global. Barcelona noviembre de 2009, primera edición en español, p 118.

TORRES Janneth, DE GUTIERREZ Ruby, CASTELLO Ricardo, VIZCANO Carmina. Análisis Comparativo De Caolines De Diferentes Fuentes Para La Producción De Metacaolín. Publicado On-Line el 15-Nov-2010 Disponible en: www.rlmm.org

TUFIÑO Luis, corrosión de concreto reforzado, compañía *Engineering Universal Service* EUS CORROSION, febrero de 2008, disponible en: <http://www.eus-corrosion.com/CVs/EUS-CONCRETO-ARTICULO.pdf> consultado 30/05/11

VAN JAARVELDJ G. S., VAN DEVENTER J. S., y LORENZEN j., *The potential use of geopolymetric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. Minerals Engineering* Volume 10, Issue 7, July 1997, Pág. 659-669

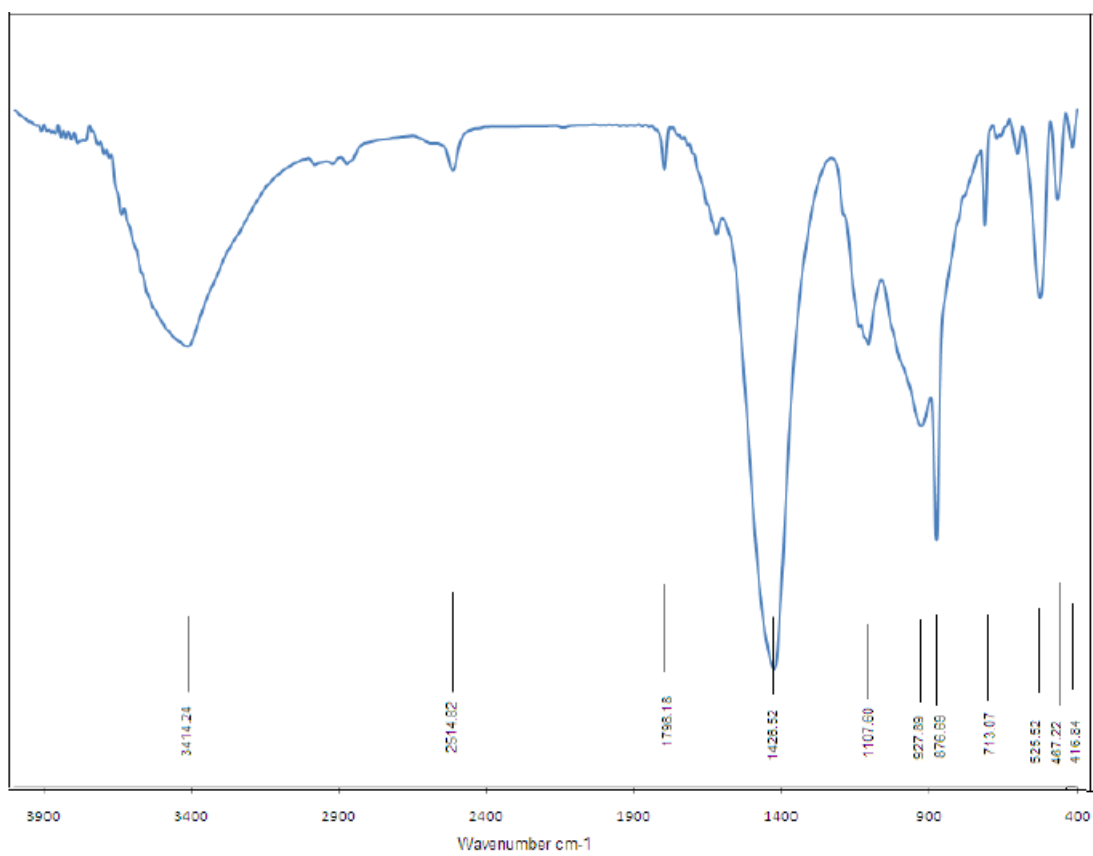
VASQUEZ J, MUÑOZ A., Empleo de la técnica de espectroscopia de impedancias electroquímica para la caracterización de biomateriales aplicación a una aleación biomédica de Co-Cr-Mo, tesis de master, universidad politécnica de valencia programa oficial de posgrado, ingeniería de producción industrial, valencia 2007

WEST. A. R., Solid State Chemistry and its applications, pags 5- 45 (1985)

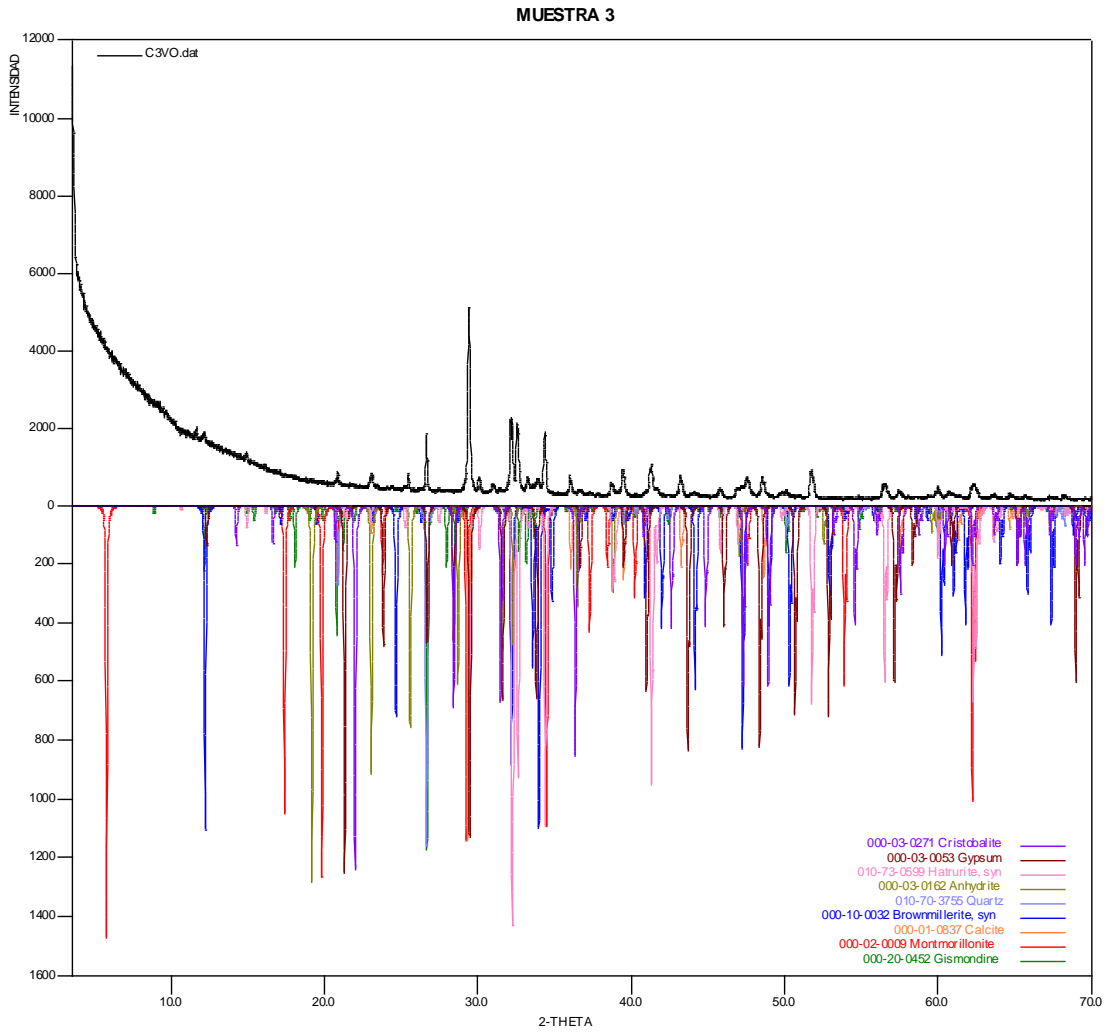
WILCHES Mauricio, RUIZ Luis, p 249-250 bioingeniería VI, fundamentos de instrumentación para la química clínica y radiaciones ionizantes, editorial universidad de Antioquia 2005, paginas 249-250, disponible en: http://books.google.com.co/books?id=2DZYwx7p8csC&pg=PA247&dq=tga+termogravimetria&hl=es&ei=kMu2TYaHCsTw0gGo8_n9Dw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDMQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false consultado 20/04/11.

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
	$\text{Ca}_3 (\text{Si O}_4)_2 \text{O}$	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. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CAOLÍN
UTILIZANDO SEARCH MATCH**

SearchMatch1

Crystallographica Search-Match Version 3, 0, 0, 3

Copyright © 1996-2006, Oxford Cryosystems

Report Compiled at 15:43 Sunday, October 21, 2012

Sample / Data Collection Details

Sample

Sample Name	Caolinita
Data Collected	Saturday, December 30, 1899

Sample Information

Only the first data range was used.

Raw Data

Data File C:\Users\Berserck\Documents\Laboratorio\Archivos\c4qf.raw

Data Range	3.500 to 70.008 degrees
Number of Points	4358
Step Size	0.015 degrees
Counting Stats	Raw counts
Background	Subtracted
Scale Length	5
Stiffness	1
Feature Width	0.105 degrees

Radiation

Target	Cu
Type	Doublet
Wavelengths	1.54056 and 1.54439 Angstroms

Search-Match**Settings**

Search Range	3.5 to 70.0083
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

Matched Materials

A Quartz low, syn

Formula	Si O ₂
Pdf Number	000-85-0335
Figure of Merit	79%
Total Peaks	18
Peaks Matched	17
New Matches	17
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.880424
Concentration	0.91355
I / Icorundum	3.03

B Kaolinite 1 A

Formula	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (O H) ₄
---------	---

Pdf Number	000-80-0885
Figure of Merit	40%
Total Peaks	124
Peaks Matched	63
New Matches	63
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.101566
Concentration	0.0361728
I / Icorundum	1.04

C Anatase, syn

Formula	Ti O ₂
Pdf Number	000-78-2486
Figure of Merit	31%
Total Peaks	11
Peaks Matched	8
New Matches	8
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0268129
Concentration	0.0455432
I / Icorundum	4.96

D Muscovite-2 M #1

Formula	K Al ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (O H, F) ₂
Pdf Number	000-06-0263
Figure of Merit	28%
Total Peaks	60
Peaks Matched	36

New Matches	36
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0747621
Concentration	Not available

E Microcline maximum

Formula	K (Si ₃ Al) O ₈
Pdf Number	000-76-1239
Figure of Merit	7%
Total Peaks	199
Peaks Matched	70
New Matches	70
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0222989
Concentration	0.00473448
I / Icorundum	0.62

**ANEXO E. LISTA DE PICOS OBTENIDOS POR DRX DE CAOLÍN, USANDO
SEARCH MATCH PEAK SEARCH SETTINGS**

Confidence Threshold 90%
Matched / Total 37 / 37

List of Peaks

<u>2-Theta</u>	<u>D-Spacing</u>	<u>Intensity</u>	<u>Width</u>	<u>Confidence</u>	<u>Matches</u>
8.839	9.9960	315	0.095	100%	D
12.342	7.1654	1474	0.091	100%	B
17.776	4.9855	129	0.095	100%	D
19.863	4.4662	926	0.104	100%	BD
20.354	4.3596	248	0.096	100%	B
20.851	4.2566	4259	0.078	100%	A
21.270	4.1738	108	0.079	98.9%	B
24.888	3.5746	1098	0.093	100%	BE
25.293	3.5183	323	0.091	100%	C
26.637	3.3437	12638	0.077	100%	AD
27.435	3.2483	136	0.082	100%	E
27.876	3.1978	100	0.116	99.5%	D
29.870	2.9888	86	0.095	99.5%	D
31.251	2.8598	80	0.074	99.6%	D
34.979	2.5630	522	0.125	100%	BD
35.411	2.5328	87	0.087	99.0%	BE
35.963	2.4951	241	0.124	100%	BD
36.538	2.4572	1226	0.090	100%	A
37.764	2.3802	168	0.124	100%	BCDE
38.466	2.3383	316	0.150	100%	B
39.460	2.2817	630	0.090	100%	AE
40.282	2.2370	472	0.096	100%	ABD
42.433	2.1285	805	0.100	100%	ABD
45.465	1.9933	86	0.104	99.6%	BDE
45.774	1.9808	335	0.082	100%	AE
50.124	1.8189	1411	0.075	100%	ADE

51.028	1.7883	47	0.081	97.2%	BE
54.317	1.6879	78	0.076	96.9%	BE
54.857	1.6727	634	0.079	100%	ABE
55.330	1.6598	215	0.082	100%	ABDE
59.946	1.5422	1654	0.083	100%	ADE
62.250	1.4900	228	0.102	100%	B
64.009	1.4536	227	0.079	100%	ABDE
65.758	1.4189	93	0.075	99.8%	AB
67.713	1.3827	833	0.084	100%	A
68.110	1.3756	863	0.076	100%	ABD
68.312	1.3721	540	0.077	100%	AB

**ANEXO F. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CAOLÍN
UTILIZANDO SEARCH MATCH**

SEARCHMATCH2

Crystallographica Search-Match Version 3, 0, 0, 3

Copyright © 1996-2006, Oxford Cryosystems

Report Compiled at 15:52 Sunday, October 21, 2012

Sample / Data Collection Details

Sample

Sample Name	Metacaolinita
Data Collected	Saturday, December 30, 1899

Sample Information

Only the first data range was used.

Raw Data

Data FileC: \Users\Berserck\Documents\Laboratorio\Archivos\c4qg.raw

Data Range	3.500 to 70.008 degrees
Number of Points	4358
Step Size	0.015 degrees
Counting Stats	Raw counts
Background	Subtracted
Scale Length	5
Stiffness	1
Feature Width	0.12 degrees

Radiation

Target	Cu
--------	----

Type	Doublet
Wavelengths	1.54056 and 1.54439 Angstroms

Search-Match

Settings

Search Range	3.5 to 70.0083
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

Matched Materials

A Quartz

Formula	Si O ₂
Pdf Number	000-85-1054
Figure of Merit	83%
Total Peaks	18
Peaks Matched	16
New Matches	16
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.960584
Concentration	0.970507
I / Icorundum	3.07

B Anatase, syn

Formula	Ti O ₂
Pdf Number	000-78-2486
Figure of Merit	30%

Total Peaks	11
Peaks Matched	4
New Matches	4
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0162694
Concentration	0.0265569
I / Icorundum	4.96

C Microcline maximum

Formula	K Al Si ₃ O ₈
Pdf Number	000-84-0708
Figure of Merit	8%
Total Peaks	198
Peaks Matched	36
New Matches	36
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.0153831
Concentration	0.00293628
I / Icorundum	0.58

D Muscovite-1 M , syn

Formula	K Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (O H) ₂
Pdf Number	000-07-0025
Figure of Merit	20%
Total Peaks	29
Peaks Matched	12
New Matches	12
Strong Unmatched	1

Peak Shift	0
Scale Factor	0.0351764
Concentration	Not available

Peak List

Peak Search Settings

Confidence Threshold	90%
Matched / Total	26 / 27

**ANEXO G. DATOS OBTENIDOS POR DRX DE METACAOLÍN UTILIZANDO
SEARCH MATCH**

<u>2-Theta</u>	<u>D-Spacing</u>	<u>Intensity</u>	<u>Width</u>	<u>Confidence</u>	<u>Matches</u>
8.765	10.0799	227	0.112	100%	D
17.601	5.0347	122	0.092	100%	D
19.713	4.4997	812	0.126	100%	D
20.855	4.2560	4330	0.088	100%	A
22.281	3.9866	77	0.101	98.2%	C
22.713	3.9118	82	0.107	98.9%	C
25.295	3.5181	351	0.104	100%	B
26.641	3.3433	13245	0.087	100%	A
27.444	3.2473	87	0.094	99.2%	C
34.545	2.5943	80	0.106	97.1%	
34.811	2.5750	88	0.123	98.5%	CD
36.544	2.4568	1299	0.103	100%	A
37.274	2.4104	54	0.102	97.9%	D
37.840	2.3756	85	0.111	100%	BD
39.475	2.2809	750	0.102	100%	AC
40.293	2.2365	461	0.102	100%	A
42.452	2.1276	826	0.106	100%	A
45.036	2.0113	42	0.091	94.9%	D
45.790	1.9799	455	0.114	100%	AC
50.131	1.8183	1116	0.107	100%	AC
54.871	1.6725	571	0.098	100%	AC
55.286	1.6602	145	0.092	100%	AC
59.933	1.5424	816	0.093	100%	AC
64.022	1.4534	171	0.087	100%	AC
67.703	1.3829	735	0.098	100%	A
68.120	1.3753	752	0.088	100%	A
68.328	1.3719	337	0.087	100%	A

**ANEXO H. DATOS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE
GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A BASE DE METACAOLÍN UTILIZANDO
SEARCH MATCH**

SearchMatch3

Crystallographica Search-Match Version 3, 0, 0, 3

Copyright © 1996-2006, Oxford Cryosystems

Report Compiled at 16:29 Sunday, October 21, 2012

Sample / Data Collection Details

Sample

Sample Name	Geopolimero Metacaolinita
Data Collected	Saturday, December 30, 1899

Sample Information

Only the first data range was used.

Raw Data

Data File C:\Users\Berserck\Documents\Laboratorio\Archivos\c4qh.raw

Data Range	3.500 to 70.008 degrees
Number of Points	4358
Step Size	0.015 degrees
Counting Stats	Raw counts
Background	Subtracted
Scale Length	5
Stiffness	1
Feature Width	0.105 degrees

Radiation

Target	Cu
Type	Doublet
Wavelengths	1.54056 and 1.54439 Angstroms

Search-Match**Settings**

Search Range	3.5 to 70.0083
Data Source	Raw data
Trust Intensities	Yes
Allow Zero Errors	No
Figure of Merit	Multi-phase
Apply Restrictions	Yes

Matched Materials

A Quartz	
Formula	Si O ₂
Pdf Number	000-79-1910
Figure of Merit	93%
Total Peaks	18
Peaks Matched	15
New Matches	15
Strong Unmatched	0
Peak Shift	0
Scale Factor	0.822893
Concentration	1
I / Icorundum	3.07

B Muscovite-1 M , syn

Formula	K Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (O H) ₂
---------	---

Pdf Number 000-07-0025
Material failed [Unmatched strong peaks]

Peak List

Peak Search Settings

Confidence Threshold 90%
Matched / Total 16 / 19

**ANEXO I. LISTA DE PICOS OBTENIDOS POR DRX DE UN GEOPOLÍMERO
SINTETIZADO A BASE DE METACAOLÍN UTILIZANDO SEARCH MATCH**

<u>2-Theta</u>	<u>D-Spacing</u>	<u>Intensity</u>	<u>Width</u>	<u>Confidence</u>	<u>Matches</u>
9.343	9.4581	129	0.068	96.7%	
19.749	4.4917	108	0.097	99.3%	B
20.852	4.2565	3010	0.078	100%	A
24.034	3.6997	63	0.075	90.8%	
26.639	3.3436	11992	0.076	100%	A
36.545	2.4567	926	0.089	100%	A
37.891	2.3725	53	0.100	93.3%	
39.470	2.2812	936	0.161	100%	A
40.289	2.2369	240	0.084	99.9%	A
42.448	2.1279	372	0.096	100%	A
45.782	1.9807	338	0.075	100%	A
50.126	1.8188	1486	0.074	100%	A
54.863	1.6726	612	0.080	100%	A
55.314	1.6600	219	0.081	100%	A
59.941	1.5422	1319	0.078	100%	A
64.024	1.4534	281	0.078	100%	A
67.723	1.3826	861	0.083	100%	A
68.118	1.3754	947	0.076	100%	A
68.319	1.3720	481	0.075	100%	A

ANEXO J. DATOS OBTENIDOS POR EIS

10% 90 DIAS DE FRAGUADO

DIA 1

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
13756	1720,3	13863	30000	7,1287
13852	1583,1	13942	24168	6,5198
13934	1379	14002	19470	5,6522
14015	1163,4	14064	15685	4,7452
14091	986,88	14125	12636	4,0062
14164	856,69	14190	10180	3,4612
14220	741,49	14239	8201,5	2,9848
14271	590,67	14283	6607,2	2,37
14309	500,37	14318	5322,9	2,0027
14347	442,39	14354	4288,2	1,7661
14394	398,72	14400	3454,6	1,5866
14443	375,06	14448	2783,1	1,4875
14495	372,65	14500	2242,1	1,4726
14522	362,8	14527	1806,3	1,4311
14571	341,21	14575	1455,2	1,3414
14605	310,47	14609	1172,3	1,2177
14635	303,01	14638	944,45	1,1861
14664	298,03	14667	760,86	1,1642
14709	306,31	14713	612,96	1,1929
14759	317,68	14763	493,81	1,233
14801	330,47	14805	397,82	1,279
14834	339,44	14838	320,49	1,3108
14892	356,8	14897	258,19	1,3724
14932	363,12	14936	208	1,393
14965	365,73	14969	167,57	1,3999
15002	383,15	15007	135	1,4629
15030	409,16	15035	108,75	1,5593
15070	446,07	15077	87,618	1,6954
15100	496,39	15108	70,586	1,8828
15153	557	15163	56,866	2,1052
15200	623,24	15213	45,812	2,3479
15238	688,4	15254	36,907	2,5866
15294	778,65	15313	29,733	2,9145

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
15359	894,25	15385	23,953	3,3321
15433	1023,7	15466	19,297	3,7951
15506	1175,6	15550	15,546	4,3356
15599	1358,1	15658	12,524	4,976
15693	1573,3	15771	10,089	5,7254
15813	1820,6	15918	8,1285	6,5676
15932	2117,8	16072	6,5484	7,5719
16094	2474	16283	5,2755	8,7394
16258	2910,7	16517	4,25	10,15
16455	3405,3	16803	3,4239	11,692
16691	4005,5	17165	2,7583	13,494
16964	4686,6	17599	2,2221	15,443
17291	5506,4	18147	1,7902	17,664
17665	6463,1	18810	1,4422	20,095
18120	7609,2	19653	1,1619	22,778
18643	8938,4	20675	0,9360473	25,615
19245	10490	21919	0,7540957	28,594
20000	12352	23507	0,6075124	31,699
20884	14591	25477	0,4894224	34,941
21888	17229	27856	0,394287	38,209
22998	20335	30700	0,3176444	41,484
24297	24055	34190	0,2558997	44,714
25809	28497	38447	0,2061572	47,833
28104	33342	43607	0,1660838	49,873
30911	39092	49837	0,1337999	51,666
34263	45861	57247	0,1077915	53,237
37505	54499	66157	0,0868387	55,466
41252	64560	76614	0,0699587	57,424
46116	77083	89825	0,0563599	59,11
51849	91967	105570	0,0454045	60,587
58677	109840	124530	0,0365787	61,891
66469	130830	146740	0,0294684	63,068
74213	144980	162870	0,0237403	62,894
82134	150820	171730	0,0191256	61,429

DIA 2

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1713,8	132,05	1718,9	30000	4,4059
1713,9	120,67	1718,1	24168	4,0273
1713,5	103,64	1716,6	19470	3,4612
1715,2	81,341	1717,2	15685	2,715
1715,8	70,502	1717,3	12636	2,3528
1717,7	58,682	1718,7	10180	1,9566
1719,2	49,668	1719,9	8201,5	1,6548
1722,2	40,87	1722,7	6607,2	1,3594
1727,7	19,233	1727,8	5322,9	0,6378116
1731,5	4,6726	1731,5	4288,2	0,154613
1736,2	-10,335	1736,2	3454,6	-0,3410851
1741,9	-2,0972	1741,9	2783,1	-0,0689835
1748,1	6,756	1748,1	2242,1	0,2214346
1751,7	12,906	1751,7	1806,3	0,4221639
1753	18,407	1753,1	1455,2	0,6016179
1754,9	20,656	1755	1172,3	0,6743757
1758,9	25,914	1759,1	944,45	0,8440657
1762,1	30,297	1762,4	760,86	0,9850266
1766	34,502	1766,3	612,96	1,1192
1769,6	39,639	1770,1	493,81	1,2831
1774,8	43,8	1775,4	397,82	1,4137
1779,1	48,312	1779,7	320,49	1,5555
1789,5	54,043	1790,3	258,19	1,7297
1797,6	58,39	1798,5	208	1,8604
1805,2	62,686	1806,3	167,57	1,9888
1809,9	69,485	1811,2	135	2,1986
1815,5	77,969	1817,2	108,75	2,4591
1823,5	89,035	1825,6	87,618	2,7953
1831,2	102,67	1834,1	70,586	3,2089
1840,5	118,58	1844,3	56,866	3,6865
1849,7	134,83	1854,6	45,812	4,1693
1859,5	151,73	1865,7	36,907	4,6649
1870,9	175,35	1879,1	29,733	5,3544
1885,3	206,22	1896,6	23,953	6,2423
1899,7	239,74	1914,8	19,297	7,1926
1917,8	278,66	1937,9	15,546	8,2675
1940,9	325,07	1968	12,524	9,5077
1966,1	380,28	2002,5	10,089	10,947
1997,7	443,19	2046,2	8,1285	12,508
2029,6	517,77	2094,6	6,5484	14,311
2072,8	605,41	2159,4	5,2755	16,281

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2121	709,78	2236,6	4,25	18,502
2179,4	826,03	2330,7	3,4239	20,757
2249,1	964,65	2447,2	2,7583	23,214
2327,8	1120,9	2583,6	2,2221	25,712
2420,7	1304,3	2749,7	1,7902	28,318
2526,2	1515,4	2945,8	1,4422	30,959
2650,8	1768,3	3186,5	1,1619	33,707
2796,3	2061,9	3474,3	0,9360473	36,405
2964,2	2401,3	3814,8	0,7540957	39,012
3172,2	2799,8	4231,1	0,6075124	41,432
3420,5	3269,5	4731,8	0,4894224	43,707
3716,5	3810,1	5322,5	0,394287	45,713
4064	4427,3	6009,8	0,3176444	47,45
4484,4	5143,2	6823,7	0,2558997	48,915
4980,5	5968,9	7773,9	0,2061572	50,158
5594,9	6887,7	8873,8	0,1660838	50,913
6323,8	7927	10140	0,1337999	51,419
7228	9036,6	11571	0,1077915	51,345
8260,7	10325	13223	0,0868387	51,339
9455,9	11757	15088	0,0699587	51,193
10329	12777	16430	0,0563599	51,048
10878	13237	17134	0,0454045	50,588

DIA 3

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1388	132,57	1394,3	30000	5,4558
1392,9	122,71	1398,3	24168	5,0345
1394,9	109,07	1399,2	19470	4,4711
1397,7	87,991	1400,5	15685	3,6021
1401,2	74,644	1403,2	12636	3,0493
1405,9	61,498	1407,2	10180	2,5046
1409,1	52,4	1410	8201,5	2,1297
1412,5	42,946	1413,2	6607,2	1,7414
1415,7	36,512	1416,2	5322,9	1,4773
1418,7	33,458	1419,1	4288,2	1,351
1421,3	31,666	1421,7	3454,6	1,2762
1424,3	31,052	1424,7	2783,1	1,2489
1427,7	32,327	1428,1	2242,1	1,2971
1430,4	34,079	1430,8	1806,3	1,3648
1434,2	36,427	1434,7	1455,2	1,4549
1437,7	36,381	1438,2	1172,3	1,4495

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1441,4	34,863	1441,8	944,45	1,3855
1444,7	32,637	1445,1	760,86	1,2941
1449,1	31,75	1449,5	612,96	1,2551
1454,8	34,098	1455,2	493,81	1,3426
1459,5	36,736	1459,9	397,82	1,4418
1463,1	40,004	1463,6	320,49	1,5662
1468,1	44,02	1468,7	258,19	1,7174
1472,3	47,272	1473,1	208	1,8389
1475,8	50,012	1476,7	167,57	1,9408
1479,7	54,462	1480,7	135	2,1078
1488,8	59,707	1490	108,75	2,2964
1500,1	67,439	1501,6	87,618	2,574
1511,5	77,081	1513,5	70,586	2,9192
1519,3	88,002	1521,9	56,866	3,3149
1526,9	99,491	1530,1	45,812	3,728
1534,1	110,9	1538,1	36,907	4,1351
1543,6	126,55	1548,8	29,733	4,6868
1555,5	146,83	1562,5	23,953	5,3924
1568,4	168,81	1577,4	19,297	6,1432
1583,2	194,34	1595,1	15,546	6,9981
1602,3	223,86	1617,9	12,524	7,9533
1622,7	258,1	1643,1	10,089	9,0372
1647	296,52	1673,5	8,1285	10,205
1672,8	340,47	1707,1	6,5484	11,504
1706,5	391,93	1751	5,2755	12,934
1744,1	451,49	1801,6	4,25	14,513
1787,4	517	1860,6	3,4239	16,132
1839,1	593,66	1932,5	2,7583	17,889
1897,3	678,73	2015	2,2221	19,683
1965,4	776,51	2113,2	1,7902	21,559
2041,8	886,27	2225,8	1,4422	23,464
2131,6	1014,7	2360,7	1,1619	25,456
2236,5	1159,7	2519,3	0,9360473	27,408
2360,6	1321,9	2705,5	0,7540957	29,25
2512,2	1503,7	2927,9	0,6075124	30,903
2694,2	1707	3189,4	0,4894224	32,358
2906,5	1927,6	3487,6	0,394287	33,553
3150,6	2161,9	3821	0,3176444	34,458
3433,9	2409,7	4195	0,2558997	35,06
3636,6	2581,4	4459,7	0,2061572	35,368
3747,1	2670,1	4601,1	0,1660838	35,473

DIA 4

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1562,3	122,39	1567,1	30000	4,4796
1565,3	109,58	1569,1	24168	4,0048
1568,5	94,225	1571,4	19470	3,4377
1569,3	75,891	1571,1	15685	2,7686
1571,1	65,31	1572,5	12636	2,3803
1571,4	55,312	1572,4	10180	2,0158
1574,3	49,362	1575,1	8201,5	1,7958
1576,6	40,027	1577,2	6607,2	1,4542
1579,7	35,516	1580,1	5322,9	1,2879
1582,7	32,385	1583	4288,2	1,1722
1585,9	32,041	1586,2	3454,6	1,1574
1589,2	32,918	1589,6	2783,1	1,1866
1592,8	35,724	1593,2	2242,1	1,2848
1595,6	36,801	1596,1	1806,3	1,3212
1600	38,155	1600,5	1455,2	1,366
1605,3	33,122	1605,7	1172,3	1,1819
1612,8	29,503	1613,1	944,45	1,0479
1618,4	26,469	1618,6	760,86	0,9369934
1621,5	31,082	1621,8	612,96	1,0981
1624,1	35,847	1624,5	493,81	1,2644
1628,2	40,075	1628,7	397,82	1,4099
1633,3	43,572	1633,8	320,49	1,5281
1642,7	48,699	1643,4	258,19	1,6981
1649,2	52,721	1650,1	208	1,8309
1655,2	56,207	1656,2	167,57	1,9448
1659,7	62,318	1660,9	135	2,1502
1665,1	69,485	1666,6	108,75	2,3895
1672,9	79,162	1674,7	87,618	2,7092
1679,8	90,272	1682,3	70,586	3,076
1688,1	103,72	1691,3	56,866	3,5161
1695,9	118,09	1700	45,812	3,9834
1704,1	133,43	1709,3	36,907	4,4774
1714,8	153,75	1721,7	29,733	5,1237
1728,4	179,48	1737,7	23,953	5,9285
1742	207,73	1754,4	19,297	6,8003
1758,3	240,72	1774,7	15,546	7,7957
1779,2	280,47	1801,2	12,524	8,9582
1802,4	326,89	1831,8	10,089	10,279
1830,1	379,53	1869,1	8,1285	11,715
1859,2	441,24	1910,9	6,5484	13,35
1898,1	514,35	1966,6	5,2755	15,162

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1941,7	601,13	2032,7	4,25	17,201
1993,6	697,85	2112,2	3,4239	19,292
2055,2	812,36	2209,9	2,7583	21,567
2125,6	941,05	2324,6	2,2221	23,88
2207,4	1090,5	2462	1,7902	26,291
2301	1261,3	2624	1,4422	28,73
2410,9	1465,7	2821,5	1,1619	31,297
2537,7	1701,1	3055,1	0,9360473	33,835
2686,7	1973,1	3333,4	0,7540957	36,294
2871,8	2288,7	3672,3	0,6075124	38,554
3095,7	2659,8	4081,5	0,4894224	40,669
3360	3084	4560,8	0,394287	42,548
3666,3	3563,1	5112,5	0,3176444	44,183
4039,6	4115,8	5767	0,2558997	45,535
4472,4	4738,6	6515,9	0,2061572	46,656
4781,7	5185,5	7053,7	0,1660838	47,32
4940,2	5413,6	7328,9	0,1337999	47,618

DIA 8

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1418,5	140,68	1425,5	30000	5,6635
1421	129,63	1427	24168	5,2123
1424,5	114,29	1429,1	19470	4,5871
1429,4	93,158	1432,4	15685	3,7289
1432,5	80,161	1434,8	12636	3,2028
1437,2	66,144	1438,8	10180	2,6349
1441,4	55,215	1442,4	8201,5	2,1937
1445,8	45,549	1446,6	6607,2	1,8044
1449	39,911	1449,5	5322,9	1,5777
1451,8	36,877	1452,2	4288,2	1,455
1455,6	35,863	1456,1	3454,6	1,4113
1458,6	36,145	1459	2783,1	1,4195
1463,5	37,618	1464	2242,1	1,4724
1467	38,293	1467,5	1806,3	1,4952
1472,1	40,674	1472,7	1455,2	1,5826
1481	35,289	1481,4	1172,3	1,3649
1490,3	30,618	1490,6	944,45	1,1769
1498,4	25,493	1498,6	760,86	0,9747171
1501,9	29,353	1502,2	612,96	1,1196
1503,9	33,255	1504,3	493,81	1,2667
1508,2	37,814	1508,7	397,82	1,4362

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1513,1	41,182	1513,6	320,49	1,559
1523,2	45,354	1523,9	258,19	1,7054
1530,6	47,728	1531,3	208	1,786
1536	51,025	1536,9	167,57	1,9025
1540,5	56,475	1541,6	135	2,0994
1545,4	63,025	1546,7	108,75	2,3353
1552,8	71,168	1554,5	87,618	2,624
1560	80,6	1562,1	70,586	2,9576
1568,3	91,527	1570,9	56,866	3,34
1576,2	102,85	1579,6	45,812	3,7334
1584,2	114,13	1588,3	36,907	4,1209
1594,5	129,6	1599,7	29,733	4,6469
1606,9	149,39	1613,8	23,953	5,3113
1620	170,87	1629	19,297	6,021
1635,1	195,72	1646,8	15,546	6,8255
1654,6	224,98	1669,8	12,524	7,7435
1675,3	258,93	1695,2	10,089	8,786
1699,8	296,64	1725,5	8,1285	9,8991
1725,8	339,43	1758,8	6,5484	11,127
1759,7	389,89	1802,3	5,2755	12,493
1797,5	449,13	1852,8	4,25	14,028
1840,9	514,16	1911,4	3,4239	15,604
1891	590,13	1981	2,7583	17,331
1948	674,1	2061,3	2,2221	19,088
2014,6	771,69	2157,4	1,7902	20,959
2090,5	881,14	2268,6	1,4422	22,855
2178,2	1009,9	2401	1,1619	24,876
2279,2	1154,2	2554,8	0,9360473	26,859
2397,6	1317,5	2735,8	0,7540957	28,79
2544,1	1501	2953,9	0,6075124	30,541
2719	1710,5	3212,3	0,4894224	32,175
2921,1	1940,3	3506,8	0,394287	33,594
3153,4	2192	3840,4	0,3176444	34,804
3423,1	2465,7	4218,7	0,2558997	35,766
3736,1	2763,8	4647,3	0,2061572	36,493
4097,4	3076	5123,6	0,1660838	36,896
4504,1	3407,8	5648	0,1337999	37,111
4800	3625	6015,1	0,1077915	37,061
4963,4	3727,5	6207,3	0,0868387	36,907

DIA 11

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1551,4	128,25	1556,7	30000	4,7259
1554,9	120,25	1559,6	24168	4,4224
1559,8	105,4	1563,4	19470	3,8658
1564,5	84,194	1566,7	15685	3,0804
1567,9	72,979	1569,6	12636	2,6648
1569,5	62,941	1570,8	10180	2,2964
1572,3	58,093	1573,4	8201,5	2,1159
1574,9	47,948	1575,6	6607,2	1,7438
1578,9	41,734	1579,4	5322,9	1,5141
1582,6	37,851	1583,1	4288,2	1,37
1586,7	36,557	1587,1	3454,6	1,3198
1590,9	38,196	1591,4	2783,1	1,3753
1595,3	40,515	1595,8	2242,1	1,4547
1599,4	41,427	1599,9	1806,3	1,4837
1604	42,463	1604,5	1455,2	1,5164
1610,5	37,564	1610,9	1172,3	1,3361
1617,3	33,609	1617,7	944,45	1,1904
1622,4	30,555	1622,7	760,86	1,0789
1626,2	34,326	1626,6	612,96	1,2092
1629,3	38,629	1629,7	493,81	1,3581
1635,3	43,04	1635,8	397,82	1,5076
1640,2	46,483	1640,8	320,49	1,6233
1650,2	50,887	1651	258,19	1,7662
1656,7	53,831	1657,6	208	1,861
1663,2	56,69	1664,2	167,57	1,9521
1666,5	62,316	1667,6	135	2,1415
1672,2	68,917	1673,6	108,75	2,36
1680	77,485	1681,8	87,618	2,6406
1687,6	86,744	1689,9	70,586	2,9423
1696,4	98,246	1699,2	56,866	3,3145
1705	110,45	1708,6	45,812	3,7065
1714,1	123,58	1718,5	36,907	4,1239
1725,2	140,78	1730,9	29,733	4,6651
1737,9	163,35	1745,5	23,953	5,3698
1751,6	188,11	1761,7	19,297	6,1299
1766,7	216,48	1779,9	15,546	6,986
1786,9	249,64	1804,2	12,524	7,9533
1809	288,65	1831,9	10,089	9,0656
1835,1	332,61	1865	8,1285	10,273
1861,8	383,95	1901	6,5484	11,652
1896,5	444,05	1947,8	5,2755	13,177

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
1935,7	515,24	2003,1	4,25	14,905
1980,8	593,94	2067,9	3,4239	16,691
2034,5	687,45	2147,5	2,7583	18,669
2095,1	792,18	2239,9	2,2221	20,711
2167	915,27	2352,4	1,7902	22,897
2248,1	1055,3	2483,5	1,4422	25,146
2343	1221,4	2642,2	1,1619	27,533
2451,8	1410,7	2828,6	0,9360473	29,915
2580,2	1627,7	3050,8	0,7540957	32,247
2739,4	1878,6	3321,7	0,6075124	34,442
2931,6	2171,4	3648,2	0,4894224	36,527
3155,9	2503,3	4028,2	0,394287	38,423
3415,3	2875,1	4464,3	0,3176444	40,092
3724,1	3296,1	4973,3	0,2558997	41,511
4085,5	3769,5	5558,8	0,2061572	42,697
4528,6	4284,6	6234,3	0,1660838	43,414
5047,5	4858,4	7005,8	0,1337999	43,907
5685,8	5418,3	7854	0,1077915	43,62
6409,9	6052,7	8816	0,0868387	43,359
7239,2	6723,4	9879,8	0,0699587	42,885
8184	7579,2	11154	0,0563599	42,803
9262,5	8512,4	12580	0,0454045	42,584
10512	9581,3	14223	0,0365787	42,347
11926	10820	16103	0,0294684	42,216
12988	11672	17462	0,0237403	41,946
13639	12057	18204	0,0191256	41,477

CEMENTO 90 DIAS FRAGUADO

DIA 1

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
25473	8001	26700	30000	17,437
26403	7272,4	27386	24168	15,399
27114	5718,9	27711	19470	11,91
27605	4297	27937	15685	8,8478
28034	3112,5	28207	12636	6,3353
28587	2780,6	28722	10180	5,5557
29104	2519,2	29213	8201,5	4,9472
29541	2161,2	29620	6607,2	4,1844
29884	1945,8	29948	5322,9	3,7253

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
30132	1769,4	30184	4288,2	3,3607
30354	1598,6	30396	3454,6	3,0148
30555	1562,7	30595	2783,1	2,9277
30742	1555,2	30782	2242,1	2,8961
30902	1509	30939	1806,3	2,7958
31042	1411,4	31074	1455,2	2,6034
31188	1291,5	31215	1172,3	2,3713
31372	1252,9	31397	944,45	2,287
31558	1189,5	31581	760,86	2,1587
31737	1128,7	31758	612,96	2,0367
31880	1128,4	31900	493,81	2,0272
32017	1136,3	32037	397,82	2,0327
32153	1135,9	32173	320,49	2,0233
32330	1072,4	32348	258,19	1,8998
32468	1002,2	32483	208	1,768
32582	922,17	32595	167,57	1,6212
32673	916,87	32686	135	1,6074
32784	905,96	32797	108,75	1,5829
32914	908,5	32926	87,618	1,5811
33029	920,36	33042	70,586	1,5961
33143	931,48	33156	56,866	1,6098
33251	942,34	33264	45,812	1,6233
33317	949,98	33331	36,907	1,6332
33414	975,38	33428	29,733	1,672
33525	1010,4	33540	23,953	1,7263
33645	1056,6	33662	19,297	1,7987
33766	1114,3	33784	15,546	1,8901
33881	1185,3	33902	12,524	2,0036
34003	1261,3	34026	10,089	2,1244
34130	1349,8	34157	8,1285	2,2649
34260	1463,9	34291	6,5484	2,4467
34405	1596,2	34442	5,2755	2,6563
34549	1744,9	34593	4,25	2,8913
34710	1912,7	34763	3,4239	3,1541
34893	2121,3	34958	2,7583	3,479
35086	2369,3	35165	2,2221	3,8633
35301	2660,3	35402	1,7902	4,3097
35543	2986,7	35668	1,4422	4,8034
35820	3352,4	35977	1,1619	5,3467
36124	3775	36321	0,9360473	5,9658
36456	4282,4	36707	0,7540957	6,6997
36877	4886,3	37199	0,6075124	7,548

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
37353	5608,8	37771	0,4894224	8,5397
37887	6450,1	38432	0,394287	9,6618
38448	7451	39163	0,3176444	10,967
39096	8629,8	40037	0,2558997	12,447
39831	10030	41074	0,2061572	14,134
40816	11184	42321	0,1660838	15,323
41953	12600	43805	0,1337999	16,717
43259	14125	45507	0,1077915	18,084
44592	16497	47546	0,0868387	20,302
46122	19214	49965	0,0699587	22,617
47977	22737	53092	0,0563599	25,357
50123	26884	56878	0,0454045	28,207
52626	31808	61492	0,0365787	31,15
55526	37548	67030	0,0294684	34,068
58938	44420	73803	0,0237403	37,005
62929	52636	82041	0,0191256	39,911
67636	62427	92042	0,0154079	42,707
73190	74077	104130	0,0124128	45,346
78995	87375	117790	0,01	47,884

DIA 2

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2701,5	369,07	2726,6	30000	7,7795
2715,8	318,03	2734,4	24168	6,6791
2732,1	266,91	2745,1	19470	5,58
2745	219,07	2753,7	15685	4,563
2755,4	188,35	2761,8	12636	3,9106
2762,5	160,18	2767,1	10180	3,3187
2772,5	138,01	2776	8201,5	2,8498
2781,5	114,31	2783,8	6607,2	2,3535
2788,6	80,789	2789,8	5322,9	1,6594
2793,8	55,632	2794,4	4288,2	1,1407
2799,2	36,38	2799,5	3454,6	0,7446024
2810,4	44,207	2810,8	2783,1	0,9011819
2821,5	53,563	2822	2242,1	1,0875
2829,6	55,867	2830,2	1806,3	1,1311
2833,9	59,167	2834,5	1455,2	1,196
2838,9	58,863	2839,5	1172,3	1,1878
2847,8	64,63	2848,5	944,45	1,3001
2855	66,22	2855,8	760,86	1,3287
2862,7	70,821	2863,6	612,96	1,4171

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2870,4	76,922	2871,4	493,81	1,535
2881,4	84,779	2882,7	397,82	1,6853
2892	90,354	2893,4	320,49	1,7895
2911,1	97,371	2912,8	258,19	1,9157
2926	100,2	2927,7	208	1,9613
2939,5	104,74	2941,4	167,57	2,0408
2950,7	111,5	2952,8	135	2,164
2963,2	121,62	2965,7	108,75	2,3503
2981,5	131,85	2984,4	87,618	2,5322
2999,5	142,75	3002,9	70,586	2,7248
3019,4	154,46	3023,3	56,866	2,9285
3038,2	166,09	3042,7	45,812	3,1291
3054,8	178,64	3060	36,907	3,3469
3076,9	192,68	3082,9	29,733	3,5834
3102,1	210,36	3109,2	23,953	3,8795
3128,5	226,23	3136,6	19,297	4,1362
3155,9	245,75	3165,4	15,546	4,4527
3186,9	266,76	3198	12,524	4,7849
3220,9	289,91	3233,9	10,089	5,1434
3256,8	313,93	3271,9	8,1285	5,5059
3295	340,79	3312,5	6,5484	5,9049
3337,6	371,01	3358,1	5,2755	6,3431
3384	404,66	3408,1	4,25	6,8191
3432,5	439,62	3460,6	3,4239	7,2985
3485,9	479,05	3518,7	2,7583	7,8248
3542,2	522,59	3580,6	2,2221	8,3925
3603,5	572,16	3648,6	1,7902	9,0221
3670,3	625,81	3723,2	1,4422	9,6765
3740,4	688,47	3803,2	1,1619	10,429
3818,6	757,89	3893,1	0,9360473	11,226
3903	837,35	3991,8	0,7540957	12,108
4005,2	926,54	4111	0,6075124	13,025
4117,2	1030,3	4244,2	0,4894224	14,049
4242,9	1147,2	4395,3	0,394287	15,131
4376,9	1277,8	4559,6	0,3176444	16,275
4528	1426,5	4747,4	0,2558997	17,487
4696,1	1597,3	4960,3	0,2061572	18,786
4903,2	1753,4	5207,3	0,1660838	19,677
5136	1933,9	5488	0,1337999	20,633
5407,6	2080,9	5794,2	0,1077915	21,048
5690,3	2302,5	6138,5	0,0868387	22,031
5998,9	2555,4	6520,6	0,0699587	23,073

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
6339,9	2941,3	6989	0,0563599	24,888
6723,2	3396,1	7532,2	0,0454045	26,8
7154,2	3941	8167,9	0,0365787	28,849
7476,9	4271,4	8611	0,0294684	29,739
7701,3	4354,3	8847	0,0237403	29,484

DIA 3

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
3316,6	88,846	3317,8	30000	1,5345
3337,7	110,71	3339,6	24168	1,8998
3358,8	111,99	3360,7	19470	1,9097
3373,2	103,08	3374,8	15685	1,7503
3398,1	105,39	3399,8	12636	1,7765
3422,7	107,56	3424,4	10180	1,8
3451,1	104,17	3452,7	8201,5	1,729
3470,4	92,556	3471,6	6607,2	1,5277
3484,3	89,48	3485,5	5322,9	1,471
3492,1	90,252	3493,3	4288,2	1,4804
3505,5	92,071	3506,7	3454,6	1,5045
3519,1	98,484	3520,5	2783,1	1,603
3538,7	107,24	3540,3	2242,1	1,7359
3551,7	111,68	3553,5	1806,3	1,8011
3564,8	114,46	3566,6	1455,2	1,8391
3574,9	115,16	3576,7	1172,3	1,8451
3586,4	118,91	3588,4	944,45	1,8991
3602,1	125,07	3604,2	760,86	1,9887
3618,7	131,95	3621,1	612,96	2,0883
3639,1	142,96	3641,9	493,81	2,2497
3656,4	151,45	3659,6	397,82	2,3719
3675,3	159,63	3678,7	320,49	2,4871
3706,7	168,42	3710,6	258,19	2,6016
3731	173,33	3735	208	2,6599
3753	178,94	3757,3	167,57	2,7298
3773,1	188,6	3777,8	135	2,8616
3797,7	200,85	3803	108,75	3,0274
3828,2	215,4	3834,3	87,618	3,2204
3857,6	231,26	3864,5	70,586	3,4308
3889,3	248,89	3897,3	56,866	3,6616
3920,3	265,95	3929,4	45,812	3,881
3947,7	280,52	3957,7	36,907	4,0646
3983,7	299,55	3994,9	29,733	4,3003

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
4024,8	322,42	4037,7	23,953	4,5801
4067,5	346,38	4082,2	19,297	4,8675
4112,1	371,25	4128,8	15,546	5,1588
4161	397,95	4180	12,524	5,4631
4213,8	426,15	4235,2	10,089	5,7749
4267,8	455	4292	8,1285	6,0856
4324,6	487,52	4352	6,5484	6,4321
4386,1	522,97	4417,2	5,2755	6,7995
4452,7	563,94	4488,3	4,25	7,2182
4520,2	607,18	4560,8	3,4239	7,6506
4594,4	658,09	4641,3	2,7583	8,1515
4673,3	712,75	4727,4	2,2221	8,6717
4758,8	773,94	4821,3	1,7902	9,2374
4850	842,14	4922,5	1,4422	9,8507
4944,8	922,32	5030,1	1,1619	10,565
5050,5	1011,7	5150,9	0,9360473	11,328
5162,4	1111,6	5280,7	0,7540957	12,152
5302,3	1221,7	5441,3	0,6075124	12,975
5450	1349,1	5614,5	0,4894224	13,904
5616,5	1491,2	5811,1	0,394287	14,869
5787,7	1652,9	6019,1	0,3176444	15,939
5909,7	1767,3	6168,3	0,2558997	16,65
5972,8	1829,3	6246,7	0,2061572	17,028

DIA 4

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2941,3	14,8	2941,4	30000	0,2882946
2960,7	46,031	2961,1	24168	0,8907325
2977,3	53,304	2977,7	19470	1,0257
2991,2	51,103	2991,6	15685	0,9787945
3005,8	50,705	3006,3	12636	0,9664344
3022,7	61,051	3023,3	10180	1,157
3042,2	65,322	3042,9	8201,5	1,23
3056,8	61,022	3057,5	6607,2	1,1436
3069,9	56,655	3070,4	5322,9	1,0572
3079,2	57,281	3079,7	4288,2	1,0657
3090,8	59,091	3091,4	3454,6	1,0952
3104,4	65,634	3105,1	2783,1	1,2112
3119,8	73,519	3120,7	2242,1	1,3499
3130,1	75,531	3131	1806,3	1,3823
3135,6	78,17	3136,6	1455,2	1,4281

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
3141,2	78,214	3142,1	1172,3	1,4263
3151,2	83,937	3152,3	944,45	1,5258
3162,3	85,887	3163,5	760,86	1,5557
3171,9	89,848	3173,2	612,96	1,6225
3183	94,534	3184,4	493,81	1,7012
3195,6	101,76	3197,3	397,82	1,8239
3208,3	105,99	3210	320,49	1,8923
3229,8	111,49	3231,7	258,19	1,977
3246,7	113,53	3248,7	208	2,0027
3262,7	117,89	3264,8	167,57	2,0694
3275,5	125,84	3277,9	135	2,2001
3289,5	135,39	3292,3	108,75	2,3569
3309,3	145,45	3312,5	87,618	2,5167
3328,6	155,63	3332,3	70,586	2,6769
3350,5	166,57	3354,7	56,866	2,8462
3371,6	177,43	3376,3	45,812	3,0125
3388,2	187,48	3393,4	36,907	3,1672
3411,2	201,91	3417,1	29,733	3,3875
3437,1	218,71	3444	23,953	3,641
3465,3	236,45	3473,3	19,297	3,9035
3493,2	254,28	3502,5	15,546	4,1634
3524,9	275,53	3535,7	12,524	4,4697
3556,9	298,37	3569,4	10,089	4,7952
3593,2	323,27	3607,7	8,1285	5,141
3623,2	349,8	3640	6,5484	5,5145
3661,6	380,17	3681,3	5,2755	5,9276
3707	415,5	3730,2	4,25	6,3954
3762,1	454,29	3789,4	3,4239	6,8855
3821,7	498,61	3854,1	2,7583	7,4333
3879,3	546,27	3917,6	2,2221	8,0156
3943,2	599,71	3988,5	1,7902	8,6478
4009,6	658,56	4063,3	1,4422	9,3273
4083,3	724,72	4147,1	1,1619	10,064
4165,3	797,65	4240,9	0,9360473	10,841
4257,1	879,64	4347,1	0,7540957	11,674
4363,9	970,76	4470,5	0,6075124	12,541
4482,7	1072,7	4609,2	0,4894224	13,459
4616,1	1185,5	4765,9	0,394287	14,404
4761,2	1310,5	4938,2	0,3176444	15,389
4919,1	1450,8	5128,6	0,2558997	16,433
5027,5	1551	5261,3	0,2061572	17,146
5083,6	1604,6	5330,8	0,1660838	17,519

DIA 8

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2243,4	264,62	2259	30000	6,7271
2252	244,73	2265,3	24168	6,2023
2261	217,08	2271,4	19470	5,4842
2267,9	174,7	2274,6	15685	4,4049
2277	143,54	2281,5	12636	3,6072
2283,7	118,59	2286,8	10180	2,9726
2291,3	100,99	2293,5	8201,5	2,5238
2296,1	83,287	2297,6	6607,2	2,0774
2302	51,867	2302,6	5322,9	1,2907
2307,4	32,319	2307,6	4288,2	0,8024726
2313,2	16,267	2313,3	3454,6	0,4029224
2320,9	21,991	2321	2783,1	0,5428882
2331,4	29,628	2331,6	2242,1	0,728101
2337,3	33,451	2337,5	1806,3	0,8199758
2342,3	36,988	2342,6	1455,2	0,9047213
2342,3	36,553	2342,6	1172,3	0,8940632
2348,2	40,992	2348,5	944,45	1,0001
2352,6	43,356	2353	760,86	1,0558
2358,2	47,055	2358,7	612,96	1,1431
2361,7	52,44	2362,2	493,81	1,272
2367,8	55,774	2368,4	397,82	1,3493
2374,3	58,975	2375	320,49	1,4229
2390,2	61,393	2390,9	258,19	1,4713
2401,1	64,306	2401,9	208	1,5341
2410,8	67,038	2411,7	167,57	1,5928
2417,1	71,463	2418,2	135	1,6934
2423,9	77,028	2425,1	108,75	1,8201
2435	84,39	2436,5	87,618	1,9849
2445,7	92,358	2447,5	70,586	2,1626
2458,2	100,72	2460,2	56,866	2,3463
2469,8	108,84	2472,2	45,812	2,5233
2480	116,51	2482,8	36,907	2,6897
2494,3	126,6	2497,5	29,733	2,9057
2511	138,52	2514,8	23,953	3,1576
2528	152,02	2532,6	19,297	3,4414
2546	166,61	2551,5	15,546	3,7441
2566,6	183,11	2573,1	12,524	4,0808
2589,4	200,81	2597,2	10,089	4,4344
2614	219,02	2623,2	8,1285	4,7896
2639,3	240	2650,2	6,5484	5,1957
2669,3	263,8	2682,3	5,2755	5,6442

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
2701,7	291,37	2717,4	4,25	6,1554
2736,8	320,82	2755,5	3,4239	6,6862
2775,1	353,01	2797,5	2,7583	7,2495
2816,7	389,19	2843,5	2,2221	7,867
2863,9	428,67	2895,8	1,7902	8,5129
2914,7	472,48	2952,8	1,4422	9,2078
2968,4	522,29	3014	1,1619	9,9791
3027,7	576,52	3082,1	0,9360473	10,78
3093,1	636,84	3157,9	0,7540957	11,634
3172,4	702,98	3249,3	0,6075124	12,494
3261,8	778,07	3353,3	0,4894224	13,416
3361,6	861,46	3470,2	0,394287	14,373
3468,5	954,27	3597,4	0,3176444	15,383
3585,7	1060,1	3739,1	0,2558997	16,47
3719,2	1179,9	3901,8	0,2061572	17,602
3873,9	1286,9	4082,1	0,1660838	18,376
4043,6	1406,7	4281,3	0,1337999	19,183
4229,5	1486,5	4483,1	0,1077915	19,364
4364,6	1517,2	4620,8	0,0868387	19,168
4452,3	1460,8	4685,8	0,0699587	18,165

DIA 11

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
-9,1499	-13,862	16,609	30000	-123,42
6,2026	-15,992	17,153	24168	-68,803
12,608	-12,349	17,648	19470	-44,406
11,608	-13,846	18,068	15685	-50,026
10,543	-15,009	18,342	12636	-54,913
9,0221	-15,819	18,211	10180	-60,303
7,6763	-16,473	18,174	8201,5	-65,016
6,6781	-16,797	18,076	6607,2	-68,319
6,2762	-17,242	18,349	5322,9	-70
6,0388	-17,506	18,519	4288,2	-70,97
5,7451	-17,803	18,707	3454,6	-72,117
5,7206	-17,961	18,85	2783,1	-72,334
5,5238	-18,097	18,921	2242,1	-73,027
5,312	-18,16	18,921	1806,3	-73,696
4,9784	-18,279	18,945	1455,2	-74,766
4,5384	-18,099	18,659	1172,3	-75,924
4,1766	-17,863	18,345	944,45	-76,842
3,9754	-17,76	18,199	760,86	-77,384

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
4,2114	-18,002	18,488	612,96	-76,834
4,3001	-18,334	18,831	493,81	-76,801
4,1646	-18,623	19,083	397,82	-77,396
4,1474	-18,618	19,074	320,49	-77,443
4,4595	-18,518	19,047	258,19	-76,461
4,8306	-18,342	18,968	208	-75,247
4,959	-18,362	19,02	167,57	-74,888
4,9785	-18,443	19,103	135	-74,895
4,6206	-18,225	18,802	108,75	-75,775
4,3184	-18,014	18,524	87,618	-76,52
4,0984	-17,833	18,298	70,586	-77,058
4,368	-17,951	18,475	56,866	-76,326
4,4935	-18,113	18,662	45,812	-76,068
4,516	-18,304	18,853	36,907	-76,142
4,4428	-18,441	18,969	29,733	-76,456
4,5828	-18,505	19,064	23,953	-76,092
4,8525	-18,539	19,164	19,297	-75,334
4,9418	-18,601	19,247	15,546	-75,123
4,9163	-18,756	19,389	12,524	-75,313
4,4493	-18,611	19,135	10,089	-76,556
4,242	-18,342	18,826	8,1285	-76,979
4,0463	-18,197	18,641	6,5484	-77,465
4,1949	-18,261	18,737	5,2755	-77,064
4,3123	-18,57	19,065	4,25	-76,928
4,287	-18,675	19,161	3,4239	-77,073
4,2814	-18,866	19,346	2,7583	-77,215
4,162	-18,913	19,366	2,2221	-77,591
4,1879	-19,067	19,521	1,7902	-77,613
4,2196	-19,145	19,604	1,4422	-77,572
3,7392	-18,969	19,334	1,1619	-78,85
3,2853	-18,764	19,049	0,9360473	-80,07
2,8712	-18,599	18,819	0,7540957	-81,225
2,9272	-18,761	18,988	0,6075124	-81,133
3,1831	-18,837	19,104	0,4894224	-80,41
3,2955	-19,034	19,317	0,394287	-80,178
3,4179	-19,162	19,465	0,3176444	-79,888
3,2433	-19,404	19,673	0,2558997	-80,512
3,1838	-19,481	19,739	0,2061572	-80,719
3,2017	-19,638	19,898	0,1660838	-80,742
3,2182	-19,807	20,067	0,1337999	-80,772
46,416	-10,843	47,666	0,1077915	-13,149
45,003	60,329	75,265	0,0868387	53,279

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
-49,551	89,865	102,62	0,0699587	118,87
-44,644	92,16	102,4	0,0563599	115,84
-40,184	93,559	101,82	0,0454045	113,24
-36,556	94,39	101,22	0,0365787	111,17
-33,612	94,844	100,62	0,0294684	109,51
-31,468	95,137	100,2	0,0237403	108,3
-29,893	95,263	99,843	0,0191256	107,42
-28,591	95,305	99,501	0,0154079	106,7
-27,501	95,285	99,174	0,0124128	106,1
-26,362	95,302	98,881	0,01	105,46

GEOPOLIMERO

DIA 1

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
63344	6666,1	63694	30000	6,0075
63448	6806,2	63812	24168	6,1229
63907	6311,5	64218	19470	5,6404
64554	5305	64772	15685	4,698
65098	4702,2	65268	12636	4,1315
65547	4044,7	65672	10180	3,5311
66004	3416,3	66092	8201,5	2,963
66399	2672,8	66453	6607,2	2,3051
66722	2204,3	66759	5322,9	1,8922
66995	1911	67022	4288,2	1,6339
67246	1613	67265	3454,6	1,3741
67472	1609,7	67491	2783,1	1,3667
67685	1731,1	67707	2242,1	1,4651
67859	1721,1	67881	1806,3	1,4529
68022	1618,5	68041	1455,2	1,3631
68311	1385	68325	1172,3	1,1615
68480	1359	68494	944,45	1,1369
68649	1278,9	68661	760,86	1,0673
68689	1213,3	68700	612,96	1,012
68848	1287,9	68860	493,81	1,0717
68997	1334,5	69009	397,82	1,108
69126	1362,8	69140	320,49	1,1294

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
69364	1311,6	69376	258,19	1,0833
69521	1233,8	69532	208	1,0167
69665	1161,9	69675	167,57	0,9555561
69732	1153,2	69742	135	0,9474762
69808	1158,3	69817	108,75	0,9506226
69948	1152,3	69957	87,618	0,9438225
70071	1167,9	70081	70,586	0,9549677
70099	1158	70108	56,866	0,946446
70232	1187	70242	45,812	0,9683331
70332	1234,7	70343	36,907	1,0057
70627	1324	70639	29,733	1,0739
70778	1395,7	70792	23,953	1,1297
70923	1441,1	70938	19,297	1,164
71056	1520,6	71072	15,546	1,2259
71216	1586,9	71234	12,524	1,2765
71332	1670,3	71352	10,089	1,3414
71473	1760,4	71494	8,1285	1,4109
71776	1942,4	71802	6,5484	1,5502
71994	2090	72024	5,2755	1,6629
72184	2252,3	72219	4,25	1,7872
72265	2397,9	72305	3,4239	1,9005
72455	2639,9	72503	2,7583	2,0867
72671	2924,4	72730	2,2221	2,3045
72876	3236,3	72948	1,7902	2,5427
73133	3620,5	73222	1,4422	2,8342
73378	4039,2	73489	1,1619	3,1508
73573	4564,2	73714	0,9360473	3,5499
73979	5077,6	74153	0,7540957	3,9264
74442	5785,1	74666	0,6075124	4,4438
75020	6623,2	75312	0,4894224	5,0454
75478	7703,6	75870	0,394287	5,8278
76053	8930,6	76575	0,3176444	6,6974
76728	10390	77428	0,2558997	7,7122
77522	12142	78467	0,2061572	8,9022
78573	13513	79726	0,1660838	9,7585
79787	15227	81227	0,1337999	10,805

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
81021	17306	82849	0,1077915	12,057
82304	20551	84831	0,0868387	14,02
83766	24258	87207	0,0699587	16,151
85974	28707	90640	0,0563599	18,464
88482	33975	94781	0,0454045	21,005
90596	37175	97927	0,0365787	22,31
92079	37737	99512	0,0294684	22,286

DIA 2

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
260,53	42,176	263,92	30000	9,1958
261,81	36,75	264,38	24168	7,9906
262,88	30,849	264,68	19470	6,6931
264,1	24,327	265,22	15685	5,2628
264,24	19,876	264,99	12636	4,3018
264,26	16,142	264,76	10180	3,4955
264,4	13,627	264,75	8201,5	2,9506
264,76	11,18	265	6607,2	2,418
261,46	6,5594	261,54	5322,9	1,4371
257,75	3,2076	257,77	4288,2	0,7129956
254,01	0,6707641	254,01	3454,6	0,1512994
254,33	1,8179	254,33	2783,1	0,4095599
254,77	3,1711	254,79	2242,1	0,7131264
255,19	4,1908	255,23	1806,3	0,9408492
255,83	5,1325	255,88	1455,2	1,1493
256,43	6,0553	256,5	1172,3	1,3527
257,18	6,7579	257,27	944,45	1,5052
257,86	7,5173	257,97	760,86	1,6698
258,6	8,3908	258,73	612,96	1,8584
259,47	9,7756	259,66	493,81	2,1576
260,51	11,245	260,76	397,82	2,4717
261,74	12,664	262,04	320,49	2,7701
263,62	14,916	264,04	258,19	3,2384
265,06	16,68	265,59	208	3,6008
266,37	18,598	267,02	167,57	3,9938
268,14	21,117	268,97	135	4,5031
270,15	24,15	271,23	108,75	5,1084
272,97	27,856	274,39	87,618	5,8268
276,06	31,915	277,9	70,586	6,5946
279,61	36,491	281,98	56,866	7,4356

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
283,35	41,273	286,34	45,812	8,2875
287,19	45,919	290,84	36,907	9,0842
292,04	51,959	296,63	29,733	10,088
297,82	59,266	303,66	23,953	11,254
303,8	66,941	311,09	19,297	12,426
310,8	75,597	319,86	15,546	13,67
319,17	85,648	330,47	12,524	15,021
328,41	97,138	342,48	10,089	16,477
338,7	109,94	356,1	8,1285	17,983
349,45	124,39	370,93	6,5484	19,595
362,14	141,38	388,76	5,2755	21,327
375,6	161,52	408,86	4,25	23,27
391,04	184,09	432,21	3,4239	25,211
408,89	211,18	460,21	2,7583	27,316
428,8	241,56	492,16	2,2221	29,395
451,1	277,46	529,59	1,7902	31,595
475,84	318,67	572,69	1,4422	33,811
505,06	368,31	625,09	1,1619	36,101
538,26	425,91	686,39	0,9360473	38,354
576,11	493,14	758,34	0,7540957	40,563
620,2	573,74	844,88	0,6075124	42,772
671,72	669,02	948,05	0,4894224	44,885
730,81	778,65	1067,8	0,394287	46,816
801,53	903,13	1207,5	0,3176444	48,411
886,43	1048,4	1372,9	0,2558997	49,786
988,42	1215,8	1566,9	0,2061572	50,891
1113,7	1403,3	1791,6	0,1660838	51,562
1261,2	1613,3	2047,8	0,1337999	51,984
1448,4	1832,7	2335,9	0,1077915	51,681
1659,9	2082,3	2663	0,0868387	51,442
1901,3	2356,8	3028,1	0,0699587	51,106
2166,6	2704,9	3465,6	0,0563599	51,306
2466	3105,9	3965,9	0,0454045	51,552
2808,8	3579,7	4550,2	0,0365787	51,881
3056,7	3902,5	4957,2	0,0294684	51,93
3210,1	4061,1	5176,6	0,0237403	51,675

DIA 3

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
208,84	31,637	211,22	30000	8,6143
209,12	27,811	210,96	24168	7,5755

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
209,85	23,555	211,17	19470	6,4044
210,62	18,447	211,43	15685	5,0053
211,08	14,872	211,6	12636	4,0304
211,09	12,3	211,44	10180	3,335
211,18	10,481	211,44	8201,5	2,8412
211,34	8,3745	211,51	6607,2	2,2692
208,46	3,8872	208,5	5322,9	1,0683
205,49	0,9202866	205,49	4288,2	0,256602
202,48	-0,9507462	202,48	3454,6	-0,2690313
202,61	0,2845932	202,61	2783,1	0,0804782
202,94	1,7076	202,95	2242,1	0,4821186
203,33	2,7787	203,35	1806,3	0,7829549
203,71	3,8948	203,75	1455,2	1,0953
204,13	4,8144	204,18	1172,3	1,3511
204,73	5,6499	204,81	944,45	1,5807
205,5	6,3194	205,6	760,86	1,7613
206,19	7,1462	206,32	612,96	1,9849
206,95	8,3451	207,12	493,81	2,3091
207,9	9,6224	208,13	397,82	2,6499
209	11,019	209,29	320,49	3,0181
210,73	13,032	211,13	258,19	3,539
211,98	14,67	212,49	208	3,959
213,25	16,237	213,87	167,57	4,3543
214,83	18,334	215,61	135	4,878
216,69	20,877	217,69	108,75	5,5031
219,18	23,986	220,49	87,618	6,2454
221,95	27,369	223,63	70,586	7,0297
225,16	31,192	227,31	56,866	7,8873
228,45	35,125	231,13	45,812	8,7413
231,82	38,871	235,06	36,907	9,5185
236,05	43,653	240,05	29,733	10,477
241,13	49,512	246,16	23,953	11,603
246,32	55,591	252,51	19,297	12,718
252,27	62,383	259,86	15,546	13,89
259,21	70,066	268,51	12,524	15,126
266,77	78,815	278,17	10,089	16,459
275,01	88,526	288,91	8,1285	17,843
283,54	99,433	300,47	6,5484	19,324
293,7	112,26	314,43	5,2755	20,919
305,09	127,32	330,59	4,25	22,652
317,64	144,29	348,88	3,4239	24,431
331,85	164,47	370,38	2,7583	26,363

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
347,16	187,34	394,48	2,2221	28,354
364,35	214,38	422,74	1,7902	30,473
383,29	245,83	455,35	1,4422	32,675
404,74	284,07	494,48	1,1619	35,063
428,86	328,88	540,45	0,9360473	37,484
455,67	381,84	594,5	0,7540957	39,962
487,09	446,13	660,53	0,6075124	42,487
523,81	523,57	740,61	0,4894224	44,988
566,58	614,68	835,97	0,394287	47,332
617,58	720,64	949,07	0,3176444	49,404
679,53	845,89	1085	0,2558997	51,225
754,99	992,86	1247,3	0,2061572	52,751
852,63	1158,5	1438,5	0,1660838	53,65
970,3	1347,8	1660,7	0,1337999	54,25
1128,7	1546,6	1914,7	0,1077915	53,878
1311,5	1775,1	2207,1	0,0868387	53,542
1526,3	2025,4	2536,2	0,0699587	53
1762,2	2341,7	2930,7	0,0563599	53,038
1943,8	2558,2	3213	0,0454045	52,772
2065,8	2666,2	3372,9	0,0365787	52,232

DIA 4

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
234,05	36,412	236,87	30000	8,8426
234,98	32,475	237,22	24168	7,8685
236,06	27,481	237,66	19470	6,6402
237,16	21,458	238,13	15685	5,1701
237,63	17,404	238,27	12636	4,1889
237,72	14,317	238,15	10180	3,4466
237,9	12,066	238,21	8201,5	2,9034
238,12	9,5996	238,32	6607,2	2,3085
235,01	5,0822	235,06	5322,9	1,2388
231,63	2,1487	231,64	4288,2	0,5315004
228,17	0,074095	228,17	3454,6	0,018606
228,39	1,3758	228,4	2783,1	0,3451405
228,78	2,7264	228,79	2242,1	0,6827873
229,25	3,7103	229,28	1806,3	0,9272404
229,68	4,698	229,72	1455,2	1,1718
230,18	5,6092	230,25	1172,3	1,3959
230,89	6,4003	230,97	944,45	1,5878
231,77	7,0092	231,88	760,86	1,7321

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
232,53	7,8194	232,66	612,96	1,9259
233,38	9,0201	233,56	493,81	2,2133
234,35	10,445	234,58	397,82	2,5522
235,58	11,789	235,88	320,49	2,8648
237,39	13,872	237,79	258,19	3,3445
238,7	15,497	239,21	208	3,7146
239,96	17,164	240,57	167,57	4,0916
241,68	19,443	242,46	135	4,5995
243,65	22,204	244,66	108,75	5,207
246,36	25,523	247,68	87,618	5,9147
249,32	29,156	251,01	70,586	6,6701
252,76	33,197	254,93	56,866	7,4824
256,2	37,462	258,93	45,812	8,319
259,72	41,477	263,02	36,907	9,0733
264,26	46,655	268,34	29,733	10,012
269,77	52,935	274,92	23,953	11,101
275,43	59,417	281,77	19,297	12,173
281,76	66,569	289,52	15,546	13,292
289,14	74,851	298,67	12,524	14,514
297,25	84,292	308,97	10,089	15,832
306,54	94,791	320,86	8,1285	17,183
316,43	106,43	333,86	6,5484	18,591
328,02	120,15	349,33	5,2755	20,117
340,47	136,23	366,71	4,25	21,808
354,03	154,08	386,1	3,4239	23,52
369,19	175,3	408,7	2,7583	25,399
385,83	199,21	434,23	2,2221	27,308
404,3	227,53	463,93	1,7902	29,37
424,54	260,23	497,95	1,4422	31,507
447,74	300,25	539,09	1,1619	33,846
473,96	347,22	587,54	0,9360473	36,227
503,36	402,34	644,4	0,7540957	38,636
537,45	468,72	713,13	0,6075124	41,093
577,05	548,55	796,18	0,4894224	43,55
622,94	642,62	894,99	0,394287	45,891
677,11	751,29	1011,4	0,3176444	47,973
714,22	829,94	1094,9	0,2558997	49,286
734,71	872,88	1140,9	0,2061572	49,913

DIA 8

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
---------------------------	----------------------------	----------------------------------	----------------	-----------

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
198,63	29,632	200,82	30000	8,4851
198,69	26,55	200,45	24168	7,6113
199,35	22,701	200,63	19470	6,4966
200,29	17,647	201,06	15685	5,0354
200,85	14,248	201,35	12636	4,0578
200,97	11,64	201,3	10180	3,3151
201,19	9,9728	201,44	8201,5	2,8377
201,33	7,8814	201,48	6607,2	2,2417
198,65	3,6673	198,69	5322,9	1,0576
195,76	1,0062	195,76	4288,2	0,2945021
192,96	-0,7262975	192,96	3454,6	-0,2156558
193,16	0,6233718	193,16	2783,1	0,184908
193,48	1,8335	193,48	2242,1	0,5429803
193,85	2,9081	193,87	1806,3	0,8595052
194,24	3,8932	194,28	1455,2	1,1482
194,8	4,7558	194,86	1172,3	1,3985
195,45	5,3823	195,53	944,45	1,5773
196,22	6,0025	196,31	760,86	1,7521
196,89	6,7781	197,01	612,96	1,9716
197,54	8,0441	197,7	493,81	2,3318
198,38	9,3058	198,59	397,82	2,6857
199,39	10,581	199,67	320,49	3,0378
201,09	12,378	201,47	258,19	3,5224
202,4	13,772	202,87	208	3,8927
203,62	15,211	204,19	167,57	4,2721
205,15	17,118	205,86	135	4,7698
206,94	19,444	207,85	108,75	5,3678
209,04	22,343	210,23	87,618	6,1011
211,67	25,435	213,2	70,586	6,8519
214,62	28,98	216,57	56,866	7,6901
217,96	32,53	220,37	45,812	8,4888
221,13	35,906	224,03	36,907	9,2229
225,09	40,252	228,66	29,733	10,138
229,88	45,538	234,35	23,953	11,204
234,7	51,034	240,19	19,297	12,267
240,24	57,103	246,93	15,546	13,371
246,64	63,958	254,8	12,524	14,537
253,69	71,691	263,62	10,089	15,78
261,37	80,148	273,39	8,1285	17,047
269,45	89,803	284,02	6,5484	18,432
278,59	100,72	296,24	5,2755	19,878
288,55	113,53	310,08	4,25	21,477

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
299,38	127,59	325,44	3,4239	23,083
311,84	144,86	343,85	2,7583	24,918
325,21	164,48	364,44	2,2221	26,83
340,04	187,76	388,44	1,7902	28,906
356,07	214,92	415,91	1,4422	31,115
374,31	248,23	449,14	1,1619	33,551
394,43	287,42	488,04	0,9360473	36,081
416,76	333,8	533,96	0,7540957	38,693
442,64	390,29	590,13	0,6075124	41,404
472,5	458,76	658,57	0,4894224	44,155
506,89	539,98	740,62	0,394287	46,811
547,48	634,6	838,12	0,3176444	49,216
597,13	747,86	957,01	0,2558997	51,395
656,78	880,61	1098,5	0,2061572	53,284
736,07	1029,7	1265,7	0,1660838	54,443
831,91	1201,2	1461,2	0,1337999	55,297
962,87	1382,8	1685	0,1077915	55,152
1111,4	1598,1	1946,6	0,0868387	55,185
1286,7	1837,8	2243,4	0,0699587	55,003
1413,5	2010,4	2457,6	0,0563599	54,889
1503,9	2083,5	2569,6	0,0454045	54,179

DIA 11

Z' (ohm.cm ²)	Z" (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
204,48	29,571	206,61	30000	8,2288
204,69	26,917	206,45	24168	7,4914
205,2	23,078	206,49	19470	6,4169
205,88	18,078	206,67	15685	5,0183
206,33	14,468	206,84	12636	4,0109
206,6	12,006	206,94	10180	3,326
206,78	10,257	207,03	8201,5	2,8398
206,95	8,3172	207,11	6607,2	2,3015
204,16	4,091	204,2	5322,9	1,1479
201,28	1,2422	201,29	4288,2	0,3536133
198,32	-0,6855487	198,32	3454,6	-0,1980545
198,54	0,5795105	198,54	2783,1	0,1672364
198,84	2,0257	198,86	2242,1	0,5836727
199,31	3,2278	199,34	1806,3	0,9278341
199,69	4,2257	199,74	1455,2	1,2122
200,15	5,1021	200,22	1172,3	1,4602
200,84	5,8208	200,92	944,45	1,6601

Z' (ohm.cm ²)	Z'' (ohm.cm ²)	Impedance (ohm.cm ²)	Frequency (Hz)	Theta (°)
201,61	6,4725	201,72	760,86	1,8387
202,37	7,2821	202,5	612,96	2,0608
203,15	8,4647	203,32	493,81	2,386
204,09	9,793	204,33	397,82	2,747
205,28	11,058	205,58	320,49	3,0836
206,98	12,922	207,39	258,19	3,5723
208,36	14,347	208,86	208	3,9389
209,54	15,784	210,13	167,57	4,3078
211,16	17,788	211,91	135	4,8154
212,88	20,246	213,84	108,75	5,4327
215,37	23,242	216,62	87,618	6,1596
218,08	26,439	219,68	70,586	6,9126
221,22	30,08	223,26	56,866	7,7433
224,42	33,748	226,95	45,812	8,5519
227,63	37,25	230,66	36,907	9,2939
231,69	41,738	235,42	29,733	10,212
236,67	47,205	241,33	23,953	11,279
241,77	52,834	247,47	19,297	12,327
247,65	59,098	254,61	15,546	13,421
254,38	66,108	262,83	12,524	14,568
261,73	73,973	271,99	10,089	15,781
269,71	82,509	282,05	8,1285	17,01
277,91	92,03	292,75	6,5484	18,322
287,49	103,24	305,47	5,2755	19,753
297,93	116,22	319,8	4,25	21,31
309,53	130,78	336,03	3,4239	22,905
322,48	148,16	354,89	2,7583	24,676
336,13	168	375,78	2,2221	26,556
351,02	191,49	399,86	1,7902	28,614
367,15	218,76	427,39	1,4422	30,788
385,64	252,18	460,77	1,1619	33,182
406,08	291,69	499,99	0,9360473	35,69
428,58	338,32	546,02	0,7540957	38,288
454,43	395,09	602,17	0,6075124	41,005
484,01	463,82	670,37	0,4894224	43,78
517,95	545,99	752,58	0,394287	46,51
557,59	641,44	849,92	0,3176444	49,001
605,86	755,94	968,77	0,2558997	51,289
663,92	890,68	1110,9	0,2061572	53,3
742,13	1042,7	1279,8	0,1660838	54,56
810,5	1141,7	1400,2	0,1337999	54,632
868,5	1180,3	1465,4	0,1077915	53,655

