

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Estudio de la degradación y corrosión de estructuras de cemento en zonas de playas del litoral ecuatoriano y diseño de sus posibles soluciones

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Diana Solange Saltos Escobar

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

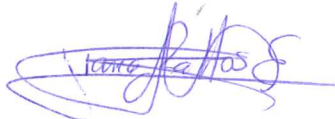
El presente proyecto lo dedico a mis padres Víctor Hugo Saltos Miranda y Dora Narcisa Escobar Villagrán por su esfuerzo para cubrir las necesidades durante mis años de estudio, por afrontar las dificultades con valor y porque siempre procuraron darme lo mejor de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, le agradezco a Dios porque ha sido mi piedra angular. A mi tutor Dr. Mauricio Cornejo y co-tutor Dr. Haci Baykara por su valiosa dirección durante la ejecución del presente proyecto. Al Máster Julio Cáceres porque siempre estuvo presto para darme su apoyo cuando lo necesitaba, Al Ing David Falkes, y al Ing. Washington Pincay por su paciencia al permitirme trabajar en sus laboratorios. A todos los que conforman el Laboratorio de Ensayos Metrológicos y Materiales (LEMAT)

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Diana Solange Saltos Escobar* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



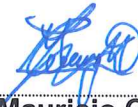
Diana Saltos Escobar

EVALUADORES



MSc. Miriam Checa

PROFESOR DE LA MATERIA



PhD. Mauricio Cornejo

PROFESOR TUTOR



PhD. Haci Baykara

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

El cemento ordinario Portland es un material sumamente utilizado a nivel mundial en cualquier circunstancia en el área de la construcción, sin embargo, el comportamiento de este varía dependiendo de las condiciones ambientales. En un ambiente con altas concentraciones de sales como lo es al nivel de mar, la durabilidad del cemento no es la misma. Aun sabiendo esto, las compañías se atreven a construir con este material. El presente trabajo propone la utilización de otro material que resista dichas condiciones extremas, como lo es un geopolímero. Se elaboraron por triplicado muestras de hormigón de cemento según lo indicado en la normativa; y de geopolímero con base de zeolita, activada con una mezcla de silicato de sodio y una solución concentrada de hidróxido de sodio con un tiempo de curado de 28 días; y se las sometieron a las mismas condiciones salinas aplicando sobre ellas un voltaje, con la finalidad de incentivar la corrosión. Con el fin de evaluar su progreso, se monitoreo el cambio en la intensidad de corriente durante el tiempo hasta que la capa del material se rompa. Además de esto, se evaluó la influencia de aditivos como un inhibidor de corrosión, siendo el mismo para ambos materiales. Otro ensayo iniciado fue el de resistencia a diferentes ambientes acuosos. También, se realizó una caracterización de la materia prima y del producto final mediante técnicas analíticas instrumentales como ensayo de compresión, QXRD, SEM-EDS, TGA-DSC y FTIR para observar el cambio en la composición, estructura y propiedades entre ellas y poder justificar su comportamiento. Los resultados demostraron que el geopolímero posee una mejor resistencia al ambiente salino ya que durante el tiempo que duró el ensayo presentado aquí, estas muestras no se rompieron, lo que sí ocurrió con las muestras de cemento. con respecto a los ensayos de compresión, el geopolímero presentó una mayor resistencia a la compresión debido a que las muestras de cemento perdieron mucha agua durante el tiempo de curado lo que no perjudico a que la reacción de solidificación no tenga lugar en su totalidad. La presencia del inhibidor no favorece a la compresión en el caso del geopolímero, pero si favorece cuando se trata de cemento. las muestras de cemento presentan una mayor carbonatación debido a su alto contenido de calcio, esto implica una mayor carbonatación, lo que las debilita con el tiempo. El geopolímero presenta una baja amorfización debido a las impurezas contenidas en la zeolita que disminuyen el rendimiento de dicha reacción. Estos resultados fueron revelados por la caracterización del material.

ABSTRACT

Portland's ordinary cement is an extremely widely used material worldwide in any circumstance in the construction area, however, the behavior of this varies depending on the environmental conditions. In an environment with high concentrations of salts such as sea level, the durability of cement is not the same. Even knowing this, companies dare to build with this material. This paper proposes the use of other material that resists these extreme conditions, as is a geopolymer. Cement concrete samples were produced in triplicate as indicated in the regulations; And of Zeolite-based Geopolymer, activated with a mixture of sodium silicate and a concentrated solution of sodium hydroxide with a curing time of 28 days; And they were subjected to the same saline conditions applying on them a voltage, with the purpose of stimulating the corrosion. To evaluate their progress, the change in current intensity is monitored during the time until the material layer is broken. In addition to this, the influence of additives was evaluated as a corrosion inhibitor, being the same for both materials. Another trial started was the resistance to different aqueous environments In addition, a characterization of the raw material and the final product was carried out using instrumental analytical techniques such as compression test, QXRD, SEM-EDS, TGA-DSC and FTIR to observe the change in composition, structure and properties between them and can justify their behavior. The results showed that the geopolymer has a better resistance to the saline environment because during the duration of the trial presented here, these samples did not break, which did occur with the samples of cement. With respect to the compression tests, the Geopolymer showed a greater resistance to the compression because the samples of cement lost a lot of water during the curing time which does not harm to that the solidification reaction does not take place in its totality. The presence of the inhibitor does not favor compression in the case of the geopolymer, but it favors when it comes to cement. The cement samples have a higher carbonation due to their high calcium content, this implies greater carbonation, which weakens them over time. The Geopolymer presents a low amorphisation due to the impurities contained in the zeolite that decrease the performance of this reaction. These results were revealed by the characterization of the material.

Keywords: cement, geopolymer, zeolite, durability, corrosion

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| EVALUADORES | IV |
| RESUMEN..... | V |
| ABSTRACT..... | VII |
| ÍNDICE GENERAL..... | VIII |
| ABREVIATURAS | XI |
| SIMBOLOGÍA..... | XII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XVI |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 1 |
| 1.2 Justificación del problema | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.4 Marco teórico | 4 |
| 1.4.1 Cemento ordinario Portland | 4 |
| 1.4.2 Corrosión..... | 6 |
| 1.4.3 Durabilidad | 11 |
| 1.4.4 Inhibidores..... | 14 |
| 1.4.5 Geopolímero | 15 |
| CAPÍTULO 2..... | 20 |
| 2. Metodología..... | 20 |
| 2.1 Diseño experimental..... | 20 |
| 2.2 Materia prima | 21 |
| 2.2.1 Especificación..... | 21 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 2.2.2 | Pretratamiento | 21 |
| 2.3 | Síntesis | 22 |
| 2.3.1 | Dosificación | 22 |
| 2.3.2 | Preparación de muestras | 23 |
| 2.4 | Ensayos | 23 |
| 2.4.1 | Corrosión acelerada..... | 23 |
| 2.4.2 | Ensayo de resistencia al agua de mar y agua acidificada | 24 |
| 2.5 | Caracterización | 24 |
| 2.5.1 | Prueba de resistencia a la compresión | 24 |
| 2.5.2 | Difracción cuantitativa de rayos X (QXRD) | 24 |
| 2.5.3 | Escaneo por microscopio electrónico y espectrometría de energía dispersa (SEM) 25 | 25 |
| 2.5.4 | Análisis termogravimétrico y escaneo por diferencia calorimétrica (TGA-DSC) 25 | 25 |
| 2.5.5 | Espectrofotometría infrarroja de la transformada de Fourier (FTIR) | 25 |
| CAPÍTULO 3..... | | 27 |
| 3. | Resultados Y ANÁLISIS | 27 |
| 3.1 | Caracterización mineralógica de la zeolita por SEM, TGA-DSC, FTIR Y QXRD 27 | 27 |
| 3.2 | Ensayo de corrosión acelerada | 30 |
| 3.2.1 | Resultados para muestra de geopolímero | 30 |
| 3.2.2 | Resultados para muestra de cemento | 31 |
| 3.3 | Propiedades mecánicas | 33 |
| 3.3.1 | Ensayo de compresión para muestra de geopolímero | 33 |
| 3.3.2 | Ensayo de compresión para muestra de cemento | 34 |
| 3.4 | Resistencia al agua de mar y agua acidificada..... | 34 |
| 3.5 | Caracterización mediante instrumentos analíticos de muestras de geopolímero y cemento con y sin inhibidor | 35 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| 3.5.1 | Difractometría de rayos X cuantitativa (QXRD) | 35 |
| 3.5.2 | Microscopia óptica de barrido (SEM) | 36 |
| 3.5.3 | Análisis termogravimétrico y cartometría diferencial de barrido (TGA-DSC) 37 | |
| 3.5.4 | Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) | 40 |
| CAPÍTULO 4 | | 42 |
| 4. | Conclusiones Y RECOMENDACIONES | 42 |
| | Conclusiones | 42 |
| | Recomendaciones | 43 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 45 |
| 5. | Bibliografía | 45 |
| ANEXOS | | 48 |
| A. | ANEXO compresión | 49 |
| B. | ANEXO preparación | 50 |
| C. | ANEXO corrosión | 52 |
| D. | ANEXO corrosion | 57 |
| E. | ANEXO corrosión | 60 |
| F. | ANEXO sem-eds | 63 |
| G. | ANEXOS qxrd | 67 |
| H. | ANEXOS tga-dsc..... | 69 |
| I. | ANEXOS ftir | 72 |
| J. | ANEXOS resistencia ambiental | 73 |

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

Rpm Revoluciones por minuto

OPC Cemento Ordinario Portland

FTIR Espectrofotometría infrarroja de la transformada de Fourier

TGA Análisis termogravimétrico

DSC Escaneo por diferencia calorimétrica

QXRD Difracción cuantitativa de rayos X

SEM Escaneo por microscopio electrónico

EDS Espectrometría de energía dispersa

SIMBOLOGÍA

| | |
|--------------------|---------------------|
| g | Gramo |
| mm | milímetro |
| cm | centímetro |
| kN | Kilonewton |
| h | hora |
| min | minutos |
| μL | Microlitros |
| ml | mililitros |
| cm^3 | centímetros cúbicos |
| V | Voltio |
| Fe | Hierro |
| Cl | Cloro |
| H | Hidrógeno |
| O | Oxígeno |
| C | Carbono |
| Ca | Calcio |
| S | Azufre |
| N | Nitrógeno |
| Si | Silicio |
| Al | Aluminio |
| Na^+ | Radical Sodio |
| K^+ | Radical Potasio |
| Li^+ | Radical Litio |
| Ag^+ | Radical Plata |
| NH_4^+ | Radical Amonio |
| Ba^{2+} | Radical Bario |
| e | Electrón |
| $^{\circ}\text{C}$ | Centígrado |
| Pa | Pascal |
| MPa | MegaPascal |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|--------------------------------------|
| Ilustración 1.1 Mapa Iberoamericano con los puntos donde se ubicaron las probetas (Chico, De la Fuente, Simancas, & Morcillo) | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 1.2 Relación concentración de SO ₂ vs concentración Cl ⁻ para las probetas (Chico, De la Fuente, Simancas, & Morcillo) | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ilustración 1.3 Simulación de un circuito en una estructura de acero (Frankel, 2016) | 7 |
| Ilustración 1.4 Diagrama de Evans | 8 |
| Ilustración 1.5 Corrosión por carbonatación | 9 |
| Ilustración 1.6 Corrosión por acción de cloruros | 9 |
| Ilustración 1.7 Diagrama de polarización para sistemas pasivos (Frankel, 2016) | 10 |
| Ilustración 1.8 Mecanismo de acción de inhibidor orgánico | 15 |
| Ilustración 1.9 Materia prima y activador formador de geopolímero | 17 |
| Ilustración 1.10 Mecanismo de reacción del geopolímero (Venkatesan, 2016) | 18 |
| Ilustración 1.11 modelo conceptual de la geopolimerización | 19 |
| Ilustración 2.1 Tamaño de partícula inicial de zeolita | 22 |
| Ilustración 2.2 Esquema de ensayo de corrosión acelerada | 24 |
| Ilustración 3.1 Análisis SEM-EDS de zeolita | 27 |
| Ilustración 3.2 Análisis QXRD de zeolita | 28 |
| Ilustración 3.3 Análisis FTIR de zeolita | 28 |
| Ilustración 3.4 Análisis TGA-DSC de zeolita | 29 |
| Ilustración 3.5 Esquema en paralelo del ensayo de corrosión para muestras de cemento (izq) y geopolímero (der) | 30 |
| Ilustración 3.6 Ensayo de corrosión acelerada para los morteros de geopolímero | 31 |
| Ilustración 3.7 Ensayo de corrosión acelerada para los morteros de cemento | 32 |
| Ilustración 3.8 Grafica de barras de resultados de compresión | 33 |
| Ilustración 3.9 Caracterización EDS de la muestra de geopolímero a) sin inhibidor b) con inhibidor | 37 |
| Ilustración 3.10 Caracterización EDS de la muestra de cemento a) sin inhibidor b) con inhibidor | 37 |
| Ilustración 3.11 Termogramas sobrepuestos de las muestras de zeolita, geopolímero con y sin inhibidor: a) TGA, b) DSC | 39 |
| Ilustración 3.12 Termogramas sobrepuestos de las muestras de cemento con y sin inhibidor: a) TGA, b) DSC | 40 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 3.13 Análisis FTIR de la zeolita y del geopolímero | 41 |
| Ilustración 3.14 Análisis FTIR del cemento..... | 41 |
| Ilustración B.1 Molienda de zeolita | 50 |
| Ilustración B.2 Preparación del activador | 50 |
| Ilustración B.3 Preparación del geopolímero | 50 |
| Ilustración B.4 Colocación de mezcla de geopolímero en moldes para su posterior curado | 51 |
| Ilustración C.1 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada-muestra 1 | 52 |
| Ilustración C.2 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 2..... | 52 |
| Ilustración C.3 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 3..... | 53 |
| Ilustración C.4 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1 | 53 |
| Ilustración C.5 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2 | 54 |
| Ilustración C.6 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 3..... | 55 |
| Ilustración C.7 Vista del sistema de corrosión acelerada para las muestras de geopolímero | 55 |
| Ilustración C.8 Toma de amperaje por cada cilindro..... | 56 |
| Ilustración D.1 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1 | 57 |
| Ilustración D.2 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2 | 57 |
| Ilustración D.3 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 3 | 58 |
| Ilustración D.4 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1 | 58 |
| Ilustración D.5 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2 | 59 |
| Ilustración D.6 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 3 | 59 |

| | |
|--|----|
| Ilustración E.1 Manifestación del producto de la corrosión por los espacios entre la mezcla de concreto y la varilla en muestra de cemento con inhibidor a los 20 días | 60 |
| Ilustración E.2 Muestra de mortero de cemento sin inhibidor con rompimiento a los 27 días -replica 1..... | 60 |
| Ilustración E.3 Muestra de mortero de cemento sin inhibidor con rompimiento a los 27 días- replica 2..... | 61 |
| Ilustración E.4 Ensayo de corrosión acelerada para cemento al mes del inicio | 61 |
| Ilustración E.5 Ensayo de corrosión acelerada para geopolímero al mes del inicio | 62 |
| Ilustración F.1 SEM de zeolita | 63 |
| Ilustración F.2 SEM de mortero de geopolímero sin inhibidor..... | 63 |
| Ilustración F.3 SEM de mortero de geopolímero con inhibidor | 64 |
| Ilustración F.4 SEM de mortero de cemento sin inhibidor..... | 64 |
| Ilustración F.5 SEM de mortero de cemento con inhibidor | 65 |
| Ilustración F.6 EDS de zeolita | 65 |
| Ilustración F.7 EDS de mortero de geopolímero sin inhibidor | 65 |
| Ilustración F.8 EDS de mortero de geopolímero con inhibidor..... | 66 |
| Ilustración G.1 QXRD de zeolita..... | 67 |
| Ilustración G.2 QXRD de mortero de geopolímero sin inhibidor | 67 |
| Ilustración G.3 QXRD de mortero de geopolímero sin inhibidor | 68 |
| Ilustración G.4 QXRD de mortero de cemento | 68 |
| Ilustración H.1 TGA-DSC de zeolita | 69 |
| Ilustración H.2 TGA-DSC del mortero de geopolímero sin inhibidor | 69 |
| Ilustración H.3 TGA-DSC del mortero de geopolímero con inhibidor | 70 |
| Ilustración H.4 TGA-DSC del mortero de cemento sin inhibidor | 70 |
| Ilustración H.5 TGA-DSC del mortero de cemento con inhibidor | 71 |
| Ilustración I.1 FTIR de zeolita..... | 72 |
| Ilustración I.2 FTIR del mortero de geopolímero sin inhibidor..... | 72 |
| Ilustración I.3 FTIR del mortero de geopolímero con inhibidor..... | 72 |
| Ilustración J.1 Ensayo de resistencia inicial a los diferentes ambientes: agua de mar, Ácido clorhídrico 3%, Ácido sulfúrico 3% respectivamente..... | 73 |
| Ilustración J.2 Ensayo de resistencia a los diferentes ambientes con avance de un mes: Ácido clorhídrico 3%, Ácido sulfúrico 3% respectivamente..... | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.4 Contenido máximo de iones Cl ⁻ para la protección contra la corrosión del refuerzo (318)..... | 5 |
| Tabla 1.5 Requisitos para condiciones de exposición especiales (318) | 5 |
| Tabla 1.6 Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del Concreto Estructural. | 11 |
| Tabla 1.7 Categorías y clases de exposición según ACI 318-14 (Alla, 2016) | 12 |
| Tabla 1.8 Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo según EHE-08. (Muñoz & Mnedoza, 2012) | 13 |
| Tabla 2.1 Diseño de mezcla óptimo para un esfuerzo máximo de 15.28 MPa sin inhibidor y 14.66 MPa con inhibidor | 21 |
| Tabla 2.2 Condiciones ambientales de curado | 21 |
| Tabla 2.3 Dosificación para morteros de geopolímero por unidad (Ulloa, 2018)..... | 22 |
| Tabla 2.4 Dosificación para morteros de OPC por unidad (ASTM C-109, 2008) | 22 |
| Tabla 3.1 Pesos iniciales de muestras de geopolímero..... | 34 |
| Tabla 3.2 Pesos iniciales de muestras de cemento | 34 |
| Tabla A.1 Compresión mecánica de muestras de geopolímero sin inhibidor | 49 |
| Tabla A.2 Compresión mecánica de muestras de geopolímero con inhibidor..... | 49 |
| Tabla A.3 Compresión mecánica de muestras de cemento sin inhibidor | 49 |
| Tabla A.4 Compresión mecánica de muestras de cemento con inhibidor | 49 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigua Grecia hasta hoy en día, el cemento ha sido el material pionero a la hora de construir, no existe edificio, casa, puente o cualquier estructura en la que el cemento no haya desempeñado una tarea. Las construcciones más antiguas alrededor del mundo y que aún se mantienen en pie son una muestra palpable de las excelentes propiedades mecánicas del cemento. Tal es su reconocimiento que se lo utiliza en todo ámbito, pero lamentablemente como todo material tiene su límite y, refiriéndonos a un material tan implementado como este, dicho límite no puede pasar desapercibido. Desde el foco de la ingeniería de la construcción, todos los materiales tienen una norma, en la que se especifica las condiciones fronteras idóneas de implementación. En el supuesto de que estas fronteras sean atravesadas, cuál sería el comportamiento del cemento y las consecuencias que sufriría la estructura; y en el caso de ser negativa, es necesario encontrar una solución. En el presente proyecto se detalla el desempeño del cemento según las condiciones ambientales en las que se encuentra, sus cambios en propiedades físicas y químicas; y una posible solución de ser necesaria.

1.1 Descripción del problema

El cemento Portland es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo, con una amplia gama de aplicaciones en el área de construcción y modalidades con características de alto nivel. Cientos de estructuras arquitectónicas monumentales han sido levantadas con este material y que, hasta el día de hoy dan testimonio de la durabilidad del cemento. La mayoría de las edificaciones en el país presentan muy buena resistencia en condiciones normales de meteorología y geofísica, pero dichas condiciones varían drásticamente en cada región. Las grandes ciudades del país construyen y diseñan realizando un profundo análisis de ingeniería; pero en los sectores más vulnerables económica y ambientalmente, las construcciones son informales, hechas sin supervisión, sin planos, sin personal debidamente capacitado, con materiales y procedimientos inadecuados, sin una visualización a futuro de las peores situaciones con las que se enfrenta la estructura.

Durante el sismo de 7.8 en la escala de Richter que sucedió en Pedernales (Manabí) el 16 de abril del 2016, tuvo en total 1,125 edificaciones colapsadas. Las razones fueron muchas y que conjuntamente aportaron en cierta medida al derrumbe. La mala construcción, como mal armado de estructura de hierro, construcciones que no cumplieron con requerimientos municipales como la sismo resistencia, la empericidad a la hora de cimentar. En una entrevista realizada por un reconocido diario del país a diferentes profesionales del área, entre ellos el Arq. Fernando Almeida menciona que muchas edificaciones fueron levantadas por etapas con los ingresos periódicos de las familias, lo que afecta en la homogeneidad de los materiales y su resistencia; el ingeniero-arquitecto Aldo Echeverría acota que es muy cuestionable la calidad de los materiales que utilizan. Además, en las zonas costeras, utilizan agua con sales minerales y arena de mar. En la misma entrevista, el Arq. Mario Vásconez resume a estos errores constructivos en dos grupos: de diseño y estructural sin ningún tipo de estudio de suelos. (Vizuete, 2016)

Por otro lado, Calor Bernal, del comité de reconstrucción dijo que alrededor de mil técnicos, entre arquitectos e ingenieros que recibieron capacitaciones en Guayaquil, Manta y Quito, se ofrecieron como voluntarios para analizar muestras tomadas de 96 edificaciones colapsadas de las ciudades de Manta, Portoviejo, Bahía, San Vicente, Canoa y Pedernales durante dicho terremoto. Alejandro Irigoyen, uno de los expertos, revela que la investigación arrojó como resultado el hecho de que las estructuras estaban cimentadas en un suelo lastimado por corrientes de mar lo que debilitó las estructuras. (Diario Expreso, 2016)

Después de lo sucedido, se ejercen controles más estrictos a las nuevas construcciones con la finalidad de que cumplan las normativas de construcción y especificaciones. Lo que se busca es que estos declives ya no vuelvan a suceder, pero existe un factor importante que no se puede cambiar y cuya presencia es permanente en esas zonas costeras: la salinidad. Como explica Guillermo Irigoyen (Diario Expreso, 2016), los materiales comúnmente usados y disponibles en el mercado tienen un comportamiento peligroso en zonas de alta salinidad debido a que incide en el aumento de corrosión del hierro, además de que el hormigón no responde con una adecuada compactación.

La gran incognita que tienen muchos profesionales en el campo es que sucedería con el tiempo de vida de servicio de estos materiales en un ambiente con estas condiciones extremas, a pesar de que se cumpla con todos los requisitos establecidos por la ley.

1.2 Justificación del problema

En el país se han realizado investigaciones de las razones por colapso temprano de construcciones cercanas a las zonas costeras, como el Estudio de agresividad atmosférica en el puente de Caras, Manabí (Guerra, Castañeda, & Howland, 2016), pero no se ha investigado las posibles soluciones que se le pueda dar a una problemática como esta. Por lo cual se ha propuesto aplicar la ingeniería con el fin de aportar conocimientos e ideas para un bien común. Este proyecto se realiza tomando en cuenta la necesidad de resolver un problema que repercute en la seguridad, economía y bienestar de familias enteras que pertenecen a toda una comunidad de nuestro país. La durabilidad de estructuras de cemento y, por ende, la estabilidad de los edificios en estos sectores estará siempre amenazada por fenómenos tales como la corrosión, aunque se haya construido bajo todas las normas que la ley exige. Es un hecho que la investigación se va a enfocar en una comunidad en específica donde las condiciones ambientales sean críticas, pero esto no elimina la posibilidad de que este estudio sirva para todas las localidades de la región que estén cercanas al mar; por lo tanto, con esta investigación damos a conocer a los colegas profesionales en el campo de la construcción las posibles soluciones para su aplicabilidad dentro de los parámetros que se establecerán durante el proyecto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento del cemento frente a otros materiales de construcción sometidos en las mismas condiciones ambientales y de infraestructura con la finalidad de seleccionar el mejor diseño dentro de los parámetros establecidos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Preparar las muestras de mortero usando cemento y geopolímero; con y sin inhibidores de corrosión
2. Exponer a las muestras en diferentes ambientes extremos con el objetivo de simular sus condiciones de servicio

3. Emplear diferentes técnicas de caracterización de materiales para los ensayos que involucren resistencia química con la finalidad de monitorear el avance destructivo.
4. Recolectar los datos obtenidos de los análisis hechos para exponer gráficamente su progreso a través del tiempo.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Cemento ordinario Portland

El cemento ordinario Portland (OPC) es el material de construcción más utilizado a nivel mundial cuyas materias primas son principalmente silicato de alúmina en forma de arcilla y carbonato de calcio en forma de piedra caliza. El cemento se produce por el mezclado y molienda de una mezcla de arcilla y cal en proporciones específicas, luego se lo calcina en un horno rotatorio a 1400°C aproximadamente, en el cual ocurren reacciones químicas y cuyo resultado es el “Clinker”, finalmente el Clinker se muele en partículas muy finas y se almacena. Uno de los principales componentes del OPC es el silicato de calcio ($C_aO - SiO_2$), que, al contacto con el agua, este se hidrata y se endurece formando el silicato de calcio hidratado (SCH) ($C_aO - SiO_2 - xH_2O$). La reacción de hidratación empieza tan pronto como el agua fue agregada. (Callister, 2007)

Según la normativa ACI, en el apartado 4.4 Protección del refuerzo contra la corrosión establece que el contenido máximo de iones cloruro para el concreto solidificado provenientes del agua.

Tabla 1.1 Contenido máximo de iones Cl⁻ para la protección contra la corrosión del refuerzo (318)

| Tipo de elemento | Contenido máx. de iones Cl⁻ solubles en agua en el concreto, porcentaje en peso de cemento |
|--|--|
| Concreto preesforzado | 0.06 |
| Concreto reforzado que en servicio estará expuesto a cloruros | 0.15 |
| Concreto reforzado que en servicio estará seco o protegido contra la humedad | 1.00 |
| Otras construcciones de concreto reforzado | 0.3 |

Esta tabla está relacionada con los requisitos de mezcla para condiciones de exposición especiales que se deben cumplir para el cemento

Tabla 1.2 Requisitos para condiciones de exposición especiales (318)

| Condición de exposición | Concreto de peso normal: relación máxima agua-material cementante en peso | Concreto con agregado normal y ligero, fc', min MPa |
|---|--|--|
| Concreto que se pretende que tenga baja permeabilidad en exposición al agua | 0.5 | 28 |
| Concreto expuesto a congelamiento y deshielo en condición húmeda o a productos químicos des congelantes | 0.45 | 31 |
| Para proteger el refuerzo en el concreto de la corrosión cuando está expuesto a cloruros de sales des congelantes, sal, agua salobre, o salpicaduras del mismo origen | 0.4 | 35 |

En promedio, el agua de mar tiene una salinidad de 3.5%, principalmente cloruro de sodio, por ende, realizando un cálculo sencillo con los datos proporcionados en ambas tablas y el porcentaje de salinidad, $(0.4 \text{ agua/cemento}) \cdot (0.035 \text{ sales/agua}) = 0.014$

sales/cemento, valor que es mayor al 0.15% establecido por la norma, lo que conduciría a un diferente comportamiento del cemento en ambientes salobres.

1.4.2 Corrosión

1.4.2.1 Antecedentes

- **Proyecto MICAT (2005)**

El proyecto MICAT (Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica), se expusieron probetas de distintos materiales en diferentes zonas del mapa, se registraron parámetros meteorológicos como temperatura media anual, humedad relativa, tiempo de humectación, velocidad de depósito de SO₂ y Cl⁻ y se monitoreó la velocidad de corrosión. Los resultados que nuestro país se encuentra en el puesto N°12 de 75 probetas con concentración alta de Cl⁻. (Chico, De la Fuente, Simancas, & Morcillo)

- **Puente de los Caras de Manabí (2016)**

En este estudio se realizó una estimación de la naturaleza agresiva de la atmosfera mediante la colocación de probetas en tres diferentes sitios del puente a la intemperie. Cada quince días se realizaban medianas de salinidad, revelando al final del estudio la existencia de un alto nivel de agresividad corrosiva influenciada por la humedad, temperatura, velocidad del viento y deposición de sales. (Guerra, Castañeda, & Howland, 2016)

1.4.2.2 Química de la corrosión

En la corrosión del acero, el ánodo corresponde a la reacción en la barra y el cátodo es el agua.



Inicialmente se combinan el ion Fe²⁺ con el hidroxilo OH⁻ formando hidróxido ferroso Fe (OH)₂ de color verdoso, luego se combinan con el O₂ formando hidróxido férrico Fe (OH)₃ que es de color rojizo

La formación del hidróxido férrico forma unas costras en la superficie del metal, aumentando su volumen, y como consecuencia de esta expansión, el cemento se fisura. (Alla, 2016)

- **Polarización**

Tomando como base un circuito sencillo con un voltaje y una resistencia, por el que pasa una intensidad de corriente y se lo extrapola a un acero con diferente granulometría en su microestructura, se puede colocar en dicho circuito dos granos diferentes A y B separados por la resistencia (ilustración 1.6).

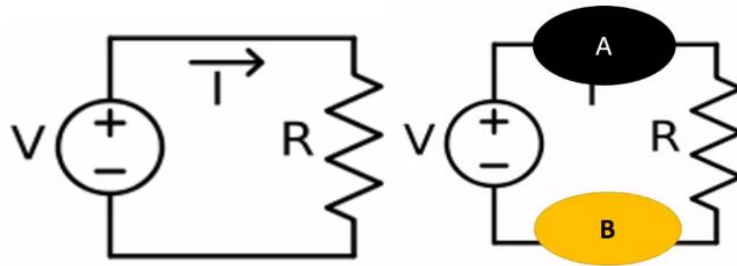


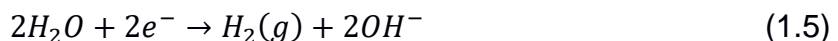
Ilustración 1.1 Simulación de un circuito en una estructura de acero (Frankel, 2016)

Siguiendo la Ley de Ohm, el grano A va a dar un potencial eléctrico diferente al del grano B y la resistencia del circuito lo va a dar el límite entre los dos granos.

$$I = \frac{(E_A - E_B)}{R} \quad (1.3)$$

Si este límite de granos da una resistencia infinita, no habrá paso de corriente, es decir, no ocurrirá corrosión. En el momento en que la resistencia desciende, la corriente va a empezar a circular y tanto el grano A como el B van a dar un potencial que va a ir cambiando, aumentando para el ánodo y disminuyendo para el cátodo y esto se conoce como polarización.

Hay dos reacciones catódicas primarias dependiendo del medio. La primera es la evolución del hidrogeno en medio ácido y la segunda en medio neutro o básico:



Cada una de estas reacciones tiene un potencial estándar que corresponde a la energía libre de formación de las especies involucradas en la reacción.

Las reacciones anódicas y catódicas suelen darse en lugares sumamente separados. En el caso de que el ánodo y el cátodo estén extremadamente unidos, es necesario que exista un diferencial de potencial. Para este caso, la uniformidad de la corrosión ocurrirá si los sitios catódicos y anódicos se mantienen en un constante movimiento a lo largo de la superficie, es decir, existe una migración de iones del sitio anódico al sitio catódico.

Esto sucede en un electrodo metálico inmerso en un ambiente acuoso corrosivo, donde ambas reacciones ocurren en la superficie del electrodo.

Las reacciones predominantes en el cátodo típicamente pueden ser la de hidrogeno y oxígeno.

Si se hace una representación entre la intensidad y el potencial eléctrico con una resistencia baja, se obtiene una curva de polarización o Diagrama de Evans (ilustración 1.7). Cuando un potencial crece y el otro disminuye a medida que la intensidad aumenta, va a llegar un punto en que ambos van a tender al mismo valor de potencial, es decir, la diferencia de potenciales va a tender a cero. Cuando esto se produzca, la intensidad de corriente será máxima y dicho potencial compartido se lo conoce como potencial de corrosión. (Frankel, 2016)

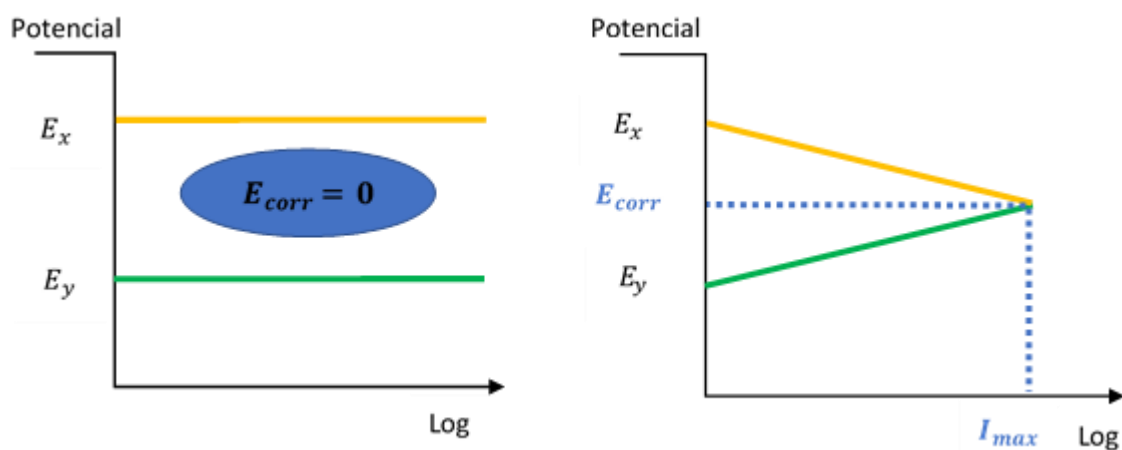


Ilustración 1.2 Diagrama de Evans

- **Corrosión por carbonatación**

Durante su tiempo de servicio el cemento está expuesto a ambientes diversos, pero con un componente que todos tienen en común: la presencia del dióxido de carbono. La carbonatación es un proceso natural que ocurre durante el envejecimiento del concreto. El dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera penetra por difusión en la estructura de cemento y reacciona con los hidróxidos que lo componen, formando carbonatos, reduciendo el pH de 12.5 a 9 dando a lugar un medio ácido que produce un progresivo efecto corrosivo en el acero que es parte del esqueleto. (Paredes, Prieto, & Santos)

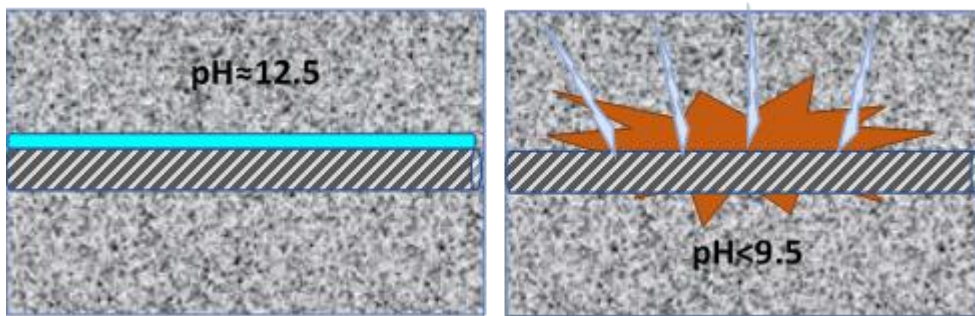
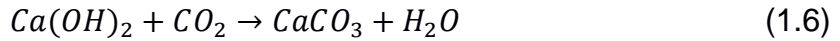


Ilustración 1.3 Corrosión por carbonatación

- **Corrosión por cloruros**

Los cloruros penetran principalmente por capilaridad y difusión destruyendo la capa protectora. La presencia de cloruros en el concreto crea una zona anódica con relación a la zona catódica. En el ánodo estos iones se combinan con el hierro formando tricloruro de hierro, un compuesto que no es estable; mientras que del cátodo se liberan iones hidroxilo que se combinan con el hierro formando hidróxido ferroso. Los iones cloruro libres siguen atacando al metal en conjunto con los iones que nuevamente ingresan. Este mecanismo es cíclico y acumulativo. Si las condiciones en la superficie son desfavorables, el proceso corrosivo se acelera. (Paredes, Prieto, & Santos)

En el ánodo: $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$

En el cátodo: $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$

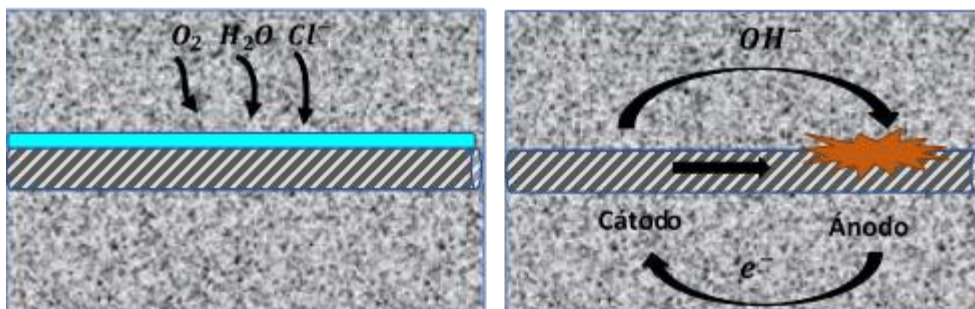


Ilustración 1.4 Corrosión por acción de cloruros

- **Pasividad**

La pasividad es un estado en el cual el flujo de corrosión de un metal es muy bajo por la presencia de una delgada capa de óxido o hidróxido en la superficie del metal, como es el caso de los aceros inoxidable que tiene una fina capa de óxido de cromo.

La curva de polarización para materiales pasivos se muestra en la ilustración 1.10. Mientras el potencial incrementa por encima del potencial de corrosión, la corriente incrementa exponencialmente lo que se manifiesta físicamente disolviendo al metal. Después de ello, en la gráfica, la corriente decrece debido a la formación de una película pasiva. La pasividad solo puede ser alcanzada aplicando un potencial anódico lo que se conoce como protección anódica o por la adición de agentes oxidantes que pudieran incrementar el potencial de corrosión. En ciertas condiciones, la intensidad puede incrementar de nuevo si se aplica un potencial elevado que rompe la película protectora. Cuando la capa pasiva se rompe, da lugar a la formación de grietas en el metal que incentivarán la corrosión. Esto se explicará en la siguiente sección.

Los valores de densidad de corriente de corrosión y pasivación dependerán de las propiedades del material y de la severidad del ambiente. (Frankel, 2016)

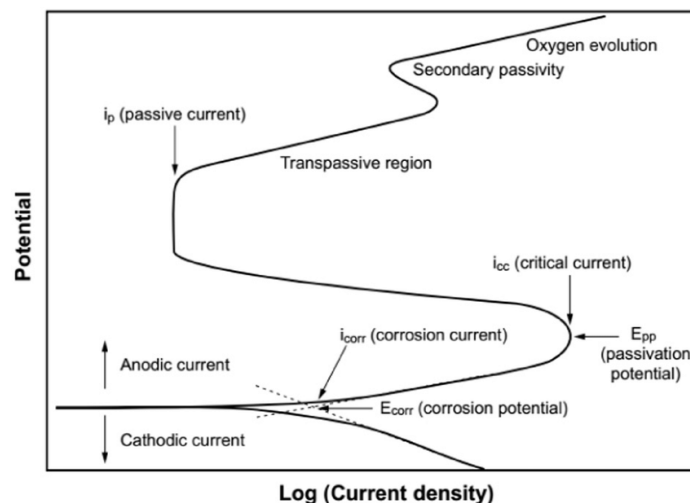


Ilustración 1.5 Diagrama de polarización para sistemas pasivos (Frankel, 2016)

1.4.2.3 Tipos de corrosión

La corrosión se manifiesta de diferentes maneras. Entre ellas se tiene: galvánica, entre grietas y hoyos, intergranular, por filtrado específico, por erosión y por esfuerzo. A continuación, se detallan los tipos de corrosión más importantes para esta investigación

- **Corrosión por grietas y hoyos:** la corrosión también ocurre por diferentes concentraciones de iones o gases disueltos en la misma pieza, pero en diferentes

lugares. Cuando la pieza de metal tiene grietas, la solución se estanca y dentro de la grieta disminuye la cantidad de oxígeno disuelto, por ende, para que ocurra la reacción de reducción, los electrones son guiados hacia las zonas en las que el metal tiene contacto con el oxígeno, dichos electrones son producto de la oxidación del metal en las zonas con bajo oxígeno, dentro de las grietas. Cuando las soluciones contienen iones Cl^- , estos inducen la formación de iones H^+ que ionizan al metal, formando H_2 .

- **Corrosión por esfuerzo:** ocurre específicamente por la acción de una fuerza y en ambientes corrosivos. Después de aplicar la fuerza o un cambio de temperatura abrupta, se propagan pequeñas aberturas a lo largo del metal, lo que ocasiona fracturas. (Callister, Forms of corrosion , 2007)

1.4.3 Durabilidad

Según la ASTM E 632-82, define que la vida útil “es el periodo de tiempo después de la construcción durante la cual todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario”

La norma europea presenta un estándar en años de la vida útil nominal en condiciones normales para cada elemento a considerarse.

Tabla 1.3 Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del Concreto Estructural.

| Tipos de estructura | Vida útil nominal |
|---|--------------------|
| Estructuras de carácter temporal | Entre 3 y 10 años |
| Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal | Entre 10 y 25 años |
| Edificios agrícolas o industriales y obras marítimas | Entre 15 y 50 años |
| Edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil | 50 años |
| Edificios de carácter monumental o de importancia especial | 100 años |
| Puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta | 100 años |

Para definir la durabilidad de un material o estructura, es necesario, entre otras cosas, especificar el ambiente al cual va a estar sometido.

1.4.3.1 Tipos de ambientes

Para categorizar los ambientes, se utilizan tanto la norma americana como la europea

Tabla 1.4 Categorías y clases de exposición según ACI 318-14 (Aila, 2016)

| Categoría | Clase | Condición | |
|---|-------|---|----------------------------------|
| Hielo-deshielo (F) | F0 | Hormigón no expuesto a ciclos de hielo-deshielo | |
| | F1 | Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo y exposición ocasional a la humedad | |
| | F2 | Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo y en contacto frecuente con la humedad | |
| | F3 | Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes | |
| Sulfato (S) | | Sulfatos solubles en agua en el suelo, % en masa | Sulfatos disueltos en agua ppm |
| | S0 | $SO_4^{2-} < 0.10$ | $SO_4^{2-} < 150$ |
| | S1 | $0.10 \leq SO_4^{2-} < 0.20$ | $150 \leq SO_4^{2-} < 1500$ |
| | S2 | $0.2 \leq SO_4^{2-} \leq 2.00$ | $1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$ |
| | S3 | $SO_4^{2-} > 2.00$ | $SO_4^{2-} > 10000$ |
| En contacto con el agua (W) | W0 | Hormigón seco en servicio; hormigón en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad | |
| | W1 | En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad | |
| Protección del refuerzo para la corrosión (C) | C0 | Hormigón seco o protegido contra la humedad | |
| | C1 | Hormigón expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros | |
| | C2 | Hormigón expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen | |

Tabla 1.5 Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo según EHE-08. (Muñoz & Mnedoza, 2012)

| Clase de exposición | | | | Descripción |
|---|--|-------------|---|---|
| clase | Subclase | Designación | Tipo de proceso | |
| No agresiva | | I | Ninguno | Interiores de edificios sin condensación. Elementos de hormigón en masa |
| Normal | Humedad alta | IIa | Corrosión de origen diferente de cloruros | Interiores sometidos a humedades >65% o condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media superior a 600mm Elementos enterrados o sumergidos |
| | Humedad media | IIb | Corrosión de origen diferente de los cloruros | Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia con precipitación media anual inferior a 600mm |
| marina | Aérea | IIIa | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. Elementos exteriores situados en las proximidades de la línea costera (a menos de 5km) |
| | sumergida | IIIb | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentes, por debajo del nivel mínimo de bajamar |
| | En zonas de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras | IIIc | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas |
| Con cloruros de origen diferente del medio marino | | IV | Corrosión por cloruros | Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas |

1.4.4 Inhibidores

Son sustancias que en concentraciones baja y en un ambiente agresivo, prevén o minimizan la corrosión. Su mecanismo de acción se basa es que son químicamente absorbidos en la superficie del concreto

1.4.4.1 Inhibidores Inorgánicos

Inhibidores anódicos: reaccionan con los iones metálicos que se localizan en la superficie del metal, formando hidróxidos insolubles que se depositan en la superficie, lo que corresponde a la película impermeable. Cuando la concentración del inhibidor incrementa, la densidad de corriente catódica comienza a incrementar más que la anódica; como consecuencia de esto, el metal sucumbe en un estado de pasivación. Por lo cual, es fundamental que la concentración de estos inhibidores sea alta.

Como ejemplo de esta clase de inhibidores, están los nitratos, molibdatos, cromatos de sodio, fosfatos, hidróxidos y silicatos. (Dariva & Galio)

Inhibidores catódicos: Estos inhibidores tienen iones metálicos capaces de producir una reacción catódica partiendo de la alcalinidad, produciendo compuestos insolubles que se precipitan selectivamente en el cátodo. Los depósitos sobre el metal forman una película adherente que restringe la difusión de especies reductoras, como oxígeno y electrones. A diferencia de los inhibidores anódicos, el efecto de los inhibidores catódicos no depende de la concentración por lo que son considerados más seguros que los anódicos. Otra característica es que dependen de la naturaleza del agua y no del metal. Algunos ejemplos de inhibidores catódicos son los iones de magnesio, zinc y níquel que reaccionan con el ion hidroxilo formando hidróxidos, los que precipitarán en el metal, protegiéndolo. Además, las polifosfatos, ligninas y sales de calcio tienen el mismo mecanismo de reacción. (Dariva & Galio)

1.4.4.2 Inhibidores Orgánicos

Estos inhibidores pueden actuar como catódicos, anódicos o ambos a la vez. Como regla general, tienen una gran afinidad metálica, actúan siendo adsorbidos y formando una película hidrofóbica protectora. Su eficiencia depende de la estructura química del inhibidor, la aromaticidad de la molécula, tipo y número de átomos enlazados (S, O, N)

que le otorga partes hidrofóbicas o hidrofílicas, naturaleza y carga del metal, habilidad de compactación, capacidad de formar complejos con los iones del metal, y tipo de solución electrolítica.

Como ejemplo se tiene a la amina, MBT (mercaptabenzotiazol), aldehídos, benzotriazol, compuestos acetilénicos, ácido ascórbico. Entre los inhibidores que actúan en fase de vapor, se encuentran los dicitcloexilamonio benzoato, etanolamina benzoato.

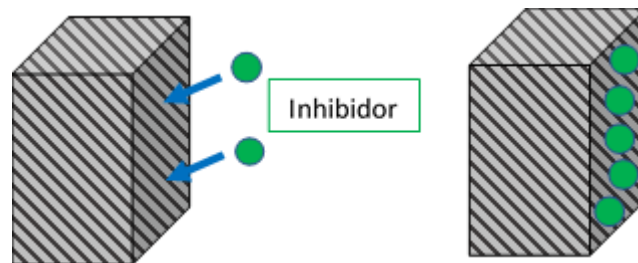


Ilustración 1.6 Mecanismo de acción de inhibidor orgánico

Para emplear los diferentes tipos de inhibidores, es necesario considerar los factores ambientales (pH, composición, impurezas, agitación, temperatura, geometría del sistema, concentración y mezclas entre inhibidores). La eficiencia de cada inhibidor es un valor porcentual dado por el fabricante, pero la eficiencia global contra la corrosión depende de la del inhibidor y del flujo de corrosión. (Dariva & Galio)

1.4.5 Geopolímero

1.4.5.1 Antecedentes

- **Paneles resistentes al fuego para madera prensada (1973-1976)**

Las primeras aplicaciones fueron materiales de construcción resistentes al fuego desarrollados por J.J. Legrand. Las industrias que lo desarrollaron fueron compañías francesas A.G.S y Saint-Gobain, cuyo cliente fue el Gobierno Francés para su implementación en escuelas y universidades. Se engendró la idea de construir una planta piloto pero por temas políticos el proyecto fue abandonado

- **Aplicaciones cerámicas (1977-1978)**

La compañía A.G.S. suministró un aglutinante de caolinita y cuarzo creando un nanocompuesto llamado Siliface Q. Este geopolímero tenía excelentes propiedades

mecánicas, térmicas pero una mala absorción del agua, por lo cual el proyecto fue abandonado

- **Low Temperature Geopolymeric Setting (1977-1982)**

Este procedimiento francés permitía temperaturas de secado de 50°C a 250°C en condiciones alcalinas a través de precursores oligosilatos, el alumino-silicato usado era arcilla. Este procedimiento fue llevado a la industria cerámica y modernizado.

- **Terminología (1979)**

La designación química de geopolímero se aplica a materiales basados en alumino-silicatos y polisilatos, para estructuras amorfas y semicristalinas, otorgada por Joseph Davidovits.

- **Aglutinante geopolimérico (1979-1995)**

La nueva terminología fue necesaria para el desarrollo de nuevos materiales. Un geopolímero era un material inorgánico, duro, estable a temperaturas por encima de 1250°C y no inflamable que se forma por la policondensación. Sus aplicaciones se expanden a la ingeniería aeronáutica, sector nuclear, moldeado, sellado, asilamiento de hornos y hasta búsquedas arqueológicas.

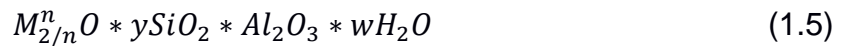
- **La invención del cemento de geopolímero de alta resistencia (1983)**

En agosto del 1983, James Sawyer como cabeza del laboratorio Lone Star en Houston, Texas se empezó el desarrollo de este cemento de geopolímero basado en la química del cemento hidráulico. Estos cementos eran resistentes al ácido con propiedades zeolíticas, desarrollados para soportar desperdicios tóxicos. La geo polimerización involucraba una reacción química de óxidos de alumino-silicatos con polisilicatos de calcio y álcali dando a lugar enlaces Si-O-Al. (Davidovits, 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications Market Trends and Potential Breakthroughs, 2002)

1.4.5.2 Zeolita

Descubierta en el año 1756 por el mineralogista sueco Alex Fredrik Cronstedt. La palabra zeolita viene del griego “zeo” que significa “hervir” y “lithos” que significa “una piedra”.

En general, la composición química de la zeolita corresponde a:



Donde M puede ser cualquier metal del grupo IA y IIA como Na⁺, K⁺, Li⁺, Ag⁺, NH₄⁺, H⁺, Ca²⁺, Ba²⁺; y va de 2-200, n es la valencia del catión y w representa el número de moléculas de agua contenidas en los vacíos.

Desde el punto de vista estructural, la zeolita es un polímero inorgánico cristalino basado en una infinidad de adecuaciones tridimensional de celdas tetraédricas de AlO₄ y SiO₄ unidos por átomos de oxígeno que permite el intercambio iónico y la deshidratación reversible. Cada tetraedro es negativo, que se balancea con el catión metálico. Se conocen más de 70 estructuras de armazón de zeolita. (Flanigen, Broach, & Wilson, 2010)

1.4.5.3 Química del geopolímero

El geopolímero corresponde a la familia de polímeros inorgánicos con una composición similar a la zeolita, pero con una estructura amorfa en lugar de cristalina. Se forma por la reacción de compuestos aluminio-silicatos juntamente con un reactivo alcalino donde el producto final es un anillo tridimensional polimérico con una estructura comprimida. (Venkatesan, 2016)



Ilustración 1.7 Materia prima y activador formador de geopolímero

El proceso de polimerización es similar al de las zeolitas, que también requieren bajo pH y alta temperatura del sistema. El mecanismo de reacción posible se muestra en la ilustración 1.20.

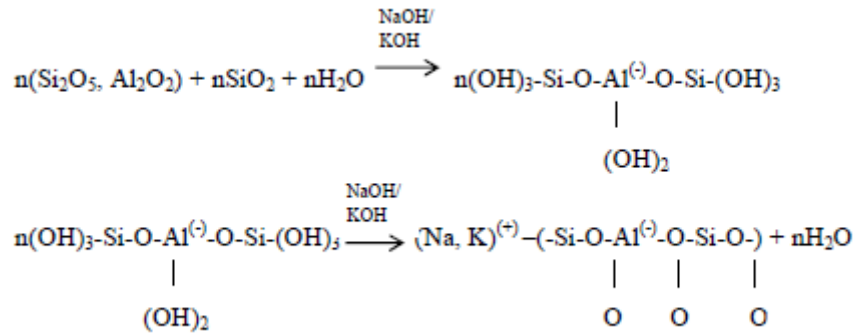


Ilustración 1.8 Mecanismo de reacción del geopolímero (Venkatesan, 2016)

La formación del geopolímero se puede desarrollar en cinco pasos:

- Disolución del aluminosilicato en una solución altamente alcalina, produciendo especies aluminatos y silicatos.
- Estas especies se mezclan en una solución y se mantienen en equilibrio
- Ocurre la gelación debido a la solución con alto pH
- El gel se reorganiza y se forma la microestructura
- Finalmente, el geopolímero crece y se forma la estructura tridimensional (Venkatesan, 2016)

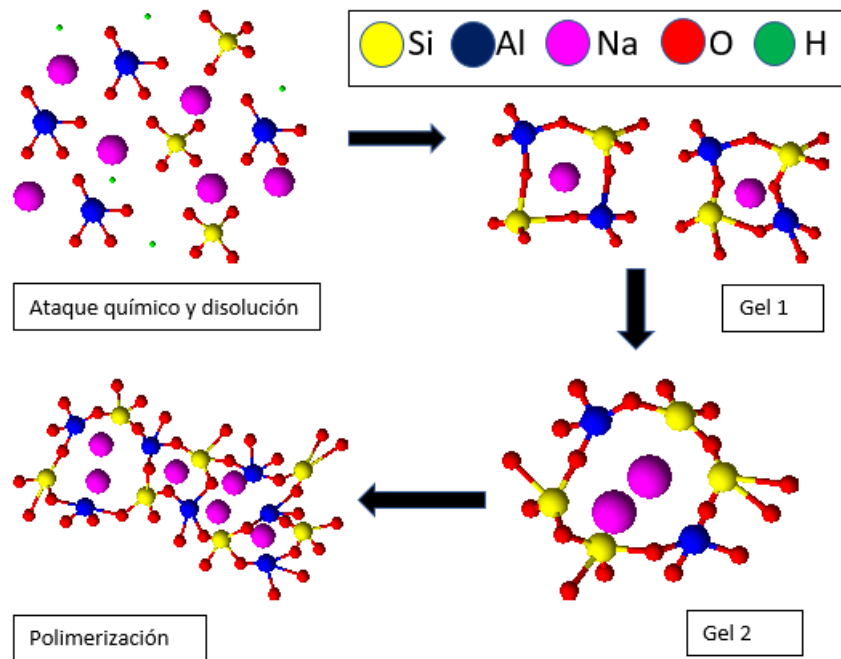


Ilustración 1.9 modelo conceptual de la geopolimerización

Este mecanismo propuesto se ve afectado por factores como los componentes del aluminosilicato usado, las soluciones activadoras, las condiciones de curado, entre otros.

1.4.5.4 Propiedades de durabilidad

Una característica de la matriz geo polimérica es el tamaño de partícula, el mismo que es controlado según sea la composición del ligante, el tipo de activador y la temperatura de curado. Estudios muestran que una concentración alta de la solución alcalina da como resultado la formación de mayor cantidad de gel, lo cual tiene un efecto positivo en la resistencia del geopolímero. Además, con una alta concentración de silicato de sodio en relación al hidróxido alcalino da como resultado un potente gel capaz de ligar partículas pequeñas lo que favorece a la resistencia.

Un punto importante es que esta reacción es endotérmica, necesita de temperaturas altas para que ocurra, lo que significa que favorece también a la formación de microporos. (Venkatesan, 2016)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe la formulación de las diferentes alternativas de solución del problema, la descripción y selección de la mejor alternativa, el diseño conceptual y la metodología de diseño a seguir.

Posteriormente, se describe el diseño detallado del producto o servicio: metodología, normativas, principios técnicos, criterios de diseño, selección de recursos, etc.

También debe establecer las especificaciones técnicas del producto o servicio final y finalmente las consideraciones éticas y legales.

Los subtemas estarán sujetos a la naturaleza del diseño, dado que no todos los proyectos incluyen los mismos elementos.

Básicamente, lo que se debe describir claramente aquí es la estrategia de identificación. Se debe explicar cómo los efectos causales que se piensa que existen en los datos u observaciones están identificados. Es importante identificar la metodología apropiada para tratar un problema específico considerando el tipo de datos o información disponible.

2.1 Diseño experimental

Con la finalidad de cumplir con los objetivos establecidos anteriormente, el diseño constará de muestras hechas con cemento de geopolímero y ordinario Portland sometidas en diferentes medios para observar y analizar su progreso. El material, proporciones y procedimiento para sintetizar el geopolímero fueron basadas en el resultado que reveló una mayor resistencia a la compresión en la Tesis del Magister Néstor Ulloa (Ulloa, 2018), mientras que para elaborar las muestras de OPC, se siguió la dosificación declarada en la norma (ASTM C-109, 2008)

Cada una de las pruebas a las que serán sometidas las muestras se realizarán por triplicado, con y sin inhibidor de corrosión. Primero se analizarán las pruebas y el tamaño de la muestra necesario, se escalará con el tamaño de muestra declarado en la c-109 y en la tesis y se calculará la cantidad de material necesario. (ANNNA UNIVERSITY). Una vez que se hayan elaborado las muestras, los cilindros se dejarán curar al ambiente por 7 días mientras que los cubos por 28 días como se establece en la norma ya mencionada.

Tabla 2.1 Diseño de mezcla óptimo para un esfuerzo máximo de 15.28 MPa sin inhibidor y 14.66 MPa con inhibidor

| | |
|--|----------|
| Concentración NaOH | 14 M |
| Na ₂ SiO ₃ /NaOH | 3 |
| Activador/zeolita | 0.5 |
| Arena/zeolita | 1.5 |
| Temperatura de curado | 60°C |
| Tiempo de curado | 24 horas |

Tabla 2.2 Condiciones ambientales de curado

| | |
|----------------------|------|
| Humedad relativa (%) | 38.9 |
| T (°C) | 20.4 |

2.2 Materia prima

2.2.1 Especificación

La zeolita Natural usada en este proyecto fue proveída por INDAMI S.A.

El NaOH utilizado marca Merck-Millipore con 99% de pureza, junto con el silicato de sodio Na₂SiO₃ Proquiandinos S.A. (Especificaciones: 51°Bé a 25 °C, 14.13% Na₂O, 31.19% SiO₂).

El inhibidor utilizado de tipo migratorio MCI-2005NS, suministrado por Cortec Corporation (especificaciones: pH=11-12 (1% solución), contenido no volátil= 25-30%, densidad= 9.9-10 lb/gal); este inhibidor es una mezcla de sales de aminas con ácidos carboxílicos (CORTEC, s.f.)

2.2.2 Pretratamiento

En este estudio, tanto la arena como la zeolita requirió un pretratamiento. La zeolita tenía un tamaño inicial de partícula de 90µm (pasante de malla N°200), luego fue reducido a 38µm en un molino de bolas a 350rpm por 20 minutos hasta llegar a 38µm, tamaño similar a las partículas de cemento, que era el requerido (pasante de malla N°400). La zeolita pasante se la procedió a secar en un horno a 100°C por 24h.

La arena de río utilizada fue con la que contaban en el Laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Esta arena fue tamizada y la arena a

usar fue la pasante de malla N°30, retenida en N°40, tamaño especificado en norma; posteriormente fue lavada y secada en una estufa a 100°C por 24h.

d(0.1): 2.610 um

d(0.5): 24.566 um

d(0.9): 90.753 um

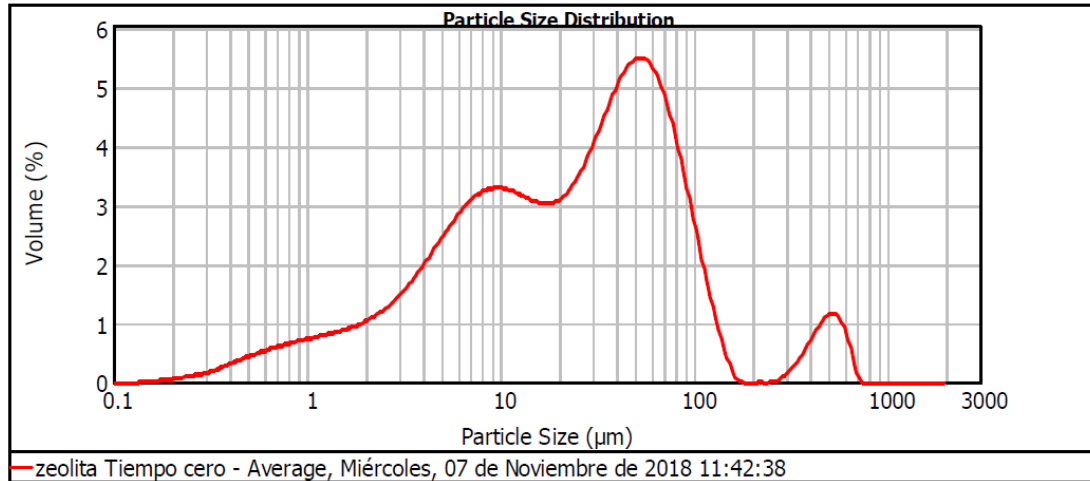


Ilustración 2.1 Tamaño de partícula inicial de zeolita

2.3 Síntesis

2.3.1 Dosificación

Para el caso de la dosificación, se calculó el volumen del cubo y la cantidad de material que se necesita para los cubos, y como la densidad del geopolímero es constante, se la escaló para el volumen de los cilindros: $V_{Ci} = 785.4 \text{ cm}^3$, $V_{Cu} = 125 \text{ cm}^3$, por lo tanto:

$$V_{Ci} \cong 6V_{Cu} \quad (1.8)$$

Tabla 2.3 Dosificación para morteros de geopolímero por unidad (Ulloa, 2018)

| Molde | NaOH(M) | Na ₂ SiO ₃ /NaOH | Activador (ml) | Arena(g) | Zeolita(g) | Inhibidor(µL) |
|----------|---------|--|----------------|----------|------------|---------------|
| cubo | 14 | 3 | 45 | 135 | 90 | 125 |
| cilindro | 14 | 3 | 270 | 810 | 540 | 750 |

Tabla 2.4 Dosificación para morteros de OPC por unidad (ASTM C-109, 2008)

| Molde | Agua (ml) | Arena(g) | Cemento(g) | Inhibidor(µL) |
|----------|-----------|----------|------------|---------------|
| Cubo | 33 | 184 | 67 | 125 |
| Cilindro | 194 | 1100 | 400 | 750 |

2.3.2 Preparación de muestras

2.3.2.1 Preparación de Geopolímero

Se prepara una solución de NaOH 14M y se la mezcla con él Na_2SiO_3 en las proporciones indicadas en la tabla Se mezcla la arena y zeolita en un equipo de mezclado Horbart modelo N-50 hasta que se homogenice; posteriormente se agrega el activador mientras la máquina sigue en marcha y se continúa mezclando por 5 min. La pasta obtenida se la coloca en los moldes. Estos moldes se proceden a curar a 60°C en una estufa por 24h. finalizado este tiempo, se los saca, se los desmolda y se lo deja curar al ambiente por 28 días.

2.3.2.2 Preparación de concreto

La preparación del concreto fue según la metodología establecida en la norma para Test de compresión. (ASTM C-109, 2008). El método de curación fue el mismo para las muestras de geopolímero. El tamaño de partícula de la arena usada para las muestras de concreto fue la misma que se usó para las muestras de geopolímero.

2.4 Ensayos

2.4.1 Corrosión acelerada

Este ensayo se realiza en cilindros de 100 mm de diámetro y 100mm de alto con una varilla de acero de 14 mm de diámetro insertada en el centro del cilindro. Los especímenes serán sumergidos hasta una altura de 42.5 mm desde la base del cilindro en una solución de cloruro de sodio 4% m/m. El acero insertado en el cilindro actúa como ánodo mientras que una varilla se colocará dentro de la solución que actuará como cátodo. Estas dos varillas serán conectadas a un voltaje constante de 6V como si se tratase de una celda electroquímica. Se monitoreará la intensidad de corriente pasante en cada cilindro. Cuando aparezca la primera fisura, el ensayo se detiene. (Venkatesan, 2016)

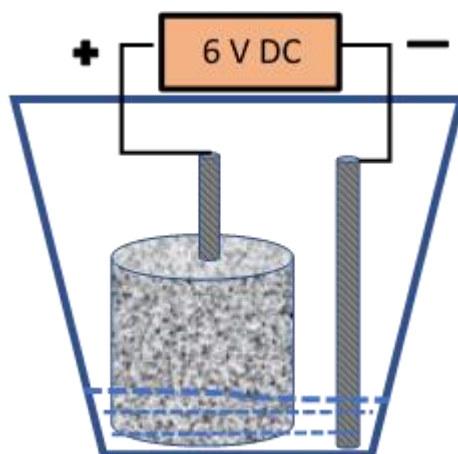


Ilustración 2.2 Esquema de ensayo de corrosión acelerada

2.4.2 Ensayo de resistencia al agua de mar y agua acidificada

Este ensayo se realiza sobre cubos de 5 cm*5 cm*5 cm de geopolímero y de OPC, con y sin inhibidor. Se toma los pesos iniciales para luego las muestras ser sumergidas en tres soluciones diferentes: 3%*m/m* HCl, 3%*m/m* H₂SO₄ y agua de mar por periodos de 30, 60 y 90 días; por cada periodo, las muestras deben ser sacadas, limpiadas, registrar el peso y finalmente ser probadas usando el equipo de compresión de 2000 kN de capacidad a una velocidad de 1mm/min. La pérdida en peso y el esfuerzo de compresión serán calculados para cada caso. (Venkatesan, 2016)

2.5 Caracterización

2.5.1 Prueba de resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión mecánica sigue el procedimiento declarado en la normativa ASTM C109/C109 M-16^a. Esta prueba usa la máquina universal marca SHIMADZU modelo UTM-600KN. la carga limite a utilizar es de 60kN a una velocidad de 1mm/min. Los resultados de esta prueba indicarán cuál de los dos morteros (geopolímero o cemento) tendrá una mayor resistencia la compresión

2.5.2 Difracción cuantitativa de rayos X (QXRD)

Este análisis indica la composición de la fase mineralógica de los materiales de partida y del producto activado. Se utiliza un difractómetro PANalytical X'Pert PRO. Las condiciones de operación fueron de 30mA y 45kV. Los patrones de difracción se registraron en la geometría de Bragg-Brentano en un rango angular de 5-80 con un tamaño de paso de 0.02 y con 2s de tiempo por paso. Además, se utilizó el método Rietveld con la ayuda del software X'Pert High Score Plus para cuantificar las muestras

mineralógicas y amorfas; este procedimiento primero identifica la fase mineral mayor y luego con la menor. El ciclo de refinamiento consta de ajustar parámetros como desplazamiento total de ceo, factores de escala, parámetros de red. Finalmente, se ajustaron todos estos parámetros utilizando una función coseno polinomial de Chebyshev. Las muestras se prepararon en forma de polvo para geopolímero y luego se las mezcla con 10% m/m de zincita (ZnO) como estándar.

2.5.3 Escaneo por microscopio electrónico y espectrometría de energía dispersa (SEM)

Este análisis puede caracterizar morfológicamente, determinar el grado de geo polimerización y el contenido de mineral. Las micrografías se obtienen utilizando un microscopio electrónico de barrido equipado con un espectrómetro de energía dispersiva FEI, modelo Inspeccione S. Para este análisis, se preparan muestras en polvo, se las adhiere a un portamuestras de aluminio, un disco de carbono en forma de adhesivo para mejorar la transferencia de electrones, se usó recubrimiento metálico en las muestras. Las condiciones de operación fueron: presión de 15Pa, voltaje de aceleración de 12.5kV con tamaños de punto de 2.5 y 3 para imágenes y un punto tamaño de 5 para el análisis EDS

2.5.4 Análisis termogravimétrico y escaneo por diferencia calorimétrica (TGA-DSC)

Este análisis a revela el comportamiento térmico y su estabilidad de la materia prima y del producto final. El equipo utilizado es un analizador térmico simultaneo TA Instruments Q-600, con unas muestras en polvo de 8-10 mg. Para cada análisis se utiliza crisoles de alúmina. El rango de temperatura va desde temperatura ambiente hasta 1000°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min y un flujo de Nitrógeno de 100ml/min. Los resultados fueron analizados e interpretados por el software Advantage TA Universal Analysis 4.5 A

2.5.5 Espectrofotometría infrarroja de la transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica es usada para verificar el grado de geo polimerización de los especímenes. Los aspectos se obtienen de un espectrofotómetro Perkin Elmer 100. Las muestras se preparan utilizando el método de tableta: 200 gr de bromuro de potasio (KBr) y 1% de la muestra en polvo, se mezcla homogéneamente en un mortero y se comprimieron a 9 MPa durante 5 minutos hasta que se comprimió la tableta en forma de disco de 0.5mm

de espesor. Para todos estos análisis se tomaron muestras residuo de compresión, el tamaño de partícula se redujo manualmente a 75 μ L

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización mineralógica de la zeolita por SEM, TGA-DSC, FTIR Y QXRD

La composición química de la zeolita se muestra en la micrografía de la figura 3.1, la cual revela la presencia mayoritaria de silicio con 34.27%, de oxígeno y aluminio, propia de los aluminosilicatos (formados por SiO_2 y Al_2O_3). Además de estos elementos, se detecta la presencia minoritaria de potasio, sodio y magnesio. A diferencia de la zeolita utilizada en la tesis de donde se ha tomado la dosificación (Ulloa, 2018), esta zeolita presenta hierro y una gran cantidad de calcio.

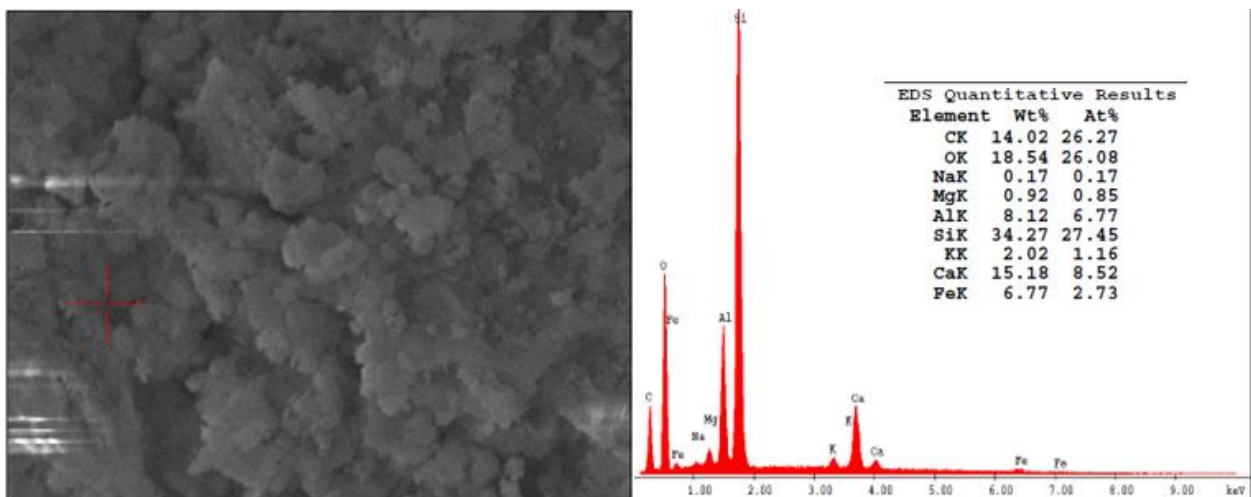


Ilustración 3.1 Análisis SEM-EDS de zeolita

En la figura 3.2 se muestra la difracción cuantitativa rayos X donde se revela las fases cristalinas de cuarzo, silica, mordenita y heulandita en un 66.3% y la fase amorfa en 33.7%. Se debe recalcar que en la muestra existe una gran cantidad de carbonato de calcio.

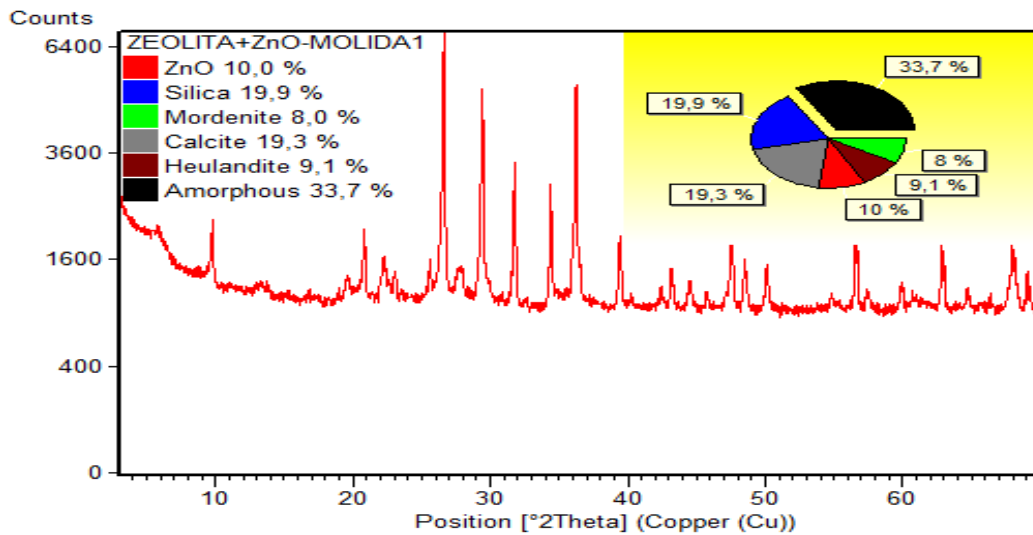


Ilustración 3.2 Análisis QXRD de zeolita

En la figura 3.3 se puede identificar los picos de los enlaces pertenecientes a los compuestos contenidos en la muestra. El pico con un número de onda de 3442.78 cm^{-1} corresponde a los enlaces O-H del agua contenida en la muestra de zeolita. Los picos que se encuentran entre 1000 y 1900 cm^{-1} corresponden a los enlaces simples y dobles entre el C y O del carbonato de calcio. Por último, los picos que se encuentran entre 900 y 460 cm^{-1} se deben a las vibraciones de los enlaces que conforman los planos de la estructura del aluminosilicato. Este análisis concuerda con los resultados obtenidos del QXRD.

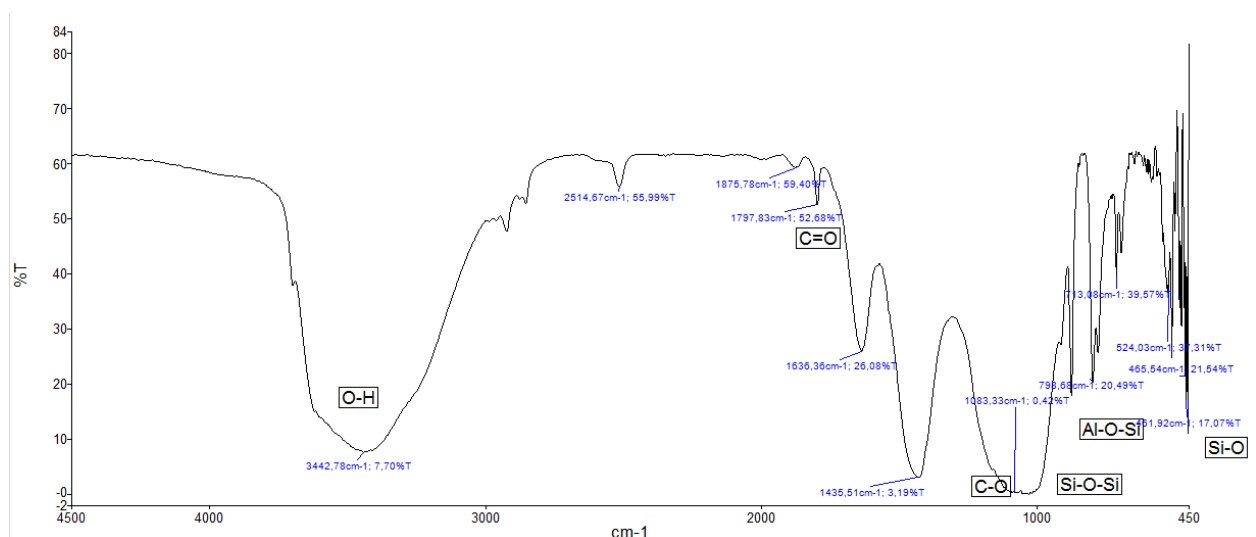


Ilustración 3.3 Análisis FTIR de zeolita

Finalmente, en la ilustración 3.4 se muestra el análisis termogravimétrico. La pérdida de peso que se observa en el rango de la temperatura ambiente a 200°C corresponde a la evaporación de las moléculas de agua más libres contenida en la zeolita. El rango de 200-500°C corresponde a la liberación del agua ligada con más fuerza a la estructura. Finalmente, la mayor pérdida de masa se registra en el rango de 600-720°C que corresponde a la descomposición del CaCO_3 en CaO y CO_2 . Este gran porcentaje de masa concuerda con la cantidad de calcita registrada en el análisis QXRD. La pérdida de masa total fue de 1.606 mg del 90.68 mg de muestra analizada. Después del pico máximo de 719.78°C no se observa decrecimiento de la gráfica debido a que la zeolita se descompone a temperaturas superiores a 1000°C por su estructura cristalina termoestable. (Pechar & Rykl, 1984)

Con respecto al flujo de calor, se puede observar dos picos endotérmicos: alrededor de 100°C debido a la evaporación del agua y cerca de 700°C por el proceso de carbonatación.

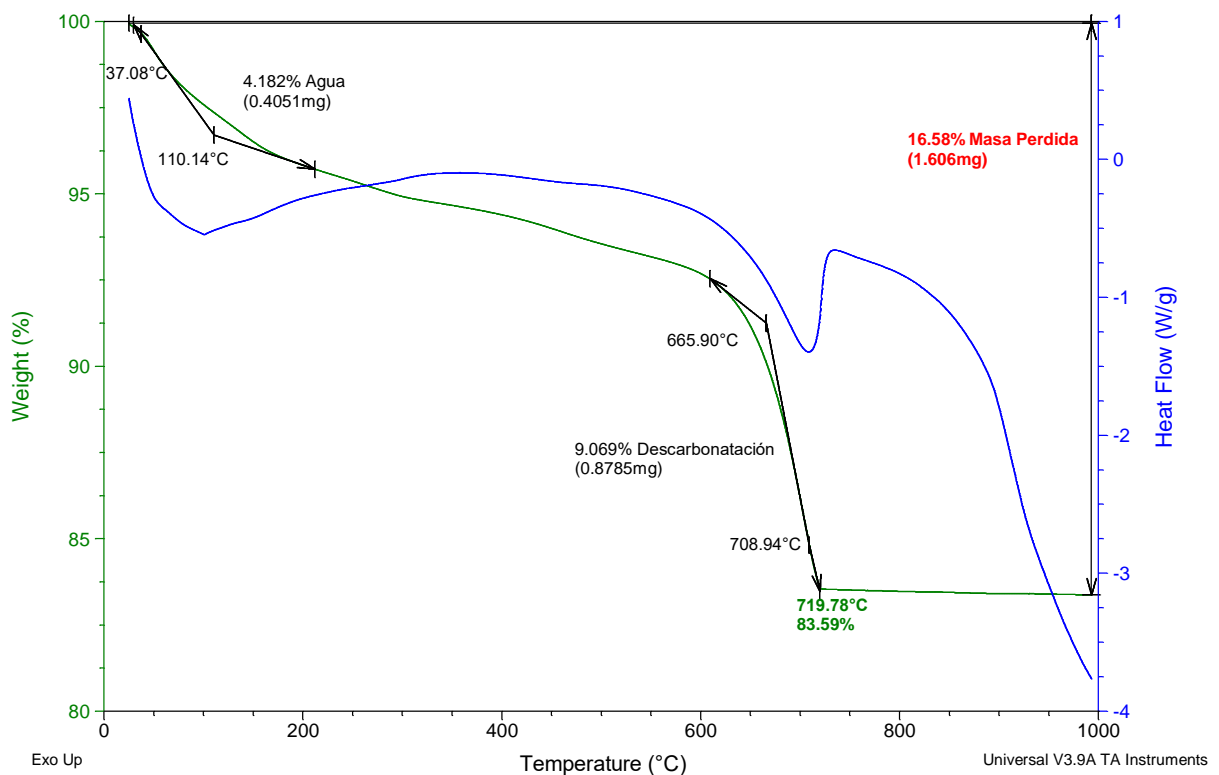


Ilustración 3.4 Análisis TGA-DSC de zeolita

3.2 Ensayo de corrosión acelerada

Dicho ensayo consistió en conectar las muestras en paralelo a una fuente de 6V, en la que el polo positivo se conectaba a la varilla recubierta del mortero y el polo negativo se conectaba a la varilla libre en la solución electrolítica. Cada día se iba midiendo la cantidad de corriente en la varilla positiva (ánodo) y se monitoreaba su progreso.

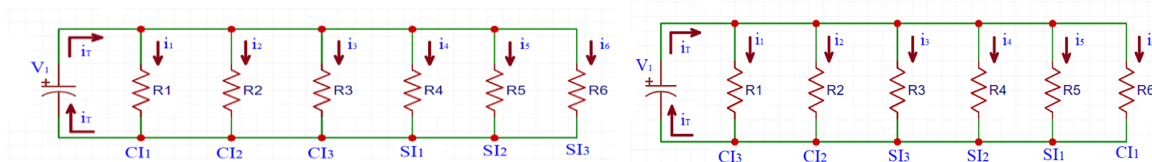


Ilustración 3.5 Esquema en paralelo del ensayo de corrosión para muestras de cemento (izq) y geopolímero (der)

3.2.1 Resultados para muestra de geopolímero

en la ilustración 3.5 se puede visualizar en ambas graficas que, al inicio del estudio, la intensidad de corriente es alta, pero a los pocos días desciende drásticamente y se mantiene constante. Esto indica que la matriz geo polimérica se comporta como una capa pasiva que impide el paso de los iones. El efecto del inhibidor de corrosión es prácticamente nulo.

El comportamiento entre las réplicas es similar lo que muestra que la composición y elaboración fue la misma para todas.

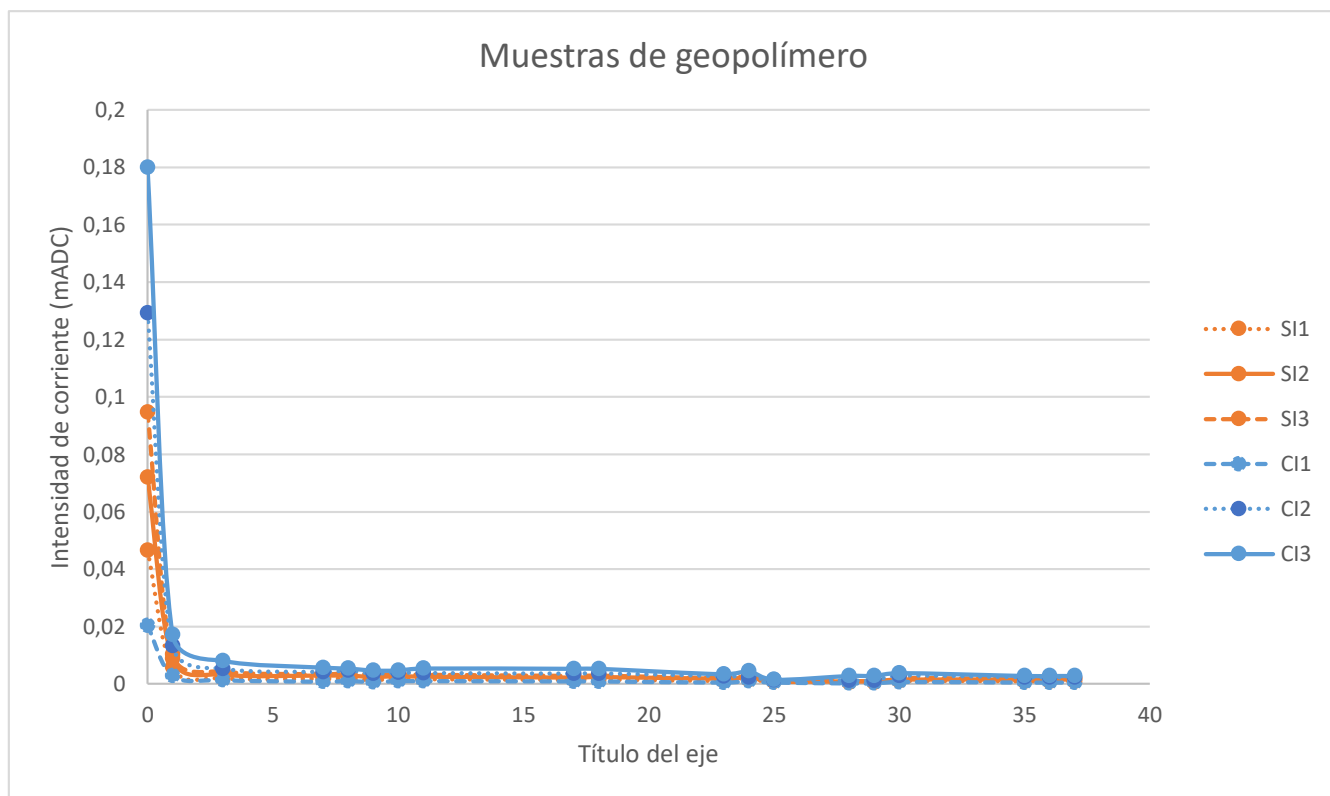


Ilustración 3.6 Ensayo de corrosión acelerada para los morteros de geopolímero

Las diferentes intensidades iniciales se deben a la distribución de las muestras en el circuito, lo que indica que, sin importar la cantidad de corriente que reciba, al cabo de unos pocos días, el amperaje tiende a cero.

3.2.2 Resultados para muestra de cemento

en las gráficas reveladas en la ilustración 3.6 se puede observar que al inicio del estudio existe un decrecimiento en la intensidad para ambos casos (sin y con inhibidor).

Analizando los primeros 13 días del ensayo, la caída de la intensidad de corriente es más brusca para el caso de las muestras de cemento con inhibidor, lo que demuestra que este químico está desempeñando su papel eficientemente, formando una capa pasiva en el ánodo y retrasando la corrosión.

En la ilustración 3.7 en el día 14 se presenta un incremento drástico en la intensidad para ambos casos. Esto se explica con el diagrama de Evans (ilustración 1.8): a medida que aumenta la intensidad, se puede observar un aumento de potencial electroquímico en el ánodo. Como la varilla que se midió fue el ánodo, el pico en la ilustración 3.6 revela dicho aumento de intensidad, es decir, la corrosión de la varilla. Después, comparando ambas

ilustraciones, la intensidad de corriente cae bruscamente lo que se debe a la formación de una capa pasiva, correspondiente al óxido que impide el contacto entre la varilla y el ambiente, y el potencial se mantiene constante.

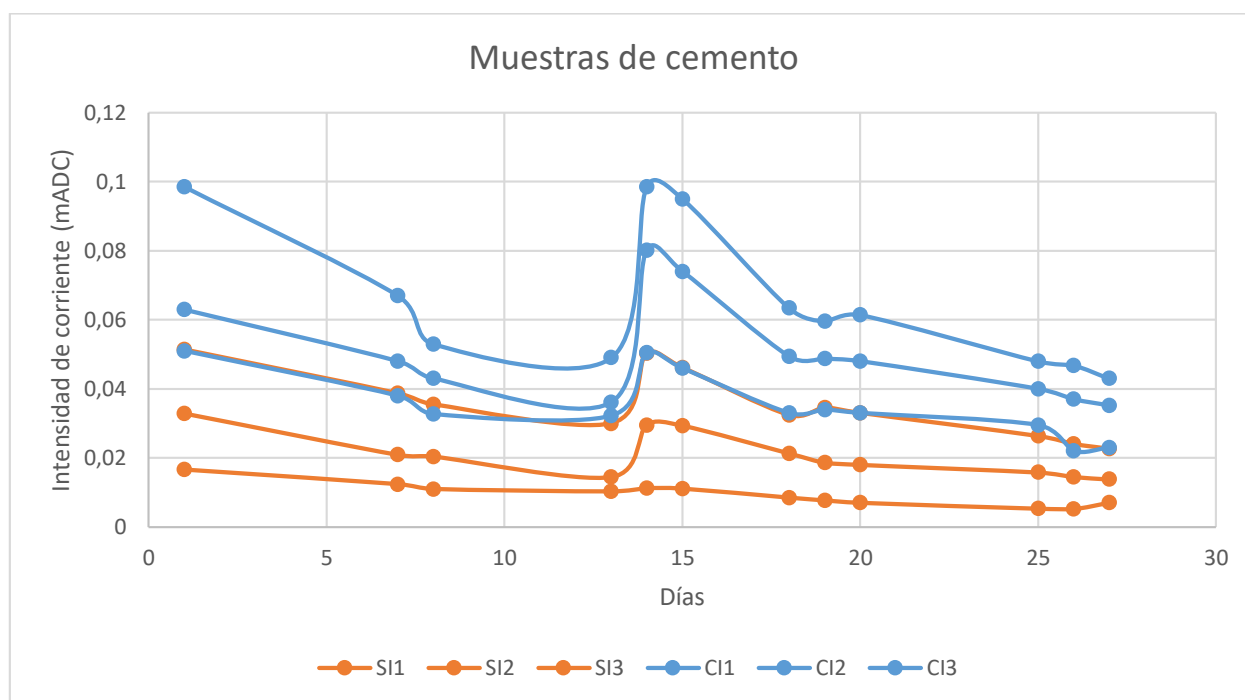


Ilustración 3.7 Ensayo de corrosión acelerada para los morteros de cemento

Si el análisis se prolongara más tiempo, se podrá visualizar que la capa pasiva no va a durar mucho por el contacto permanente con la solución electrolítica, se va a romper y el potencial subiría. La varilla entra a la zona de tras-pasivación o zona de picadura.

Este último fenómeno no se visualiza ya que la varilla está recubierta por el concreto y, solo el hecho de que la corrosión tenga lugar va a provocar una fractura por el aumento del volumen de la varilla.

Dado que las dos últimas muestras de cemento en el circuito correspondientes a dos replicas sin inhibidor, se rompieron a los 27 días, es evidencia fehaciente que el hecho de no utilizar el inhibidor repercute en la durabilidad del hormigón. El hecho de que la última muestra en el circuito, siendo la que menor intensidad de corriente recibió, fuese la primera en romperse; se debe a que no existe una caída drástica del amperaje, es decir, la intensidad fue constante y eso ayudó a que la corrosión también lo fuese.

3.3 Propiedades mecánicas

Se realizaron mediciones de resistencia a la compresión para las muestras de geopolímero y cemento OPC con y sin inhibidor. Dichas muestras se realizaron por cuatuplicado. Se usaron dos tipos de identificación: SI significa “sin inhibidor de corrosión” y CI significa “con inhibidor de corrosión”

3.3.1 Ensayo de compresión para muestra de geopolímero

En la tabla 3.1 muestran los resultados del ensayo de compresión para las muestras de cemento y geopolímero.

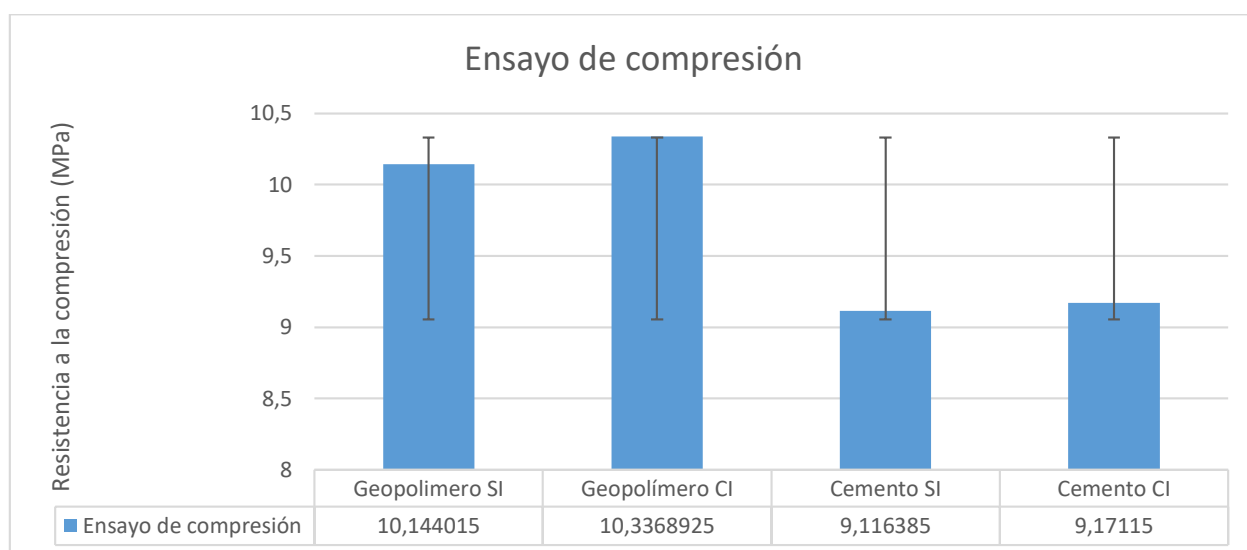


Ilustración 3.8 Grafica de barras de resultados de compresión

El esfuerzo máximo promedio para la muestra de geopolímero sin inhibidor fue de 10.144 MPa con una desviación estándar de 2.5409; para la muestra con inhibidor fue de 10.3368 con una desviación estándar de 3.137. Para ambos casos, la desviación de debe a la presencia de esferas de aire dentro de la muestra que ocurre por la mala compactación; lo que se observó una vez el ensayo terminó. Otra razón puede ser las delgadas fisuras que se visualizaban en la superficie de algunos cubos durante el tiempo de curado en condiciones ambientales. Estas fisuras son consecuencia de la deshidratación excesiva, por lo cual es necesario que el ambiente de curado tenga una humedad media-alta.

Comparando ambos casos, la resistencia a la compresión se ve favorecida para el caso de las muestras con inhibidor, resultado que no concuerda con la referencia tomada para

la composición, pero tómesese en cuenta que es un valor promedio con un error; y que la desviación estándar del geopolímero con inhibidor es mayor que la muestra sin inhibidor

3.3.2 Ensayo de compresión para muestra de cemento

El esfuerzo máximo promedio para la muestra de cemento sin inhibidor fue de 9.1163 con una desviación estándar de 1.3332; y para la muestra con inhibidor fue de 9.17115 con una desviación de 3.0246. Este material presentó menos burbujas de aire en el interior lo que indica que el cemento posee mejor trabajabilidad que la mezcla de geopolímero.

A pesar de ser una muestra de cemento, presenta una carga máxima muy baja. Esto se debe a que las condiciones de curado fueron iguales a las del geopolímero, el cemento pierde agua, no reacciona bien y pierde resistencia.

El inhibidor aumenta la resistencia a la compresión para este material, lo que no ocurre en el geopolímero.

3.4 Resistencia al agua de mar y agua acidificada

Antes de sumergir las muestras de geopolímero y cemento, se las pesó para, una vez finalizado el ensayo, se calcule el cambio en la masa de las muestras.

Tabla 3.1 Pesos iniciales de muestras de geopolímero

| | | SI | CI |
|-------------------|----|-------|-------|
| Agua de mar | M1 | 267.7 | 258.2 |
| | M2 | 269.3 | 249.7 |
| Ácido sulfúrico | S1 | 267.6 | 263.8 |
| | S2 | 273.7 | 252.1 |
| Ácido clorhídrico | C1 | 255.9 | 254.7 |
| | C2 | 273.0 | 263.2 |

Tabla 3.2 Pesos iniciales de muestras de cemento

| | | SI | CI |
|-----------------|----|-------|-------|
| Agua de mar | M1 | 242.5 | 256.5 |
| | M2 | 251.1 | 246.7 |
| Ácido sulfúrico | S1 | 250.4 | 256.0 |

| | | | |
|-------------------|----|-------|-------|
| | S2 | 254.7 | 246.2 |
| Ácido clorhídrico | C1 | 255.3 | 243.0 |
| | C2 | 251.1 | 261.9 |

3.5 Caracterización mediante instrumentos analíticos de muestras de geopolímero y cemento con y sin inhibidor

3.5.1 Difractometría de rayos X cuantitativa (QXRD)

Comparando la ilustración G.1 con G.2 y G.3 se puede observar una disminución de la fase mordenita y la aparición de otras fases como clinoptilolita, ambas una forma de zeolita.

Además, aparece la fase anortita, un calcio-aluminosilicato que se debe a la posible combinación del carbonato de calcio con la zeolita, lo que fundamenta la disminución de calcita. Un aspecto importante de recalcar es que no se han eliminado completamente las fases cristalinas ya que el análisis muestra un pequeño incremento en la fase amorfa del geopolímero con respecto a la zeolita lo que indica que la activación no tuvo gran éxito. Esto también se visualiza en el aumento de la sílice proveniente de la arena que no se disolvió correctamente. Esto explica que la resistencia a la compresión experimental no haya sido igual a la teórica.

La baja amorfización se debe a que la muestra de zeolita contenía una gran cantidad de calcita, que no forma parte de la reacción de geopolimerización

Comparando los análisis de los geopolímero con y sin inhibidor, se visualiza que la muestra con inhibidor tiene un porcentaje de fase amorfa más bajo que la muestra sin inhibidor lo que afirma el hecho de la baja resistencia a la compresión resultante de las muestras con el inhibidor.

Como se visualiza en la ilustración G.4, el cemento tiene un menor porcentaje de fase amorfa que el geopolímero, resultado que concuerda con las imágenes del SEM y con los resultados de resistencia a la compresión mayores que los del geopolímero. También se comprueba la presencia de yeso

3.5.2 Microscopía óptica de barrido (SEM)

En la microscopía de barrido mostrada en la ilustración 3.7 se puede observar una clara diferencia en el geopolímero y el cemento en términos de ordenamiento estructural. El geopolímero es más aglomerado y heterogéneo, lo que se comprobó en la síntesis por su consistencia pastosa. En la imagen 3.7 b) se visualiza una estructura ligada, no tan ordenada para considerarla una estructura cristalina, pero si menos amorfa que el geopolímero. Las partículas irregulares se las puede atribuir a la arena.

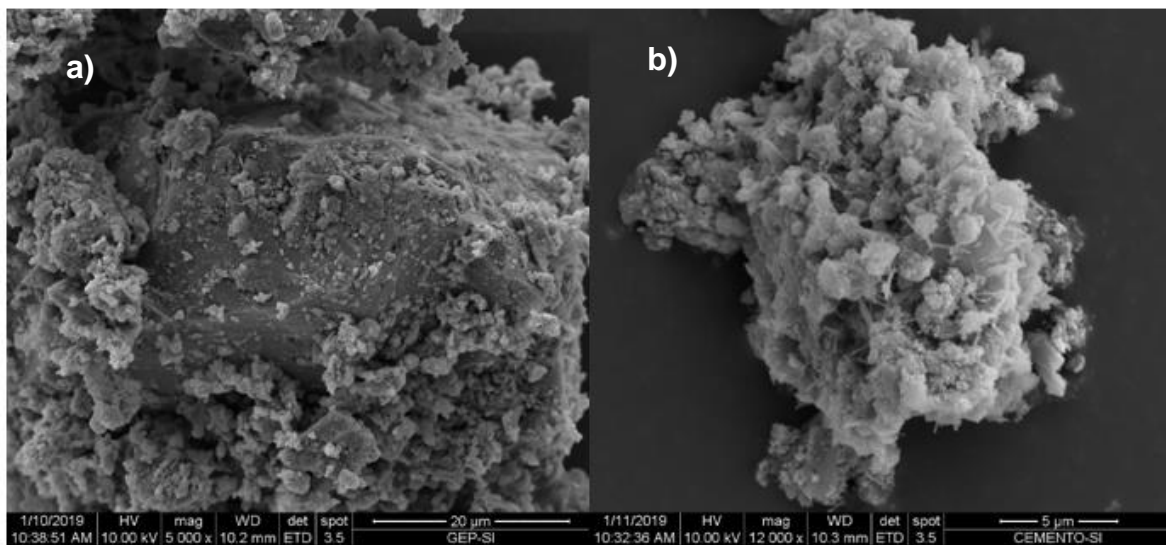


Ilustración 3.12 Micrografía SEM de muestra de: a) geopolímero, b) cemento

Comparando los análisis EDS de las figuras 3.8 y 3.1, la cantidad de calcio en la muestra de geopolímero ha disminuido de un 15% a 5% debido a que la muestra que se extrajo para el análisis fue del interior de los cubos y la carbonatación ocurre en la superficie. Otro efecto de la carbonatación que se observa es la disminución de carbono en la muestra con inhibidor.

Por otra parte, la cantidad de sodio y de oxígeno ha aumentado con respecto a la zeolita por la intervención del activador. Una manera de comprobar la reacción del álcali es la relación Si/Al, que debe ser alta por el silicato agregado, compuesto encargado de la buena compactación; como en la imagen 3.8 a) la relación es mayor que en la b), se comprueba que el inhibidor no favorece a la reacción; sin embargo, la relación debería ser aproximadamente 9 para lograr una mejor compactación del material (Ulloa, 2018)

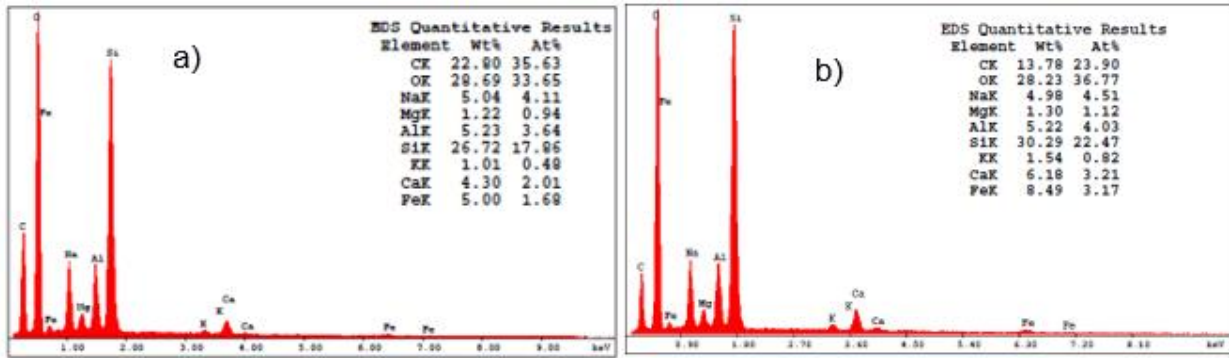


Ilustración 3.9 Caracterización EDS de la muestra de geopolímero a) sin inhibidor b) con inhibidor

Por otra parte, si se compara las ilustraciones 3.8 y 3.9 se puede observar una clara diferencia en el contenido de calcio otorgando una mayor probabilidad de carbonatación al cemento, que es uno de los principales factores que provocan la disminución en la durabilidad. Además, las dos muestras de cemento contienen azufre debido al yeso que se agrega después de la producción del clinker con el fin de retardar el tiempo de fraguado, resultado que concuerda con el análisis QXRD.

Finalmente, la zeolita presenta una mayor cantidad de hierro debido a las propiedades de adsorción de metales pesados que se pueden encontrar en las minas de extracción.

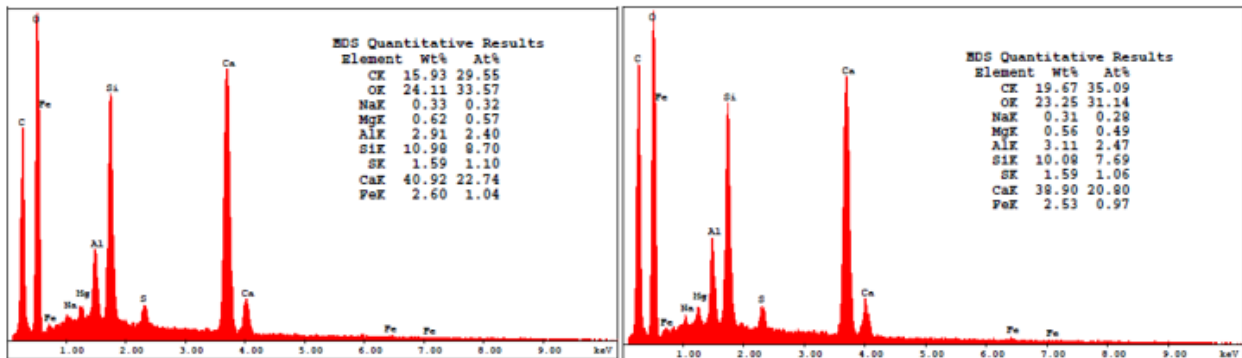


Ilustración 3.10 Caracterización EDS de la muestra de cemento a) sin inhibidor b) con inhibidor

3.5.3 Análisis termogravimétrico y cartometría diferencial de barrido (TGA-DSC)

En los termogramas expuestos en la ilustración 3.10 se puede con detalle la comparación entre las muestras de zeolita y geopolímero. En la imagen 3.10 a) se puede visualizar que las muestras de geopolímero entre si contienen aproximadamente la misma cantidad de agua debido a la deshidratación que sufrieron durante el curado. En esta imagen se destaca el cambio en la masa de las muestras por la carbonatación que ocurrió durante

el proceso de curado en el cual, una parte del carbono se convierte en gas carbónico y es liberado en la atmosfera, lo que concuerda con los análisis realizados de SEM y QXRD.

Por otro lado, en el análisis DSC mostrado en la ilustración 3.10 b) los picos endotérmicos alrededor de 700°C confirman la baja necesidad de calor para la eliminación del carbonato de calcio por la pérdida de masa que ya se detalló con anterioridad.

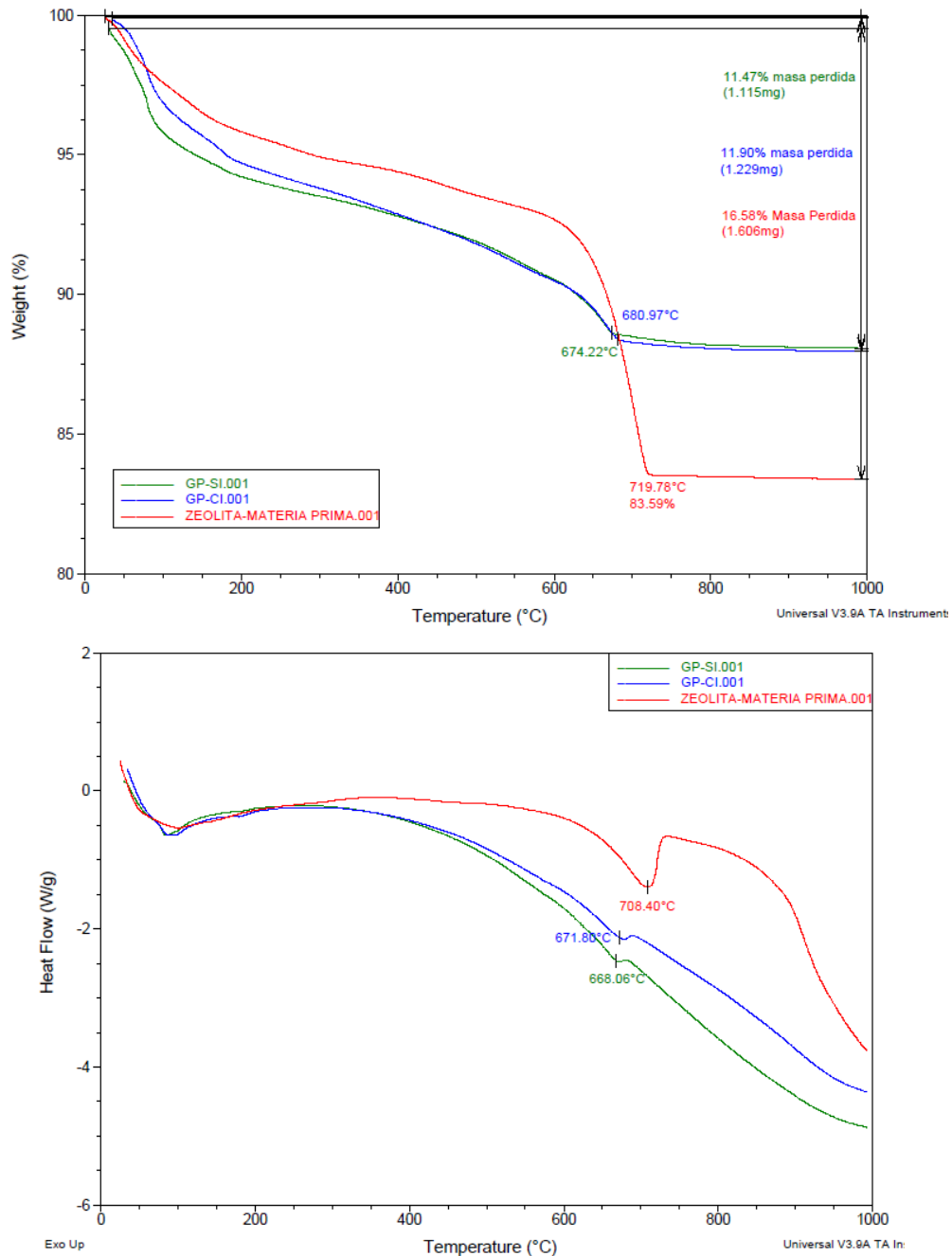


Ilustración 3.11 Termogramas sobrepuestos de las muestras de zeolita, geopolímero con y sin inhibidor: a) TGA, b) DSC

Analizando ilustración 3.11 en el literal a) para el caso del cemento, la muestra con inhibidor perdió más masa que la muestra sin inhibidor, lo que conlleva a deducir que, durante el tiempo de curado, en el mortero con inhibidor ocurrió más carbonatación, lo que resulta contradictorio con el papel que este químico desempeña.

El análisis DSC del literal b), a los 711°C se puede observar el pico endotérmico de la carbonatación más pronunciado en la muestra sin inhibidor, lo que concuerda con el análisis TGA.

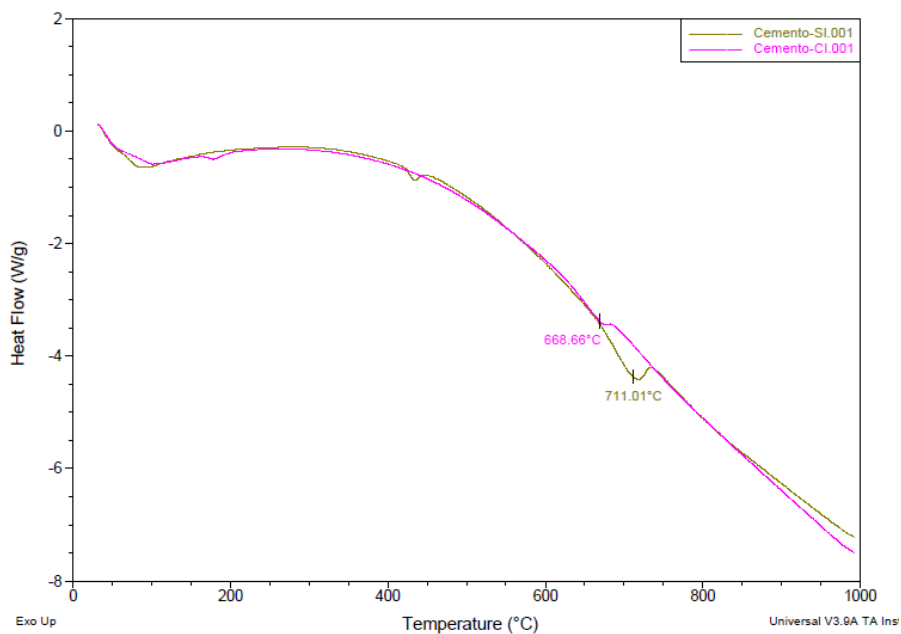
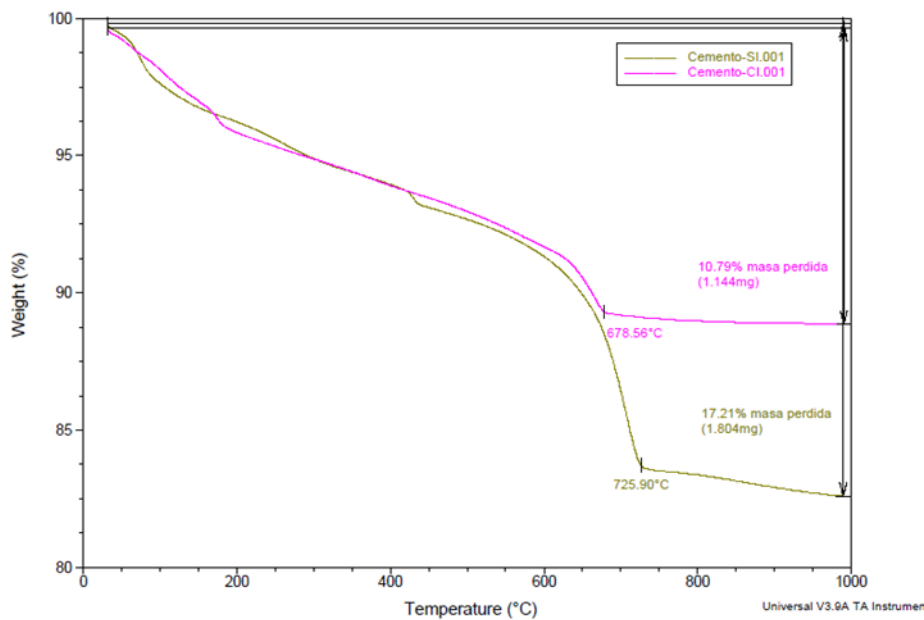


Ilustración 3.12 Termogramas sobrepuestos de las muestras de cemento con y sin inhibidor: a) TGA, b) DSC

3.5.4 Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

En los anales FTIR, la transmitancia es inversamente proporcional a la cantidad de moléculas presentes en la muestra a diferentes longitudes de onda. Para el caso del mortero de geopolímero ilustrado en la figura 3.12, la diferencia principal existe en la transmitancia en la longitud de onda para los enlaces C-O; la zeolita presenta mayor

concentración de carbonato de calcio que el geopolímero, resultado que coincide con la caracterización TGA realizada y analizada anteriormente

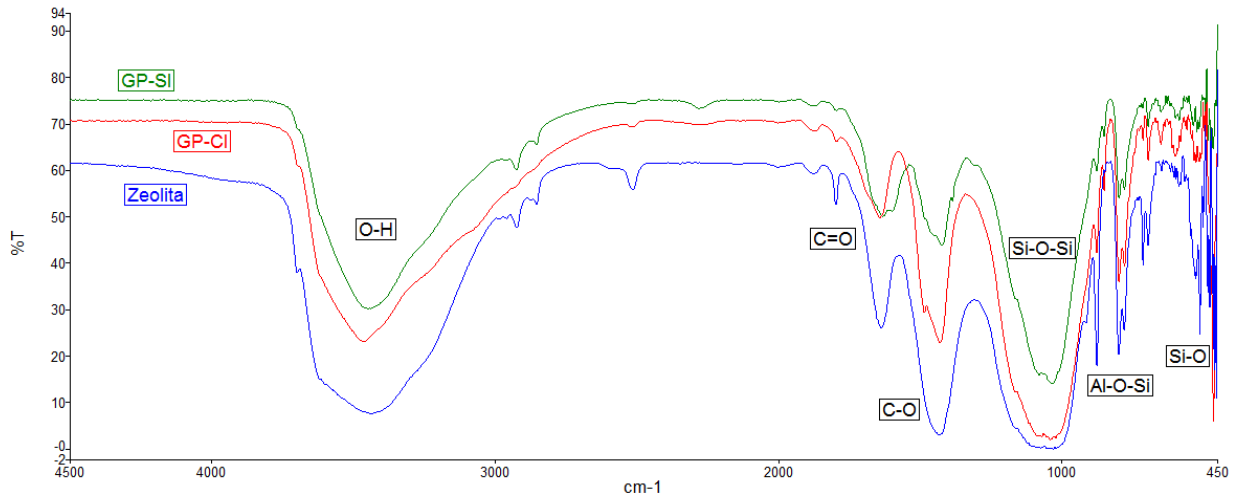


Ilustración 3.13 Análisis FTIR de la zeolita y del geopolímero

Con respecto al cemento, se confirma la presencia mayoritaria de los compuestos con enlaces carbonilos, en este caso, los carbonatos. Además, los picos en el área menor a 700cm⁻¹ son muchos menores, lo que certifica la presencia minoritaria de compuestos con silicio y aluminio. Comparando con base a la presencia del inhibidor, los resultados son similares a los detallados en el análisis TGA con un mayor porcentaje de carbonatos para el cemento sin el inhibidor.

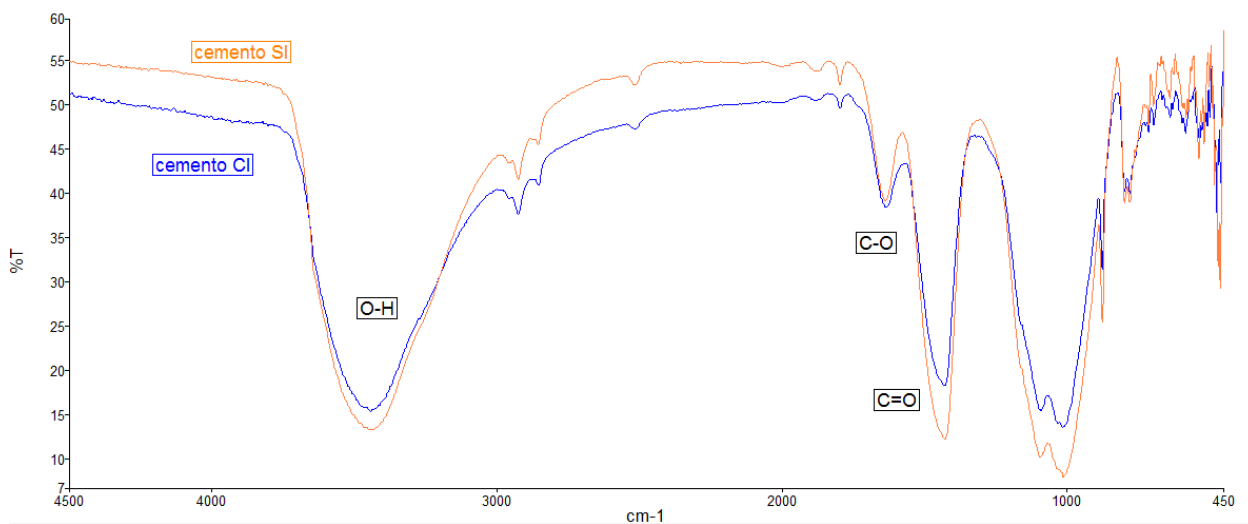


Ilustración 3.14 Análisis FTIR del cemento

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En base al presente trabajo experimental en el que se comparó la durabilidad de un hormigón de geopolímero frente a uno de cemento, se llegaron a las siguientes conclusiones:

De acuerdo con el ensayo de corrosión acelerada realizado para ambos materiales en condiciones de salinidad iguales, sometidos a un mismo voltaje y con una composición establecida por norma en el caso del cemento y una composición experimental con buenos resultados comprobados para el caso del geopolímero, el geopolímero basado en zeolita muestra una durabilidad mucho mayor que el cemento en el ámbito estructural. Las muestras de geopolímero no mostraron fractura durante los días que duró el monitoreo. La solución en la que estuvieron sumergidas las muestras de geopolímero presentó precipitación de sales, lo que no ocurrió para el caso del cemento. Esto se debe a que el cemento adsorbió mayor cantidad de iones debido a que su porosidad es más alta que la del geopolímero.

El inhibidor de corrosión es un material selectivo. No actúa sobre el geopolímero de la misma manera con la que actúa en el cemento. Durante el ensayo de corrosión se visualiza que el inhibidor retarda dicho proceso formando una capa pasiva sobre el metal. Caso contrario del geopolímero que no existe una diferencia significativa para las muestras con y sin inhibidor, es decir, la presencia de un inhibidor de corrosión en el geopolímero no es necesaria. Como se reveló en la caracterización, la presencia del inhibidor no favorece a la formación de la matriz geopolimérica, lo que disminuye la resistencia a la compresión.

En este estudio se demostró que el uso de una zeolita con una pureza relativamente baja repercute en la resistencia a la compresión negativamente. Esto se debe a que menos cantidad del aluminosilicato reacciona con el activador, y, por ende, las propiedades geopoliméricas disminuyen. Además, si la zeolita presenta calcita, durante del proceso de curado ocurrirá carbonatación, lo que debilitará la estructura. Sin embargo, la cantidad

de calcio contenida en el geopolímero es mucho menor que la presente en el cemento, lo que constituye un punto a favor del geopolímero. Estos resultados fueron revelados en la caracterización del material.

Las condiciones de curado para los dos materiales son muy diferentes debido a que las reacciones que ocurren. Dichas condiciones no resultarían convenientes para el caso del geopolímero debido a las temperaturas a las que habría que alcanzar para obtener una buena resistencia. Además, la mezcla geopolimérica es más difícil de trabajar que la mezcla de cemento debido a su viscosidad; lo que aumenta la probabilidad de la presencia de aire dentro de la mezcla. Sin embargo, cabe recalcar que la preparación de un mortero de este material como se detalla en esta investigación no sería la comercial.

La estructura del geopolímero es mucho más amorfa que la del cemento. Este resultado también influye en la resistencia a la compresión del geopolímero dado que la estructura de un material amorfo no es ordenada y, por lo tanto, no es resistente. El grado de amortización del geopolímero no fue el esperado debido a que la zeolita utilizada tenía una cantidad relativamente elevada de compuestos cristalinos.

Recomendaciones

Con esta investigación se logró obtener resultados aproximados del comportamiento de un geopolímero frente al cemento común en condiciones extremas en términos de resistencia y mineralógicos, pero *in situ*. Para lograr resultados más reales, es necesario que se realicen pruebas por un periodo más largo de tiempo, con un monitoreo constante y en el medio ambiente colocando probetas en diferentes zonas de la costa ecuatoriana ya que esto contemplaría fenómenos que no se pueden simular como oleajes, tormentas y demás sucesos naturales que están fuera del alcance de un laboratorio. Con una investigación como esta, se podría estimar la vida útil del geopolímero extrapolando los datos.

Otras investigaciones deberían enfocarse en sintetizar un polvo geopolimérico que contenga solo los reactivos utilizados aquí que, al agregarle solamente agua, se endurezca (como es el caso del cemento) para así favorecer a su comercialización. Otra opción es investigar cómo afectan las otras sales presentes en el agua de mar, otras condiciones meteorológicas que suceden en otras partes del mundo como las heladas y

realizar una comparación en el aspecto económico y ambiental del geopolímero y el cemento.

BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

- 318, C. A. (s.f.). *Protección del refuerzo contra la corrosión*. Obtenido de Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y comentario (ACI 318SR-05): https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf
- Alla, A. (Julio de 2016). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMATIVAS: ACI 318-14 Y EHE* 08. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17241/Akopova_Alla_TFG_2016.pdf?sequence=2
- ANNNA UNIVERSITY. (s.f.). *Methodología*. CHENNAI.
- ASTM C-109. (2008). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. EEUU.
- ASTM International. (1 de Mayo de 2007). *Standard Specification for Portland Cement*. EEUU.
- Callister, W. D. (2007). *Applications and Processing of Ceramics*. En W. D. Callister, *Materials Science and Engineering* (pág. 467). New York: John Wiley & Sons.
- Callister, W. D. (2007). *Forms of corrosion*. En W. D. Callister, *Materials Science and Engineering* (págs. 640-647). New York: Jhon Wiley and Sons.
- Chico, B., De la Fuente, D., Simancas, J., & Morcillo, M. (s.f.). *CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DE METALES. EFECTO DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS Y DE CONTAMINACIÓN*. Obtenido de CENIM: http://digital.csic.es/bitstream/10261/75874/4/Corrosi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica_metales_par%C3%A1metros.....pdf
- CORTEC. (s.f.). *MCI®-2005 NS*. Obtenido de <https://www.cortecvci.com/Publications/PDS/MCI-2005%20NS.pdf>
- Dariva, C., & Galio, A. (s.f.). *Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications*. Obtenido de INTECH : <https://cdn.intechopen.com/pdfs/46243.pdf>
- Davidovits, J. (2002). *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications Market Trends and Potential Breakthroughs*. Obtenido de Geopolymer: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf
- Diario Expreso. (5 de Octubre de 2016). *Investigan 96 edificios caídos durante el terremoto*. Obtenido de Diario Expreso:

<https://www.expreso.ec/actualidad/investigacion-edificios-caidos-terremoto-ecuador-manabi-esmeraldas-YA741472>

Flanigen, E. M., Broach, R. W., & Wilson, S. (2010). *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis. -Introduction*. Obtenido de https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527325050_c01.pdf

Frankel, G. (2016). *Fundamentals of Corrosion Kinetics*. Obtenido de Fontana Corrosion Center:

https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9789401775380-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1550684-p177861290

Guerra, J., Castañeda, A., & Howland, J. (11 de Octubre de 2016). *Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador*. Obtenido de Sistema de Información Científica: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal: <http://www.redalyc.org/html/1816/181648522003/>

Muñoz, F., & Mnedoza, C. (Julio de 2012). *La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto*. Obtenido de Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo: <http://www.redalyc.org/pdf/3612/361233551004.pdf>

Paredes, J., Prieto, J., & Santos, E. (s.f.). *Corrosion del acero en elementos de hormigón armado: Vigas y Columnas*. Obtenido de ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24384/1/Paper%20Paredes-Prieto.pdf>

Pechar, F., & Rykl, D. (31 de Julio de 1984). *Study of the thermal stability of the natural zeolite heulandite*. Obtenido de Institute of Geology and Geotechnics, Czechoslovak Academy of Sciences: https://www.chempap.org/file_access.php?file=393a369.pdf

Ulloa, N. (2017). *SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES/MORTERO DE GEOPOLÍMERO DE ZEOLITA NATURAL ECUATORIANA CON INHIBIDORES DE CORROSIÓN COMO UNA NUEVA ALTERNATIVA DEL HORMIGÓN*. Guayaquil.

Venkatesan, P. (1 de Enero de 2016). *Durability study on geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash*. Obtenido de Shodhganga : <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/handle/10603/119812>

Vizuete, V. (26 de Abril de 2016). *La mala construcción, un agravante del sismo*.
Obtenido de Diario El comercio:
<https://www.elcomercio.com/tendencias/malaconstruccion-agravante-sismo-ecuador-pedernales.html>

ANEXOS

A. ANEXO COMPRESIÓN

Tabla A.1 Compresión mecánica de muestras de geopolímero sin inhibidor

| Identificación | Carga máxima (kN) | Esfuerzo máximo (MPa) | Desplazamiento máximo (mm) |
|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| SI-1 | 21.7013 | 8.55684 | 1.682 |
| SI-2 | 19.5469 | 7.41512 | 3.774 |
| SI-3 | 30.4912 | 12.0912 | 2.838 |
| SI-4 | 31.0050 | 12.5129 | 2.217 |

Tabla A.2 Compresión mecánica de muestras de geopolímero con inhibidor

| Identificación | Carga máxima (kN) | Esfuerzo máximo (MPa) | Desplazamiento máximo (mm) |
|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| CI-1 | 34.3031 | 14.3691 | 2.684 |
| CI-2 | 27.2775 | 10.5327 | 1.508 |
| CI-3 | 16.3200 | 6.75855 | 3.024 |
| CI-4 | 24.9281 | 9.68722 | 2.254 |

Tabla A.3 Compresión mecánica de muestras de cemento sin inhibidor

| Identificación | Carga máxima (kN) | Esfuerzo máximo (MPa) | Desplazamiento máximo (mm) |
|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| SI-1 | 23.8725 | 9.20067 | 2.35400 |
| SI-2 | 24.2494 | 9.16737 | 2.63600 |
| SI-3 | 27.6169 | 10.6788 | 2.89000 |
| SI-4 | 19.8284 | 7.41874 | 2.14200 |

Tabla A.4 Compresión mecánica de muestras de cemento con inhibidor

| Identificación | Carga máxima (kN) | Esfuerzo máximo (MPa) | Desplazamiento máximo (mm) |
|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| CI-1 | 14.9606 | 5.66975 | 4.12800 |
| CI-2 | 33.2400 | 12.9686 | 3.05000 |
| CI-3 | 22.1194 | 8.42303 | 2.21100 |
| CI-4 | 24.2025 | 9.62322 | 2.81800 |

B. ANEXO PREPARACIÓN



Ilustración B.1 Molienda de zeolita



Ilustración B.2 Preparación del activador



Ilustración B.3 Preparación del geopolimero



Ilustración B.4 Colocación de mezcla de geopolímero en moldes para su posterior curado

C. ANEXO CORROSIÓN



Ilustración C.1 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada-muestra 1



Ilustración C.2 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 2



Ilustración C.3 Superficie de cilindro de geopolímero sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 3



Ilustración C.4 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1



Ilustración C.5 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2

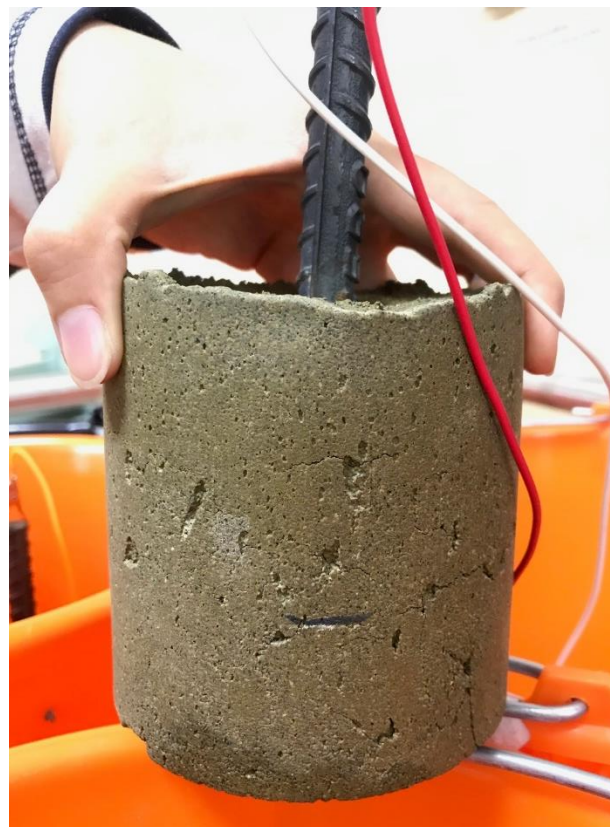


Ilustración C.6 Superficie de cilindro de geopolímero con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada - muestra 3



Ilustración C.7 Vista del sistema de corrosión acelerada para las muestras de geopolímero



Ilustración C.8 Toma de amperaje por cada cilindro

D. ANEXO CORROSION



Ilustración D.1 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1



Ilustración D.2 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2



Ilustración D.3 Superficie de cilindro de cemento sin inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 3



Ilustración D.4 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 1



Ilustración D.5 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 2



Ilustración D.6 Superficie de cilindro de cemento con inhibidor antes del ensayo de corrosión acelerada – muestra 3

E. ANEXO CORROSIÓN



Ilustración E.1 Manifestación del producto de la corrosión por los espacios entre la mezcla de concreto y la varilla en muestra de cemento con inhibidor a los 20 días



Ilustración E.2 Muestra de mortero de cemento sin inhibidor con rompimiento a los 27 días -replica 1



Ilustración E.3 Muestra de mortero de cemento sin inhibidor con rompimiento a los 27 días- replica 2

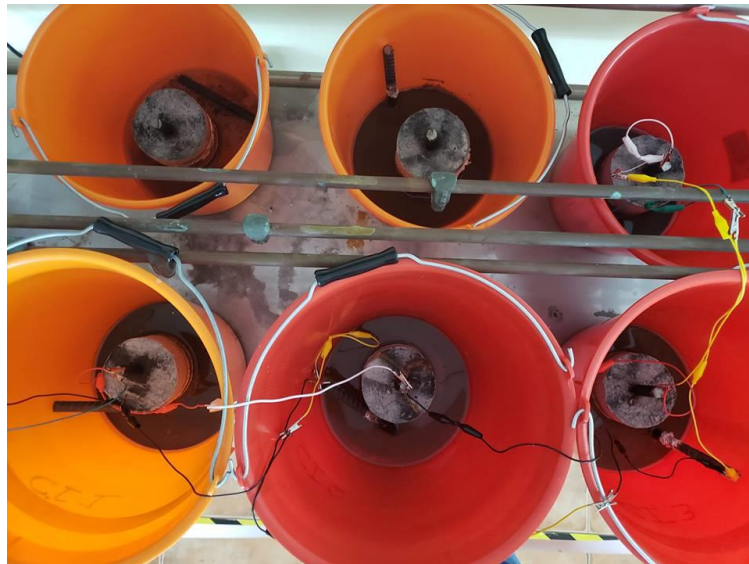


Ilustración E.4 Ensayo de corrosión acelerada para cemento al mes del inicio

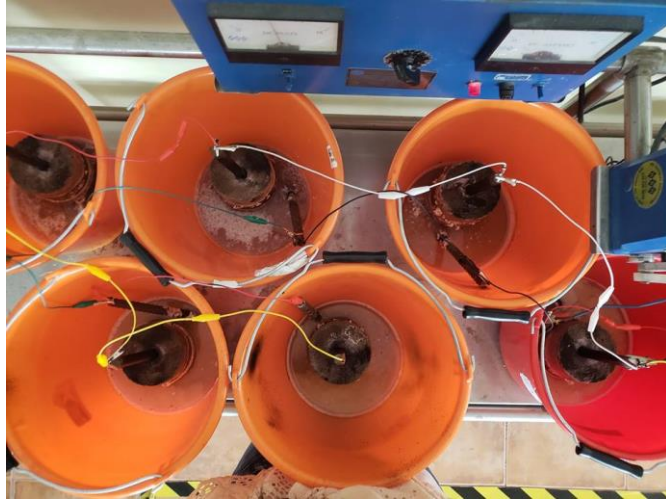


Ilustración E.5 Ensayo de corrosión acelerada para geopolímero al mes del inicio

F. ANEXO SEM-EDS

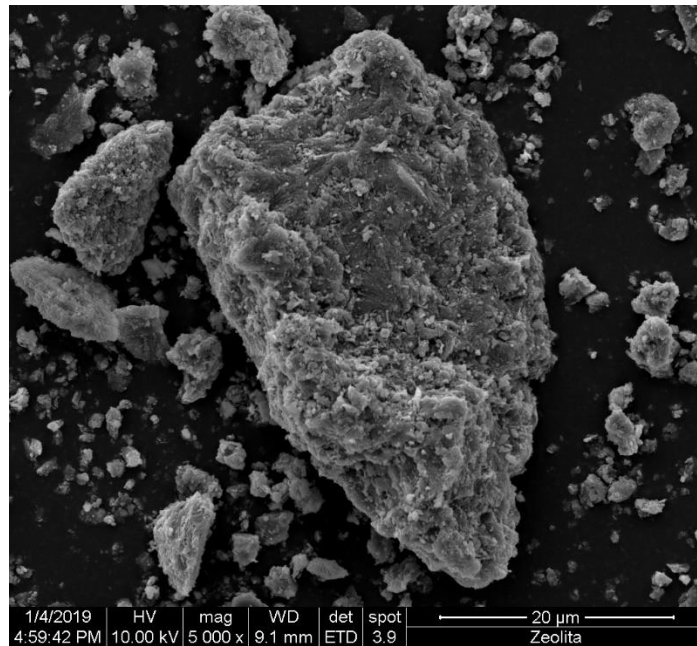


Ilustración F.1 SEM de zeolita

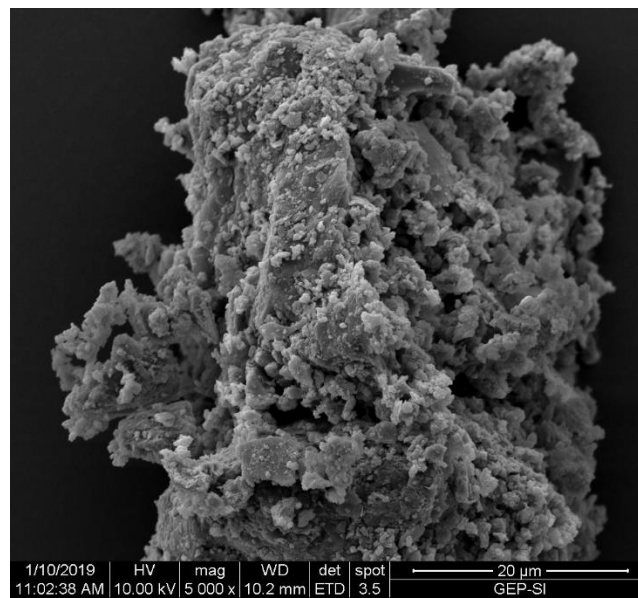


Ilustración F.2 SEM de mortero de geopolímero sin inhibidor

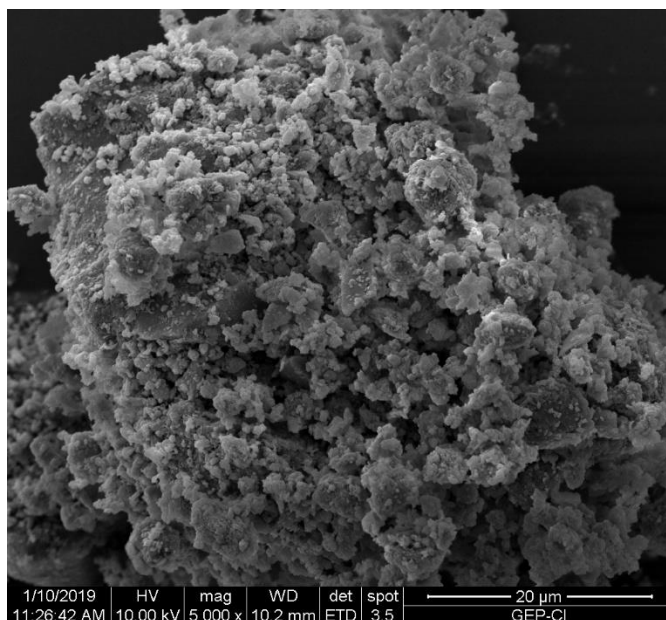


Ilustración F.3 SEM de mortero de geopolímero con inhibidor

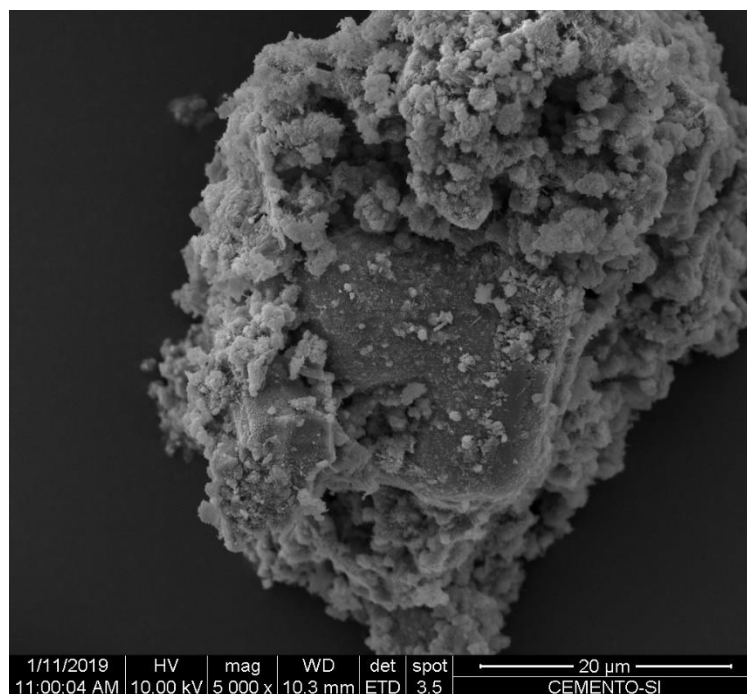


Ilustración F.4 SEM de mortero de cemento sin inhibidor

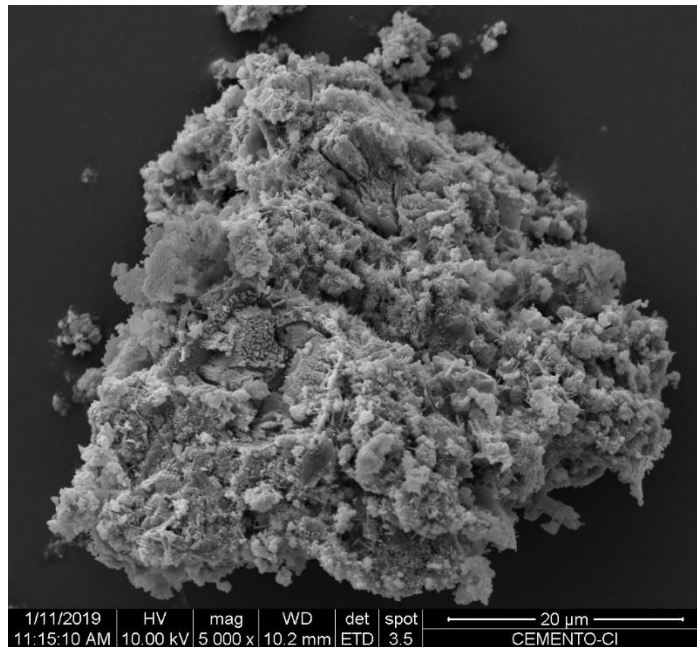


Ilustración F.5 SEM de mortero de cemento con inhibidor

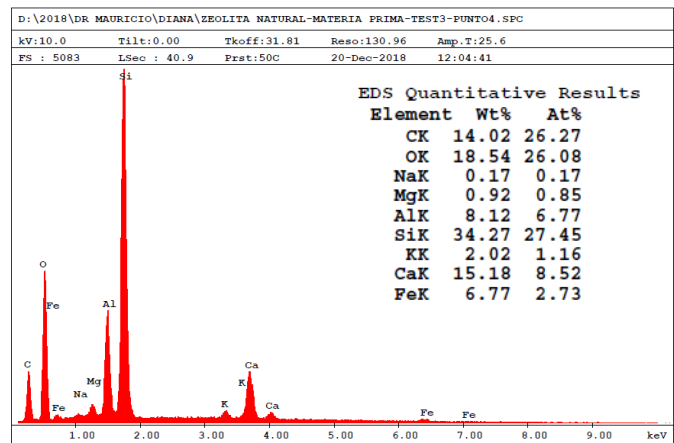
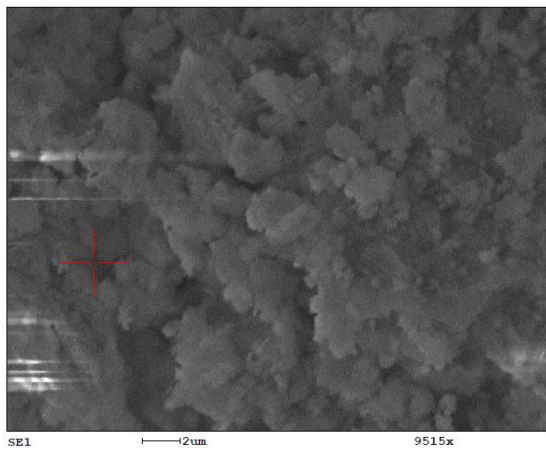


Ilustración F.6 EDS de zeolita

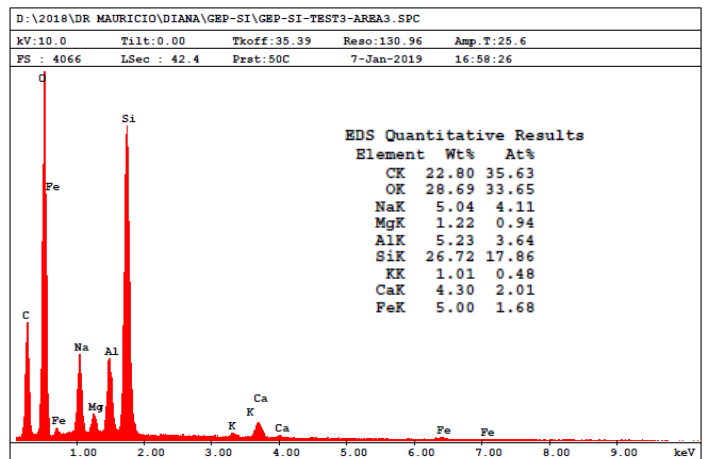
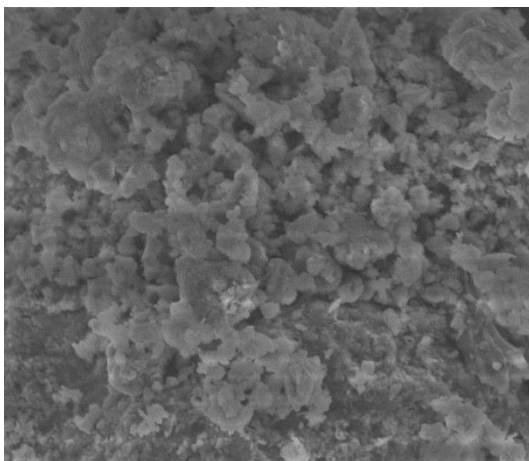


Ilustración F.7 EDS de mortero de geopolímero sin inhibidor

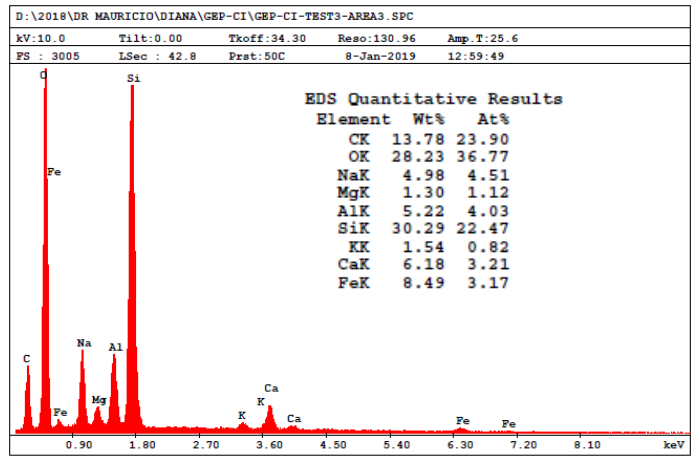
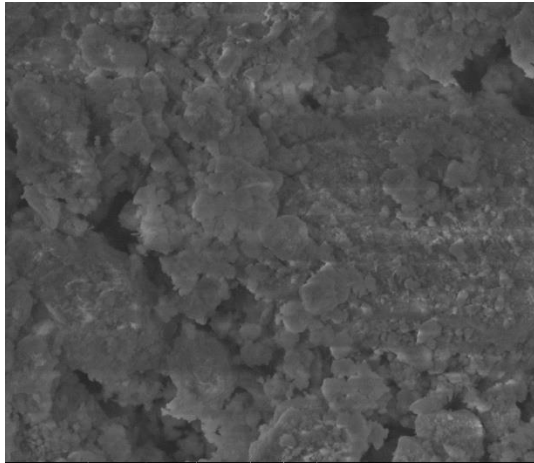


Ilustración F.8 EDS de mortero de geopolímero con inhibidor

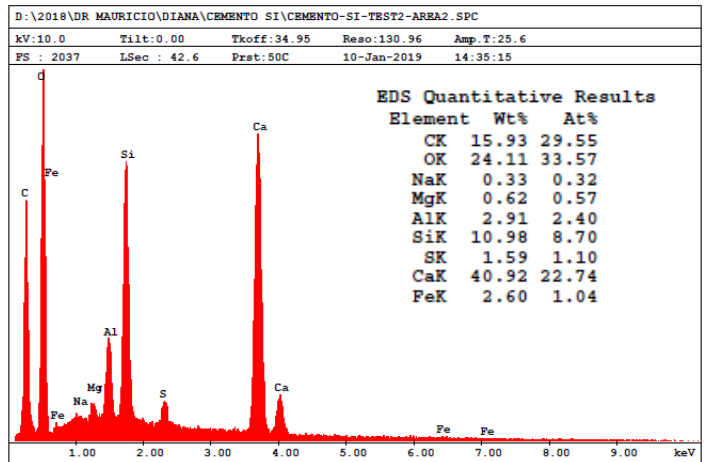
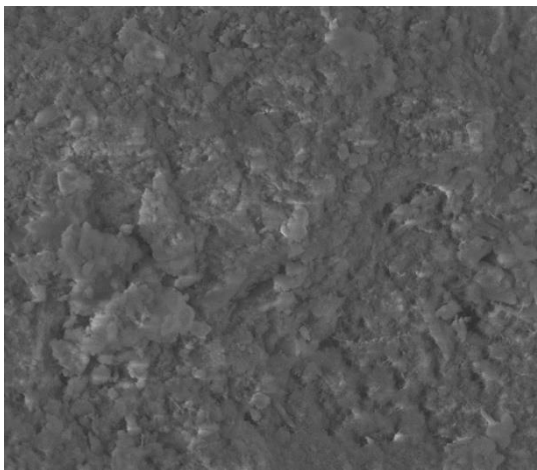


Ilustración F.9 EDS de mortero de cemento sin inhibidor

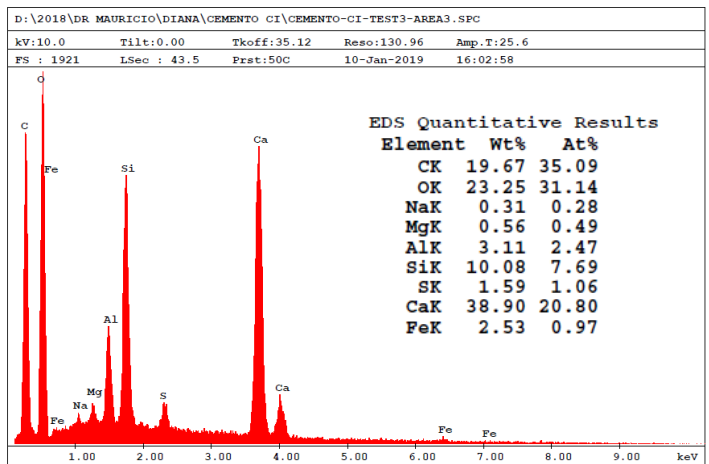
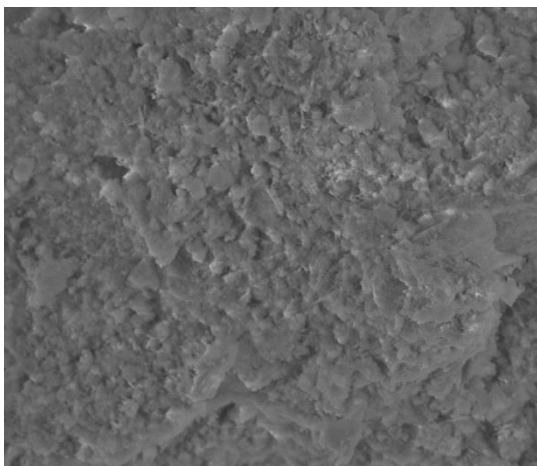


Ilustración F.10 EDS de mortero de cemento con inhibidor

G. ANEXOS QXRD

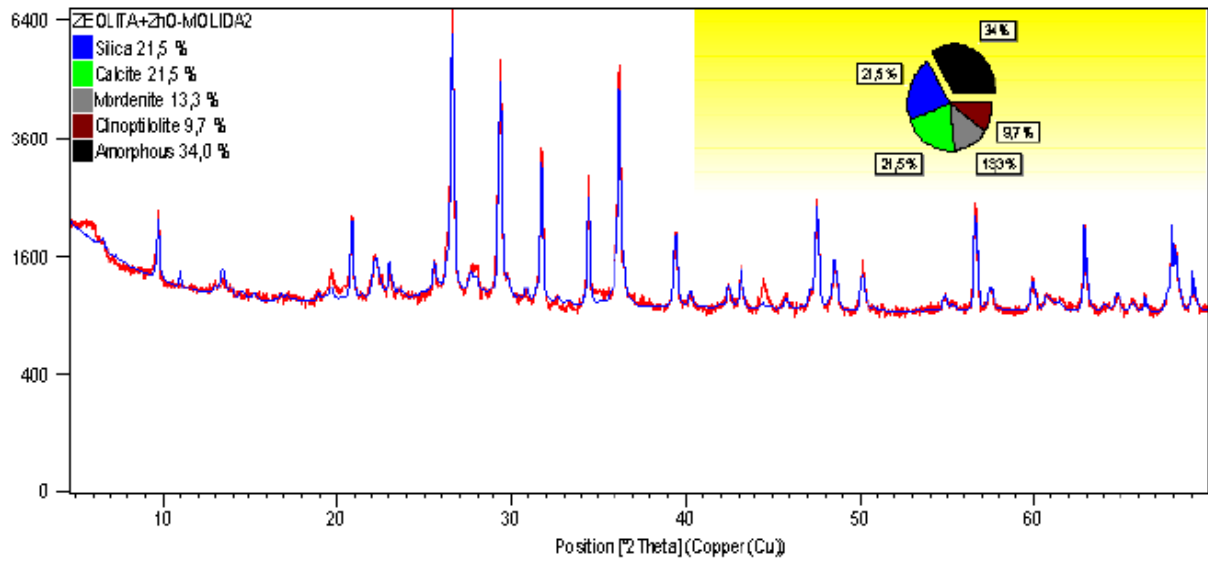


Ilustración G.1 QXRD de zeolita

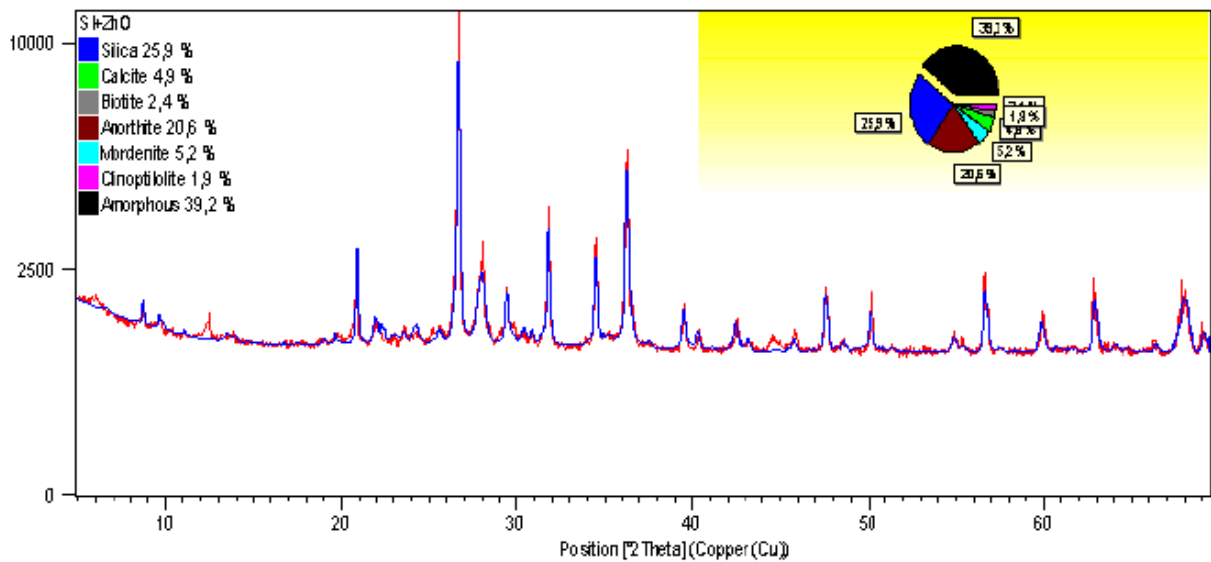


Ilustración G.2 QXRD de mortero de geopolímero sin inhibidor

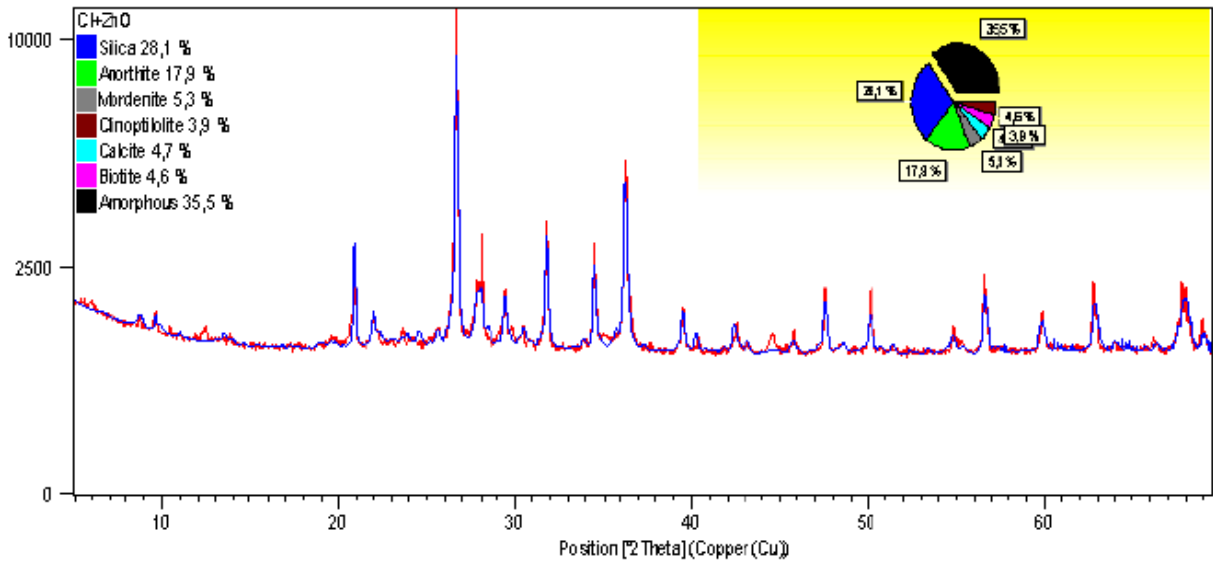


Ilustración G.3 QXRD de mortero de geopolímero con inhibidor

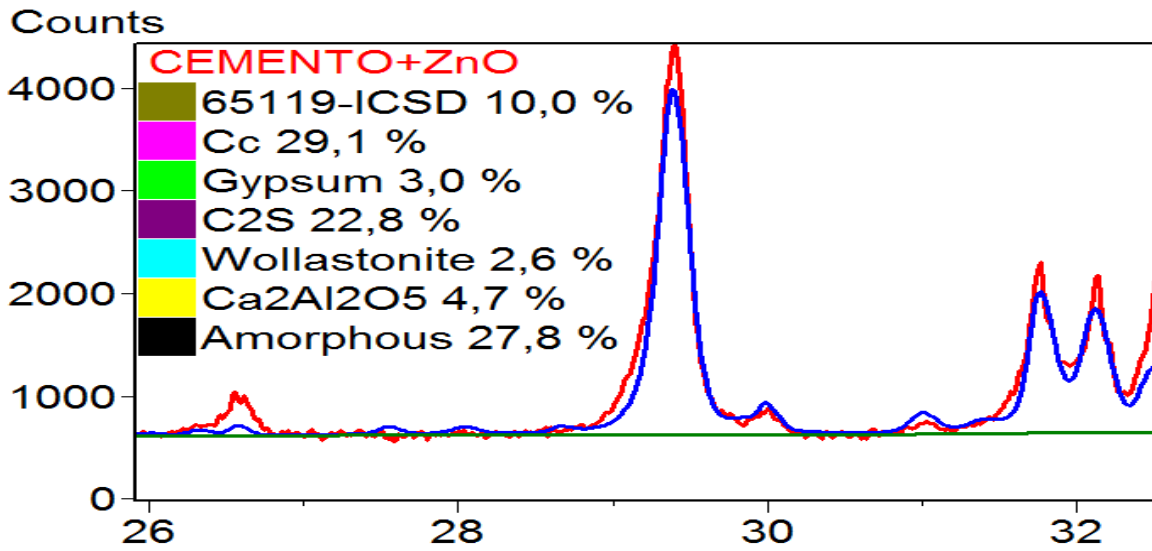


Ilustración G.4 QXRD de mortero de cemento

H. ANEXOS TGA-DSC

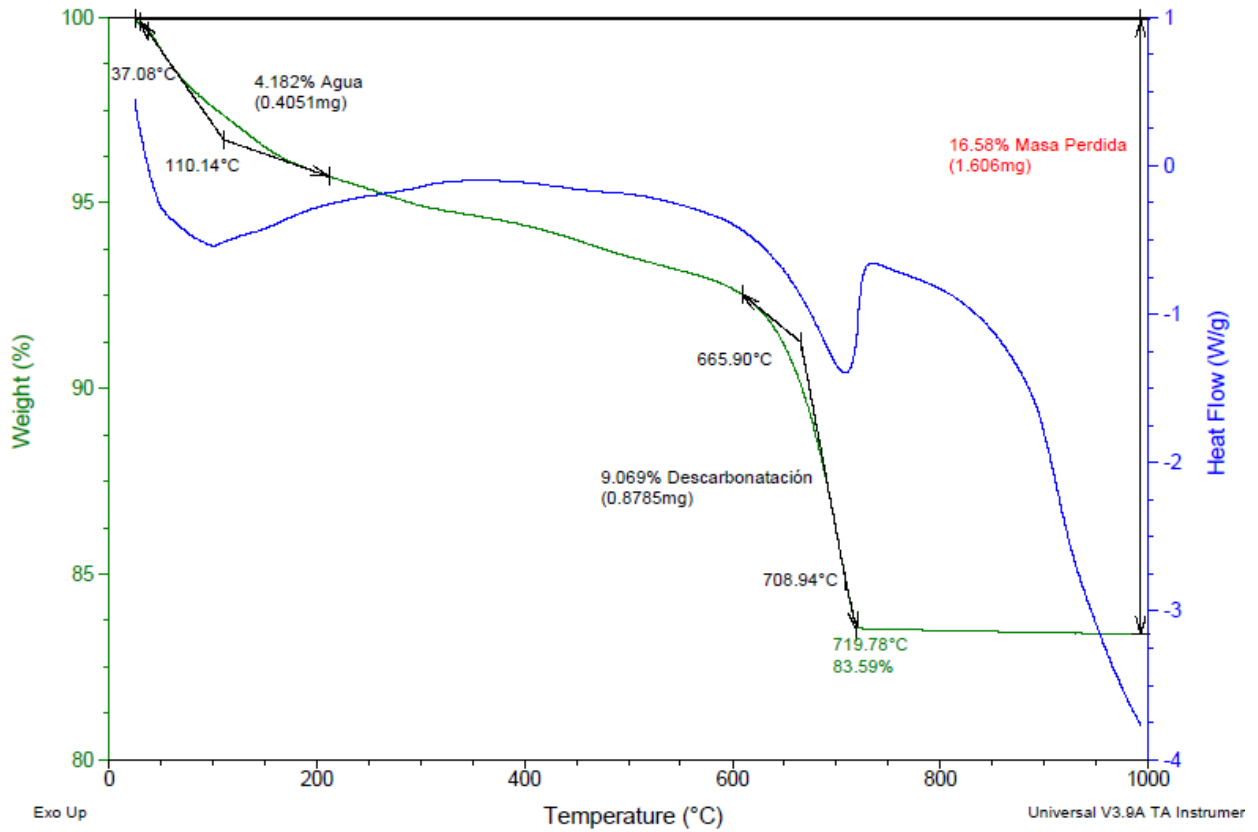


Ilustración H.1 TGA-DSC de zeolita

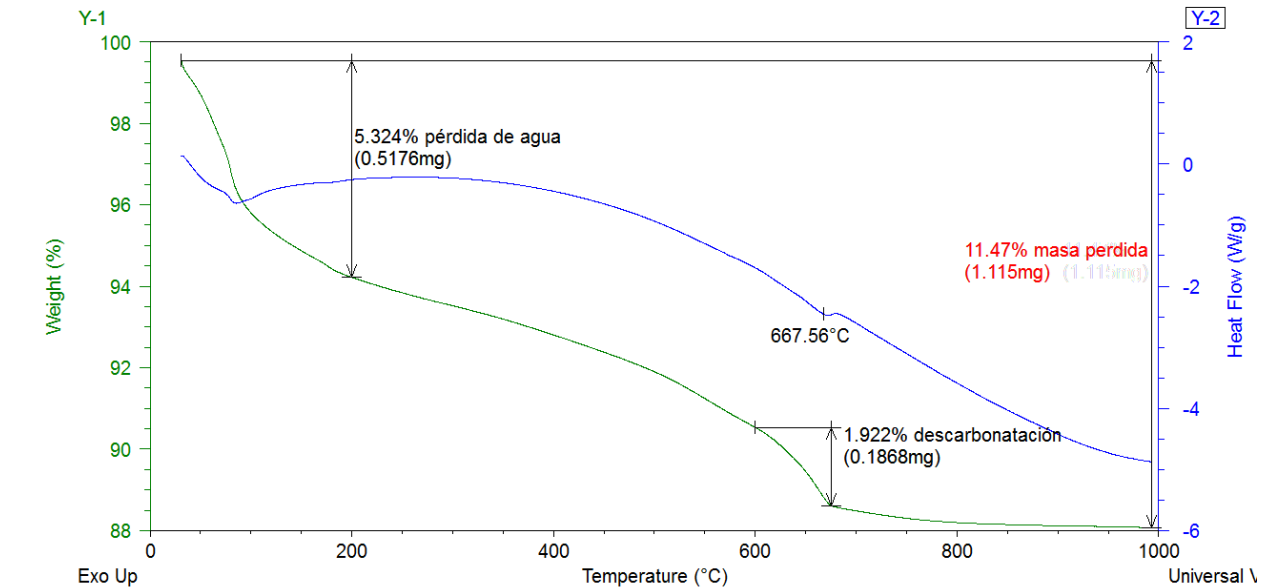


Ilustración H.2 TGA-DSC del mortero de geopolímero sin inhibidor

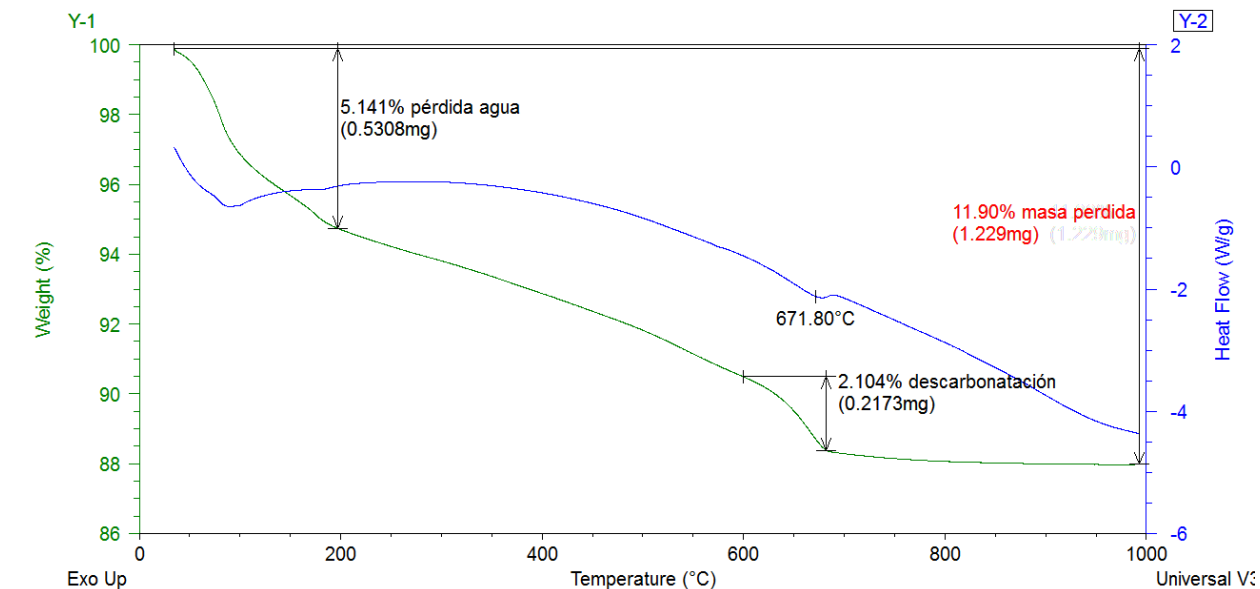


Ilustración H.3 TGA-DSC del mortero de geopolímero con inhibidor

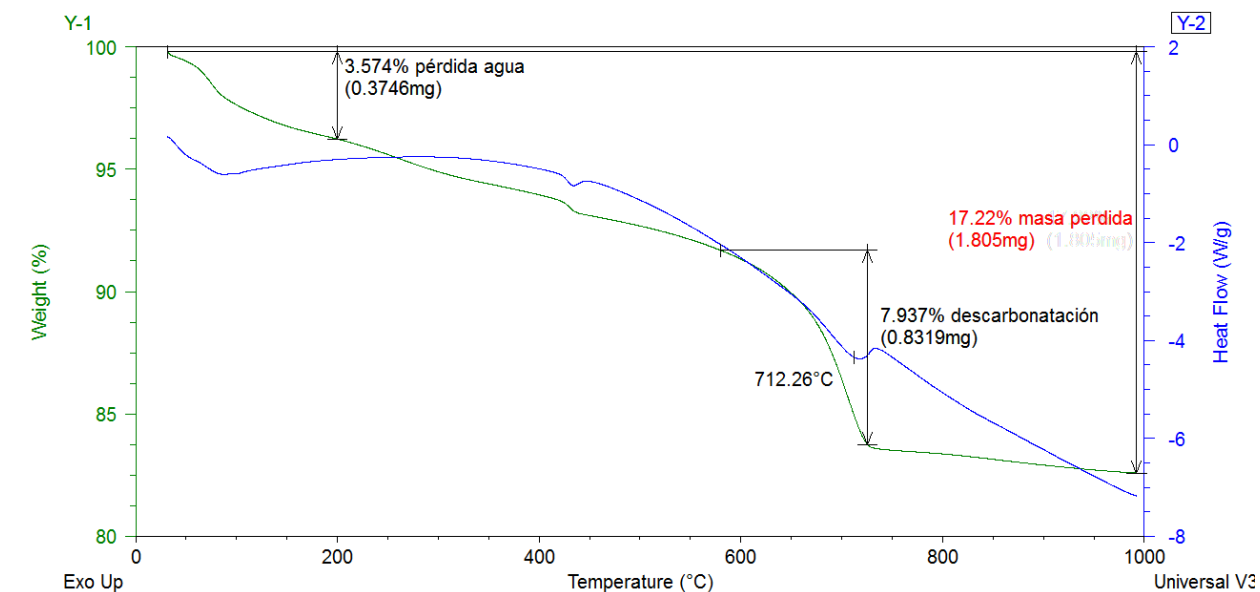


Ilustración H.4 TGA-DSC del mortero de cemento sin inhibidor

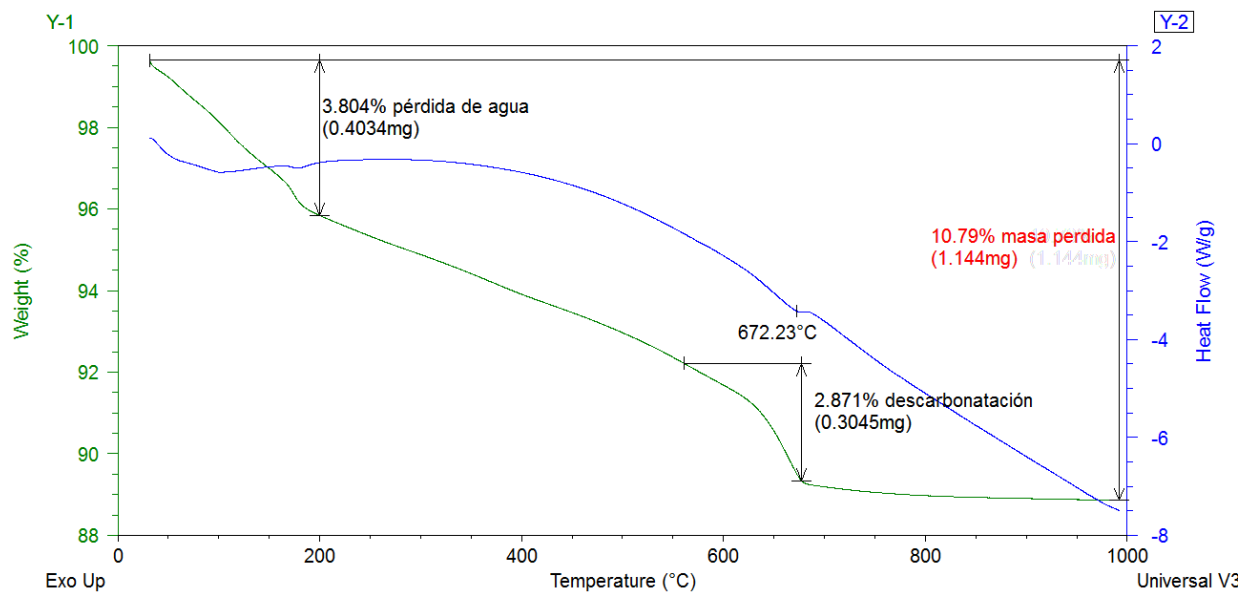


Ilustración H.5 TGA-DSC del mortero de cemento con inhibidor

I. ANEXOS FTIR

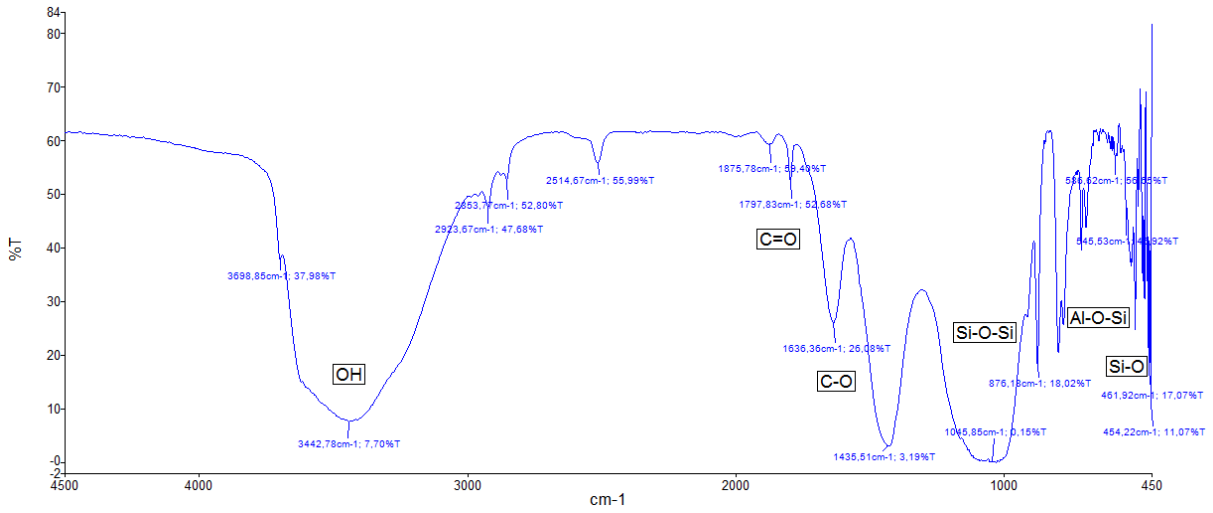


Ilustración I.1 FTIR de zeolita

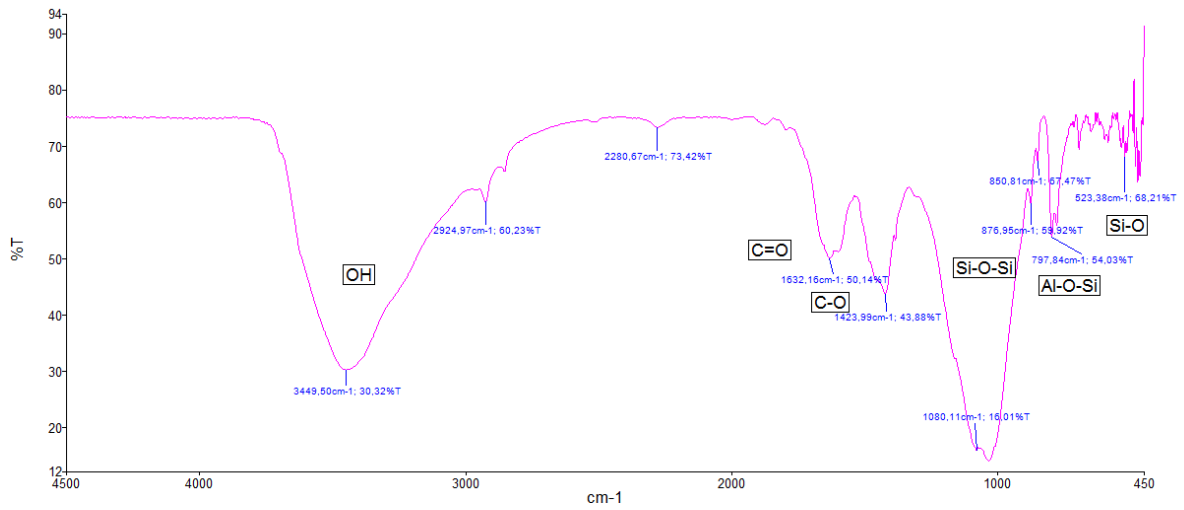


Ilustración I.2 FTIR del mortero de geopolímero sin inhibidor

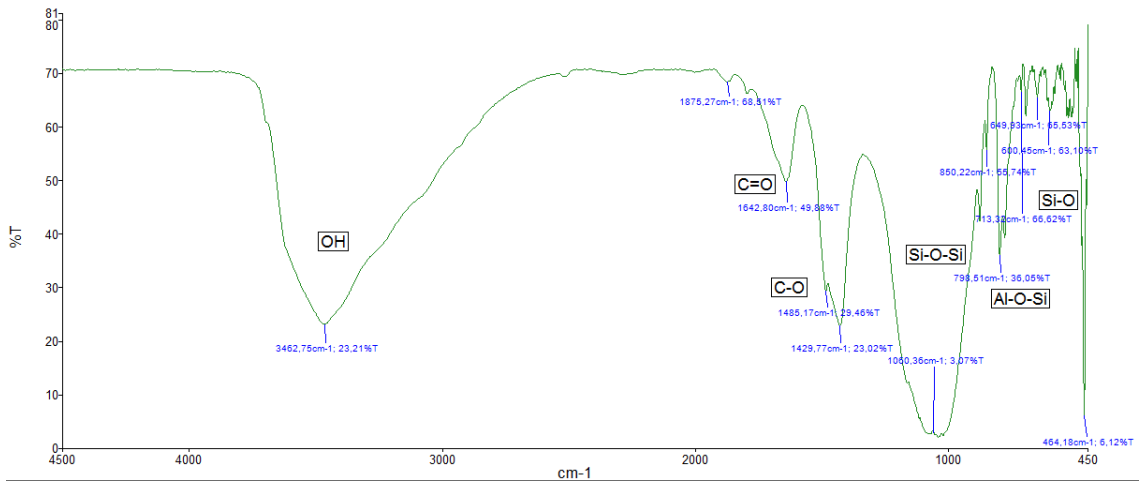


Ilustración I.3 FTIR del mortero de geopolímero con inhibidor

J. ANEXOS RESISTENCIA AMBIENTAL



Ilustración J.1 Ensayo de resistencia inicial a los diferentes ambientes: agua de mar, Ácido clorhídrico 3%, Ácido sulfúrico 3% respectivamente



Ilustración J.2 Ensayo de resistencia a los diferentes ambientes con avance de un mes: Ácido clorhídrico 3%, Ácido sulfúrico 3% respectivamente