

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del desempeño de morteros innovadores de Geopolímeros, cementos híbridos y cemento Portland a través de indicadores de durabilidad como el coeficiente de difusión, resistencia a la corrosión acelerada y resistividad eléctrica.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN CONSTRUCCIÓN Y
SANAMIENTO**

Presentado por:

SANTANA SANTANA CRISTOBAL EDILBERTO

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios,
a mis padres y a Cristobalito,
Esperando que algún día veas este
proyecto y te motive a continuar con
este legado.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la facultad de ingeniería en ciencias de la tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a todos sus profesores y a los profesionales que me brindaron su apoyo durante el tiempo en el que se desarrolló esta maestría.

Declaración Expresa

Yo SANTANA SANTANA CRISTOBAL EDILBERTO acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 4 de diciembre del 2024.

Santana Santana Cristobal Edilberto

EVALUADORES

MSc. Nadia Quijano

PROFESOR DE LA MATERIA

Msc. Samantha Hidalgo

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Mauricio Cornejo
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las estructuras de hormigón armado son susceptibles a la degradación a través del tiempo debido a agentes externos, malas dosificaciones entre otros factores. Estos elementos afectados aceleran problemas de corrosión de la barra de acero de reforzamiento, que eventualmente reducen drásticamente el tiempo de vida útil de las infraestructuras. El presente estudio plantea realizar un análisis de muestras de hormigones noveles, tales como Geopolímeros y cementos híbridos, que serán sometidas a los ensayos de corrosión acelerada, resistividad eléctrica y difusión de cloruros, comparándose con los hormigones a base de cemento comercial. Estos ensayos permitirán establecer indicadores de durabilidad que ayudarán a evaluar el desempeño de nuevos materiales de construcción estructurales, hecho con materia prima local, con baja huella de carbono, contribuyendo a la sostenibilidad de la industria de construcción ecuatoriana.

Los resultados obtenidos luego de realizar los ensayos de laboratorio demostraron que las muestras de Geopolímeros presentaron una menor corrosión en la barra de acero de refuerzo, tuvieron una menor permeabilidad frente a la penetración de cloruros y resistieron un mayor paso de corriente eléctrica a través de la muestra en comparación con los cementos híbridos y el cemento tradicional.

Con esto podemos establecer que de los Geopolímeros tienen un buen desempeño frente a estos agentes externos que ocasionan daños en la integridad de las edificaciones y podrían ser utilizados como materiales de construcción.

Palabras Clave: Geopolímeros, Corrosión Acelerada, Cemento Híbrido, Resistividad Eléctrica, Difusión de cloruros.

ABSTRACT

Concrete reinforced structures are susceptible to degradation over time due to external agents, poor dosages, among other factors. These affected elements accelerate corrosion problems of the reinforcing steel bar, which eventually reduce the useful life of the infrastructure. The present study proposes to carry out an analysis of samples of novel concretes, such as Geopolymers and hybrid cements, which will be subjected to accelerated corrosion, electrical resistivity and chloride diffusion tests, comparing them with commercial cement-based concretes. These tests will establish durability indicators that will help evaluate the performance of new structural construction materials, made with local raw materials, with a low carbon footprint, contributing to the sustainability of the Ecuadorian construction industry.

The results obtained after carrying out the laboratory tests demonstrated that the Geopolymer samples presented less corrosion in the reinforcing steel bar, had a lower permeability against the penetration of chlorides and resisted a greater passage of electric current through the shown in comparison with hybrid cements and traditional cement.

With this we can establish that Geopolymers have good performance against these external agents that cause damage to the integrity of buildings and could be used as construction materials.

Keywords:

Geopolymers, Accelerated Corrosion, Hybrid Cement, Electrical Resistivity, Chloride Diffusion.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	5
RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	10
Introducción	10
1.1 Antecedentes	12
1.2 Estudios previos	13
1.3 Definición del problema	14
1.4 Justificación	14
1.5 Objetivos.....	15
1.5.1 Objetivo General	15
1.5.2 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO 2	16
Desarrollo del proyecto	16
2.1 Marco Conceptual.....	16
2.1.1 Corrosión Acelerada.....	16
2.1.2 Resistividad eléctrica.....	17
2.1.3 Difusión de cloruros.....	18
2.1.4 Cementos híbridos	20
2.1.5 Geopolímeros.....	20

2.1.6	Durabilidad	20
2.1.7	Cloruros.....	20
2.1.8	Zeolita	20
2.1.9	Nitrato de plata	21
2.2	Marco metodológico	21
2.2.1	Materiales.....	21
2.3	Preparación de muestras.....	22
2.3.1	Trabajo de laboratorio o gabinete.....	23
CAPÍTULO 3		31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		31
3.1	Resultados.....	31
3.1.1	Ensayo de corrosión Acelerada	31
3.1.2	Ensayo de resistividad eléctrica	38
3.1.3	Ensayo de difusión de cloruros	40
3.2	Análisis de resultados	43
3.2.1	Corrosión Acelerada.....	43
3.2.2	Resistividad Eléctrica	44
3.2.3	Difusión de cloruros.....	45
CAPÍTULO 4		46
Conclusiones Y Recomendaciones		46
Conclusiones		46
Recomendaciones		47
BIBLIOGRAFÍA		48
PLANOS Y ANEXOS		50

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de ensayo de materiales
CIDNA	Ciencia y desarrollo de Nanotecnología
REH	Resistividad Eléctrica Húmeda
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
SAP	silicoaluminofosfato
FICT	Facultad de ingeniería en ciencias de la tierra

SIMBOLOGÍA

a/mc	Relación agua-materiales cementantes
NaOh	Hidróxido de sodio
AgNo ₃	Nitrato de plata
NaCl	Cloruro de sodio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sodio
mm	milímetros
V	Voltaje
G	gramo
L	Litro
cm	Centímetro
CT	Cemento Tradicional
CH	Cemento Híbrido
GP	Geopolímeros
Dnssm	Coeficiente de migración en estado no estacionario
C Prom	Corriente Promedio
CNF	Nano fibras de carbono
xd	Penetración promedio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ensayo de corrosión Acelerada(NT BUILD 356, 1989).....	17
Figura 2 Procedimiento de Ensayo de resistividad eléctrica(Madhavi & Annamalai, 2016).....	17
Figura 3 Corrientes iniciales y corregidas(NT BUID 492, 1999).	18
Figura 4 Ensayo de Difusión de cloruros(NT BUID 492, 1999).....	19
Figura 5 Metodología de trabajo	22
Figura 6 Preparación del Hidróxido de Sodio	23
Figura 7 Fabricación de Cilindros	25
Figura 8 Desmoldado y Curado de Cemento tradicional y Cemento hibrido	26
Figura 9 Reacciones en Geopolímeros.....	26
Figura 10 Muestras Listas a ensayar	27
Figura 11 Distribución de Canales de medición.....	27
Figura 12 Fuente de Corriente Continua y equipo de medición.....	28
Figura 13 Montaje de ensayo de Corrosión Acelerada	28
Figura 14 Montaje ensayo de Resistividad electrica	29
Figura 15 Montaje Ensayo de Difusión de Cloruros.....	30
Figura 16 Corrosión en muestras de CT y CH.....	31
Figura 17 Corrosión en muestras de Geopolimeros	31
Figura 18 Falla de Cilindros	32
Figura 19 Corrosión en barra de Acero.....	32
Figura 20 Perdida de Peso en Barra de Acero	33
Figura 21 Corrosion de placas de Acero Inoxidable	34
Figura 22 Grafica Corriente-Tiempo Cemento tradicional (CT)	34
Figura 23 Grafica Corriente - tiempo Cemento Hibrido (CH)	35
Figura 24 Grafica Corriente - tiempo Geopolímeros (GP).....	36
Figura 25 Mejores Desempeños (CT, CH, GP).....	36
Figura 26 Resistividad Eléctrica en Cemento tradicional.....	38
Figura 27 Resistividad eléctrica en Cemento Hibrido	39
Figura 28 Resistividad Eléctrica Geopolímeros	39

Figura 29 Penetración de Cloruros en CT y CH.....	40
Figura 30 Penetración de Cloruros en Geopolímeros.....	40
Figura 31 Grafica de penetración de cloruros CT	41
Figura 32 Grafica de penetración de cloruros CH.....	42
Figura 33 Grafica de penetración de cloruros GP.....	42
Figura 34 Desempeño ensayo de Corrosión Acelerada	43
Figura 35 Desempeño Ensayo de resistividad Electrica.....	44
Figura 36 Permeabilidad en muestras ensayadas Dnssm.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades Geométricas del molde cilíndrico	22
Tabla 2 Dosificación Cemento Tradicional.....	24
Tabla 3 Dosificación Cemento Híbrido.....	24
Tabla 4 Dosificación Geopolímeros	25
Tabla 5 Pérdida de peso en barras de acero.....	33
Tabla 6 Pérdidas de peso - duración	37
Tabla 7 Datos tomados ensayo de REH.....	38
Tabla 8 Datos de cilindros para cálculo del (D_{nssm}).....	41
Tabla 9 Duración del ensayo - Corriente promedio.....	43

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El cemento Portland es considerado el material de mejor calidad en la construcción ya que, a día de hoy, no hay ningún conglomerante que posea la aceptación que posee este material. Esto es debido, principalmente, a su bajo costo y a que las materias primas a partir de las cuales se fabrica pueden encontrarse prácticamente en todo el mundo (Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

La durabilidad del concreto es la capacidad para resistir la acción de la intemperie, ataques químicos, abrasión y otras condiciones de servicio que se ve afectada por la resistencia del concreto a la penetración de fluidos, por la relación a/mc y por la composición de los materiales cementantes utilizados en el concreto (ACI-318, 2022).

Las condiciones ambientales son los principales factores que aceleran la carbonatación del hormigón, causadas por el acceso de oxígeno a la armadura, la humedad y la temperatura que acortan el tiempo de vida útil de la armadura (Perepérez Ventura et al., 1987). Las edificaciones en ambientes tropicales son más susceptibles a sufrir corrosión debido a la salinidad del agua de mar transportada por la brisa marina.

La sostenibilidad de las estructuras de hormigón armado se ve afectada por la corrosión de acero de refuerzo, que implica una merma de la seguridad estructural, la disminución de la vida útil altos costos en reparaciones que determinan que las estructuras no sean sustentables (Cabrera et al., 2012).

Sin embargo, hoy en día existen elementos alternativos utilizando aluminosilicatos naturales y subproductos industriales para la fabricación de materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente que poseen mejores propiedades térmicas, mecánicas y químicas, así como la eficiencia energética en su proceso de fabricación, los cuales han demostrado características y ventajas específicas en comparación con el cemento Portland convencional(Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

Entre las propiedades del hormigón que afectan significativamente al proceso de corrosión se encuentran la resistividad eléctrica, y el coeficiente de difusión de cloruros. Por un lado, para determinar coeficientes de difusión de cloruros se aplican ensayos de difusión y migración(Díaz et al., 2006). En este sentido, una manera de obtener resultados en el menor tiempo posible es mediante ensayos de corrosión acelerados, con estos simulamos el comportamiento que va a tener el material ensayado en un periodo de tiempo más corto, Una ventaja de este tipo de ensayo es que no es necesario esperar que pase el tiempo para recién tomar un testigo y ensayarlo. Por otro lado, la resistividad eléctrica es un indicador de la porosidad del concreto a mayor resistividad menor porosidad, mientras más alta sea la porosidad la permeabilidad será baja lo cual da origen al paso de humedad que puede empezar el proceso de corrosión.

En este proyecto se plantea comparar los factores de durabilidad de tres mezclas de mortero preparadas en los laboratorios de ESPOL como lo son: el mortero tradicional (agua, arena y cemento), el cemento híbrido el cual es una mezcla de mortero tradicional y Geopolímeros (está constituido por hidróxido de sodio, silicato de sodio, zeolita y calcita) para los cuales determinaremos cuanto es la penetración de los cloruros mediante el ensayo de migración de cloruros, la resistividad eléctrica que tienen estos tres tipos de materiales y cuál es el tiempo en el que se presentan fisuras debido a la oxidación en las barras de acero o en las probetas sometidas al ensayo de corrosión acelerada.

1.1 Antecedentes

La corrosión es un problema principal en la construcción que pone en peligro la integridad estructural, para ello se realizan un análisis detallado de los factores que contribuyen a la corrosión y con lo que podemos generar un informe de rehabilitación de edificaciones para tomar acción en posibles medidas preventivas y evitar que se genere un mayor daño(Luiza da Silva et al., 2018).

Este problema plantea desafíos significativos para el campo de la ingeniería civil, ya que debe abordarse mediante el desarrollo e implementación de materiales y soluciones alternativas viables que utilicen recursos locales disponibles. Esto indica la necesidad de técnicas de construcción y materiales mejorados que puedan resistir los efectos de la exposición ambiental a largo plazo. Además, la corrosión del refuerzo de acero se ha identificado como un desafío tecnológico importante, que requiere estrategias innovadoras para predecir de manera confiable el rendimiento a largo plazo en las condiciones de servicio reales.

El desarrollo de cementos que sean una alternativa a Cementos Portland, obtenidos mediante procesos que implican menores emisiones de CO₂ a la atmósfera y un importante ahorro energético, es una línea prioritaria de investigación de gran interés mundial(Torres-Carrasco & Puertas, 2017). Los efectos de la adición de materiales minerales como puzolanas en reemplazo parcial de cemento tradicional han demostrado una mejor resistencia a la penetración de cloruros y carbonatación(Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

La investigación en el campo de los materiales ha determinado que la elaboración de (pastas, morteros y hormigones) utilizando zeolitas naturales pueden servir como posible reemplazo del cemento portland ordinario.

A diferencia del Geopolímeros alcalino convencional, no se requiere la activación usando hidróxido de sodio ni silicato de sodio. La temperatura de curado más alta, una proporción moderada de ácido en la zeolita y baja concentración de ácido fosfórico demostró tener un impacto positivo en la Resistencia a la compresión del Geopolímeros (Baykara et al., 2024).

El presente proyecto implicará someter estos materiales a pruebas de corrosión acelerada, mediciones de resistividad eléctrica y la determinación de los coeficientes de difusión de cloruros. El objetivo principal es evaluar su desempeño y durabilidad cuando se exponen a condiciones ambientales corrosivas. Como antecedente, es importante señalar que esta es la primera vez que se evaluarán estos indicadores de durabilidad específicos para materiales de construcción alternativos que podrían reemplazar potencialmente a los cementos comercialmente disponibles en Ecuador.

1.2 Estudios previos

La principal ventaja obtenida con el uso de Geopolímeros y que no se puede equiparar con otros es el bajo impacto ambiental, con una producción más limpia, con un acceso más fácil a las materias primas, Bajo consumo de energía y baja emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, surge como una gran solución para reducir un problema tan importante como son los impactos ambientales generados por la construcción civil (Amaral Alves & Nogueira, 2020).

La fabricación de Geopolímeros con Hidróxido de sodio de 10M y con una relación activador/zeolita de 0.6 y 0.4 respectivamente, mostraron valores de resistencia a la compresión que cumplieron con las normas técnicas de construcción ecuatorianas NTE 638 y NTE 643. De acuerdo con estas normas, estos Geopolímeros espumados a base de zeolita se pueden utilizar como una aplicación para mampostería en paredes de viviendas en la industria de la construcción ecuatoriana (Lynch et al., 2018).

1.3 Definición del problema

La industria de la construcción en Ecuador enfrenta el desafío de encontrar materiales cementantes que sean económicos, sostenibles y duraderos a largo plazo bajo diversas condiciones ambientales. Así mismo estos materiales deben ser resistentes a ataques químicos como la carbonatación, ataques de sulfatos y ataques de cloruros, los cuales pueden causar una aceleración de la corrosión de las estructuras de hormigón armado.

La corrosión se considera el problema principal que se presenta en las construcciones de concreto reforzado, ya que cuando comienza a degradarse el acero, éste genera residuos que deterioran el concreto; además, el acero comienza a aumentar su volumen, lo que produce esfuerzos de tensión en el concreto, y provoca agrietamientos y, en casos extremos, desprendimientos del concreto, lo cual deja aún más expuesto al ambiente al acero y reduce la resistencia de la estructura para la cual fue diseñada, así como su eficiencia de servicio(Torres-Acosta et al., 2019).

Los Geopolímeros y los cementos híbridos son alternativas prometedoras que merecen ser estudiadas en detalle. Se requiere una evaluación integral de los indicadores de durabilidad de estos materiales, en referencia a los cementos comercialmente disponibles, para poder recomendar su uso como alternativas viables que puedan atender las necesidades de la industria y proporcionar un mejor rendimiento y longevidad a la infraestructura construida.

1.4 Justificación

Los Geopolímeros a base de zeolita pueden ser utilizado como aplicación para mampostería en paredes de hogares en Industria de la construcción ecuatoriana(Lynch et al., 2018). Como materiales de construcción, los Geopolímeros poseen excelentes propiedades mecánicas, resistencia al fuego y a productos químicos conjuntamente con un rápido endurecimiento, estabilidad y durabilidad(Liu et al., 2014).

Este proyecto aporta al OSD 09(industria, innovación e infraestructura) con la meta de Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para

todos. La investigación planea cumplir con el ODS 9^a (Facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes en los países en desarrollo mediante un mayor apoyo financiero, tecnológico y técnico a los países africanos, los países menos adelantados, los países en desarrollo sin litoral y los pequeños Estados insulares en desarrollo).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Evaluar los indicadores de durabilidad del mortero con Geopolímeros, cementos híbridos y cemento comercial mediante los ensayos de corrosión acelerada, resistividad eléctrica y difusión de cloruros para su uso en aplicaciones de construcción en Ecuador

1.5.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar morteros de Geopolímeros y cementos híbridos utilizando zeolitas naturales disponibles en Ecuador.
- Medir el comportamiento de durabilidad de los morteros de Geopolímeros y cementos híbridos en comparación con morteros de cemento comerciales, mediante pruebas de corrosión acelerada, resistividad eléctrica y coeficiente de difusión de cloruros.
- Realizar un análisis comparativo de los indicadores de durabilidad obtenidos generando recomendaciones sobre la viabilidad de estos materiales alternativos.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Corrosión Acelerada

Cuando la corrosión se ha iniciado por otras causas (cloruros o carbonatación), lo que determinan es la cinética del proceso, es decir, controlan la velocidad de corrosión, pudiendo ser responsables de velocidades muy lentas o muy rápidas. Los factores ambientales más importantes como "acelerantes" del proceso de corrosión son: la humedad, el acceso de oxígeno hasta la armadura y la temperatura(Perepérez Ventura et al., 1987).

El procedimiento de prueba de laboratorio para determinar la resistencia a la penetración de cloruros a través de materiales de reparación de hormigón y revestimientos protectores de hormigón, consiste en monitorear el tiempo a falla de especímenes de concreto reforzado expuestos a un campo eléctrico basado en la norma (NT BUILD 356, 1989) como se observa en la Figura 1.

Este método esta normado el cual consiste en sumergir el espécimen fabricado en un recipiente el cual cuenta con una solución de cloruro de sodio al 3%, esta probeta contiene en su interior una barra de acero de 10mm en donde se aplica una corriente continua de 5V con el polo positivo conectado en el la barra de acero y el negativo en una placa de acero inoxidable que se encuentra en el recipiente. Esto nos ayuda a acelerar el proceso de corrosión del cilindro.

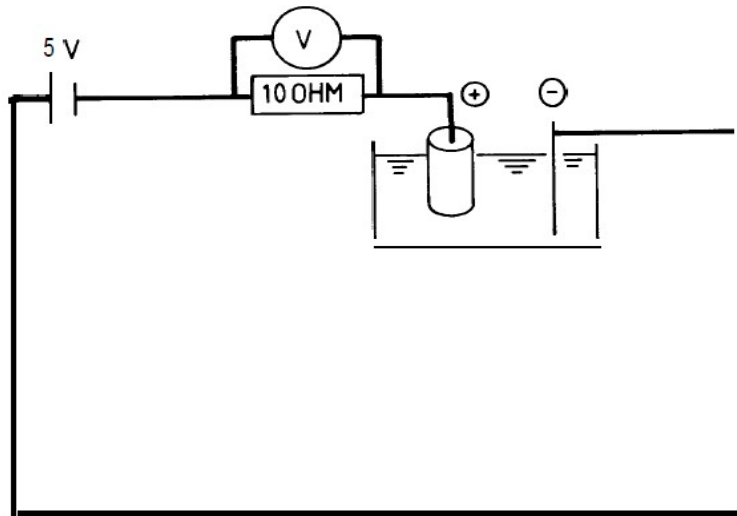


Figura 1 Ensayo de corrosión Acelerada(NT BUILD 356, 1989).

2.1.2 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es un ensayo no destructivo en el cual se mide el amperaje que pasa a través de la muestra al aplicar una corriente continua como se muestra en la Figura 2. A mayor resistividad menor es la porosidad del concreto; por tanto, mayor será su impermeabilidad y resistencia mecánica, al contener más fase sólida por volumen. Además, si el concreto no se encuentra saturado de agua, la resistividad crece, debido a que el concreto no posee propiedades conductivas, es decir, las cargas eléctricas se transmiten a través de la fase acuosa presente dentro de la microestructura de poros, por lo que también es un indicador de su grado de saturación(Torres-Acosta et al., 2019).

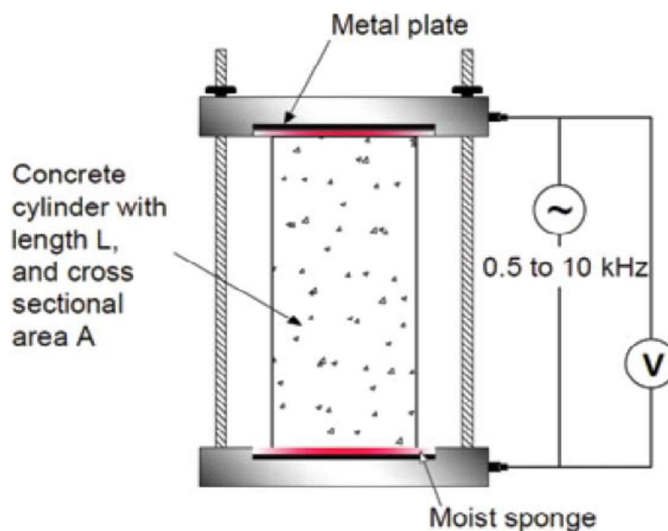


Figura 2 Procedimiento de Ensayo de resistividad eléctrica(Madhavi & Annamalai, 2016).

Generalmente la conductividad eléctrica no se puede medir directamente. La conductividad eléctrica es encontrada a partir de la inversa de la resistividad. La resistividad eléctrica se obtiene a partir de la resistencia que ofrece el hormigón cuando sometido a la electricidad lo cual es un factor clave para evaluar su comportamiento(Madhavi & Annamalai, 2016).

2.1.3 Difusión de cloruros

Una vez montado el ensayo se aplica una corriente continua de 30V, en donde se mide la intensidad que fluye a través del espécimen. Esto es un factor clave para determinar la duración del ensayo y realizar la corrección de corriente. aplicación de corriente inicial esta medida por la tabla de la Figura 3(NT BUID 492, 1999).

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Figura 3 Corrientes iniciales y corregidas(NT BUID 492, 1999).

La difusión del cloruro es una medida de la Resistencia del material ensayado a la penetración de cloruro. Este El coeficiente de migración en estado no estacionario no puede compararse directamente. Se aplica un potencial eléctrico externo axialmente a través del muestra y fuerza a los iones de cloruro del exterior a migrar hacia el espécimen como se ve en la figura 4. Después de una cierta duración de la prueba, la muestra es Se divide axialmente y se rocía una solución de nitrato de plata sobre uno de ellos. de las secciones recién divididas. La profundidad de penetración del cloruro luego se puede medir a partir del cloruro de plata blanco visible(NT BUID 492, 1999).

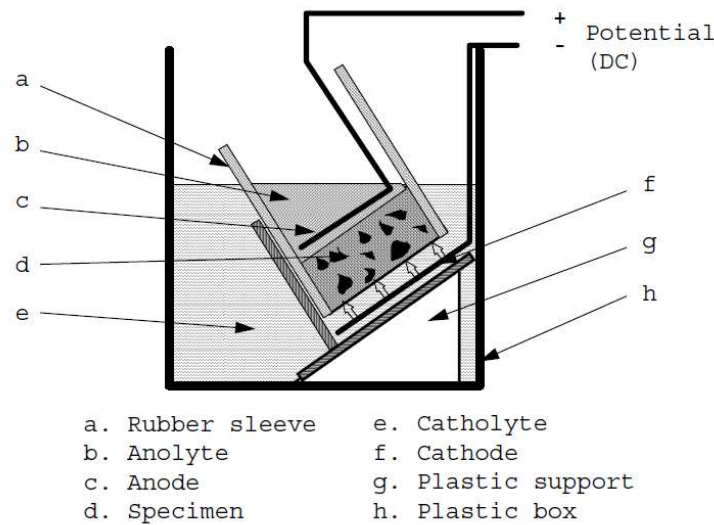


Figura 4 Ensayo de Difusión de cloruros(NT BUID 492, 1999).

La reacción química del nitrato de plata nos permite realizar una gráfica de penetración de cloruros, la cual junto con los datos de temperatura, corriente aplicada y duración del ensayo nos permite calcular el coeficiente de migración en estado no estacionario (D_{nssm}), con la siguiente formula:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T) * L}{(V - 2) * t} * \left[xd - 0.0238 * \sqrt{\frac{(273 + T) * L * xd}{V - 2}} \right]$$

2.1.4 Cementos híbridos

Los cementos híbridos son materiales cementantes que combinan el uso de bajos contenidos de Clinker portland (CK) (< 30 %) e incorporan elevados contenidos de adiciones minerales (cenizas (FA), metacaolin (MK), escorias (BFS), entre otros) y, junto con activadores de moderada alcalinidad (Garcia-Lodeiro et al., 2015).

2.1.5 Geopolímeros

El cemento Geopolímeros, especialmente el Geopolímeros de silicoaluminofosfato (SAP), es un aglutinante sostenible que exhibe propiedades únicas y tiene el potencial de disminuir las emisiones de carbono en la industria de la construcción. El Geopolímeros se preparó utilizando toba zeolítica ecuatoriana y ácido fosfórico (Baykara et al., 2024).

2.1.6 Durabilidad

La durabilidad del hormigón armado está influenciada por distintos factores, algunos de ellos relacionados al material. La combinación de las altas prestaciones a resistencia a la compresión que ofrece el hormigón y las excelentes propiedades mecánicas del acero lo hacen el material compuesto ideal para aplicaciones estructurales (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

2.1.7 Cloruros

Los cloruros son especies iónicas en solución que pueden hacer cambiar las condiciones de servicio del hormigón, ya que determinan la corrosión o pasividad de las armaduras (Perepérez Ventura et al., 1987).

2.1.8 Zeolita

Existen dos tipos de zeolitas según su origen: naturales y sintéticas. Las zeolitas son materiales cristalinos de aluminosilicatos caracterizados por su estructura 3D compuesta por tetraedros TO₄ (T=Si, Al), donde cada oxígeno se une a dos átomos de T. También tienen canales y cavidades de tamaños moleculares que pueden acomodar cationes, agua y otras moléculas (Guth & Kessler, 1999).

2.1.9 Nitrato de plata

En la presencia de cloruros, se utiliza la pulverización de nitrato de plata (AgNO_3). El uso del método es simple, de bajo costo y permite evaluaciones in situ. Pero cuando, hay presencia de carbonatación, el análisis se hace más compleja debido a que la reducción del pH y los cambios en la coloración de hormigón (Real et al., 2015).

2.2 Marco metodológico

2.2.1 Materiales

Los Geopolímeros tipo espuma (FTG) se sintetizaron utilizando el solución alcalina de NaOH (Merck 99% de pureza), silicato de sodio (Merck, $d = 1,34 \text{ g/mL}$ a 20°C , 7,5–8,5 % de Na_2O , 25,5–28,5 % de SiO_2 y una relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 3) y agua desionizada los cuales han demostrado resistencias a la compresión que cumplieron con la norma NTE 638 y NTE 643 (Lynch et al., 2018).

El activador fue el hidróxido de sodio 10 M, silicato de sodio y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (3% en peso de la cantidad de zeolita) con una proporción de Activador/zeolita de 0.6 y 0.4 respectivamente (Lynch et al., 2018).

2.3 Preparación de muestras

En el laboratorio de geotecnia de la FICT se fabricaron los cilindros de los 3 tipos de materiales a ensayar, siguiendo la norma (ASTM C-31, 2003). Una vez finalizado su proceso de curado, se efectuaron pruebas de corrosión acelerada, mediciones de resistividad eléctrica y pruebas de difusión de cloruros en los especímenes curados. Dos especímenes de cada uno de los tres tipos de materiales se sometieron a las correspondientes pruebas de durabilidad.

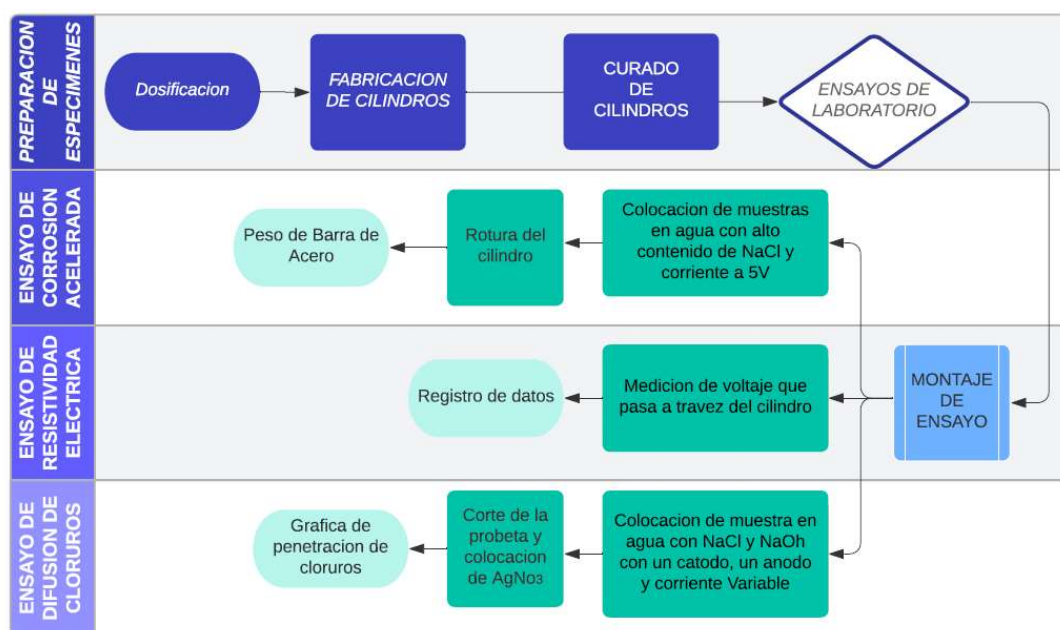


Figura 5 Metodología de trabajo

Con las dimensiones y características de los cilindros (200mm x 100mm) se calculó el volumen requerido de cada componente para la fabricación de las muestras. Todos los materiales se pesaron y colocaron en una mezcladora en donde se preparaba para 3 cilindros que era la capacidad óptima de mezclado.

Tabla 1 Propiedades Geométricas del molde cilíndrico

DATOS DEL CILINDRO		
Área del cilindro	0.00785	m ²
volumen de cilindro	0.00157	m ³
peso del cilindro	3500	g

Una vez finalizado los ensayos se procedió con el registro de datos y el análisis de los resultados obtenidos por cada muestra ensayada. Los resultados esperados son que el Geopolímeros tenga una mayor durabilidad en los tres ensayos realizados en comparación con el cemento tradicional y el cemento híbrido.

2.3.1 Trabajo de laboratorio o gabinete

Se procedió con la elaboración de la solución de hidróxido de sodio, Se preparo con 400g de hidróxido de sodio por cada litro de agua(10M) y se dejó reposar por 24 horas para poder utilizar ya que al momento de mezclarla esta sustancia estaba a 60°C (El peso molecular del hidróxido de sodio es 40g/mol).



Figura 6 Preparación del Hidróxido de Sodio

La figura 6 muestra la solución alcalina que se utilizó en la fabricación del Geopolímeros y del cemento híbrido, se preparó en laboratorio ya que en el mercado es controlada su venta y viene de una concentración baja (El NaOH utilizado tiene una concentración del 98%).

Para la elaboración de la muestra de cemento tradicional se trabajó con las siguientes dosificaciones.

Tabla 2 Dosificación Cemento Tradicional

Cemento TRADICIONAL		cantidad por cilindro	
Cemento IV	100%	875	g
Agua/cemento	50%	437.5	mL
arena/binder	3	2625	g

En la tabla 2 observamos la cantidad de material por unidad de cilindro en donde se consideró un desperdicio del 5%. Para la mezcla del cemento híbrido se utilizó el silicato de sodio y el hidróxido de sodio (preparado anteriormente) como activador/binder.

En esta mezcla aparece la presencia de Zeolita y el activador lo cual hace que tengamos cemento y agua en un menor porcentaje que en la primera mezcla.

Tabla 3 Dosificación Cemento Híbrido

Dosificación		cantidad por cilindro	
Cemento IV	40%	560	g
Zeolita	60%	840	g
Activador/Binder	0.6	504	mL
Agua adicional	70%(cemento+zeolita)	280	mL
SS/SH	0.5	-	-
SH	10M	336	mL
SS	10M	168	mL
Arena/binder	1.5	2100	g

La dosificación de los Geopolímeros de la tabla 4, está compuesta por arena, zeolita y Calcita (No contiene cemento ni agua) por lo que su activador es el silicato de sodio y el hidróxido de calcio en mayores proporciones.

Tabla 4 Dosificación Geopolímeros

Geopolímeros		cantidad por cilindro	
Zeolita	90%	1260	g
calcita	10%	140	g
Activador/binder	0.6	840	mL
Arena/binder	1.5	2100	g
SS/SH	3	-	-
SH		210	mL
SS		630	mL
temperatura Curado	60 °C		
tiempo Curado	24 H		

Se elaboraron 6 muestras por cada una de las mezclas a ensayar, en total 18 cilindros a los cuales se le introdujo una barra de acero de 10mm de diámetro con una longitud de 30cm a 6 cilindros (02 por cada tipo de material) para realizar los ensayos de corrosión acelerada.

Una vez finalizada la fabricación de las probetas de Geopolímeros se procedió a colocarlas en un horno a una temperatura de 60°C la cual es la temperatura ideal para el curado de esta mezcla durante un periodo de 24H (Ver Figura 7).



Figura 7 Fabricación de Cilindros

Luego del curado del Geopolímeros, se procedió a desmoldar todos los cilindros incluyendo la de los otros materiales, y en un tanque de curado se colocaron las muestras

de Cemento tradicional y de Cemento Híbrido durante un periodo de 28 días para proceder con los ensayos respectivos (Ver Figura 8).



Figura 8 Desmoldado y Curado de Cemento tradicional y Cemento híbrido

Uno de los cilindros de Geopolímeros que tenía la barra de acero presento unas pequeñas fisuras las cuales aumentaban a medida que pasaban los días, ganaban mayor ancho y profundidad esto es debido a la contracción del material (Ver Figura 9).



Figura 9 Reacciones en Geopolímeros

Transcurrido los 28 días Finalizado el proceso de curado, las muestras de cemento tradicional y cemento Híbrido, fueron retiradas y trasladadas junto con los Geopolímeros a las instalaciones de CIDNA en donde se procedió a ejecutar los ensayos.



Figura 10 Muestras Listas a ensayar

2.3.1.1 Ensayo de corrosión Acelerada

Este ensayo fue realizado a las muestras que tenían introducida la barra en el cilindro, siguiendo el procedimiento de la norma NT BUILD 356 (1989-11).

Se procedió a preparar una solución de NaCl al 3% como indica la norma, por cada 1L de agua 30g de Cloruro de sodio. Con esto se llenó los recipientes en donde se iban a colocar los cilindros. La potentiostato que nos registra los datos contaba con 10 canales de medición (Ver Figura 11), los cilindros fueron colocados según la siguiente distribución esquemática. De esta manera pudimos llevar un control de cada uno de los materiales ensayados.

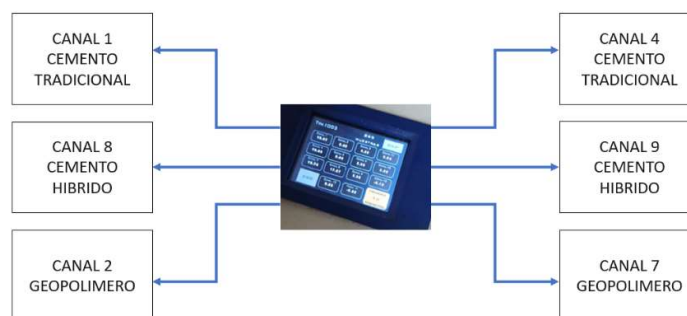


Figura 11 Distribución de Canales de medición

Para el montaje del ensayo utilizamos una fuente de voltaje que emita 5 voltios de manera constante, y un aparato de medición en donde se van a registrar las lecturas las cuales se programaron cada 5 minutos (Ver figura 12), Una placa de acero inoxidable, cables y recipientes de plástico.



Figura 12 Fuente de Corriente Continua y equipo de medición

La norma nos indica que el nivel del agua en la solución salina debe estar 3 cm por debajo de la cara superior del cilindro. Una vez marcado los cilindros se procedió a colocarlos en los recipientes y llenarlos con la solución salina hasta el nivel marcado (figura 13).



Figura 13 Montaje de ensayo de Corrosión Acelerada

2.3.1.2 Ensayo de resistividad Eléctrica

Se realizó la medición de la resistividad eléctrica según la publicación técnica 543 del instituto mexicano del transporte (Torres-Acosta et al., 2019). Para medir la REH real (o *bulk*), el espécimen se extrae de la cámara o tina de curado; se coloca una esponja húmeda en cada uno de los extremos; se coloca una placa metálica (regularmente de un metal resistente a la corrosión como acero inoxidable o bronce) en cada extremo del cilindro, de tal manera que toque las esponjas, y se conecta a un equipo que aplique un voltaje entre las dos placas metálicas y, a la vez, mide la corriente iónica que pasa entre estas dos placas (Torres-Acosta et al., 2019).

Los cilindros ensayados se conectaron a una fuente de corriente continua en la que se midió el voltaje que pasaba a través de la muestra, se tomaron los datos en 3 cilindros de cada material aplicando una corriente continua de 1 y 3 Voltios respectivamente.

Los datos se midieron con un multímetro alrededor de 10 a 15 minutos una vez conectado el ensayo, este fue el tiempo en el que la medición se estabilizaba (Figura 14).

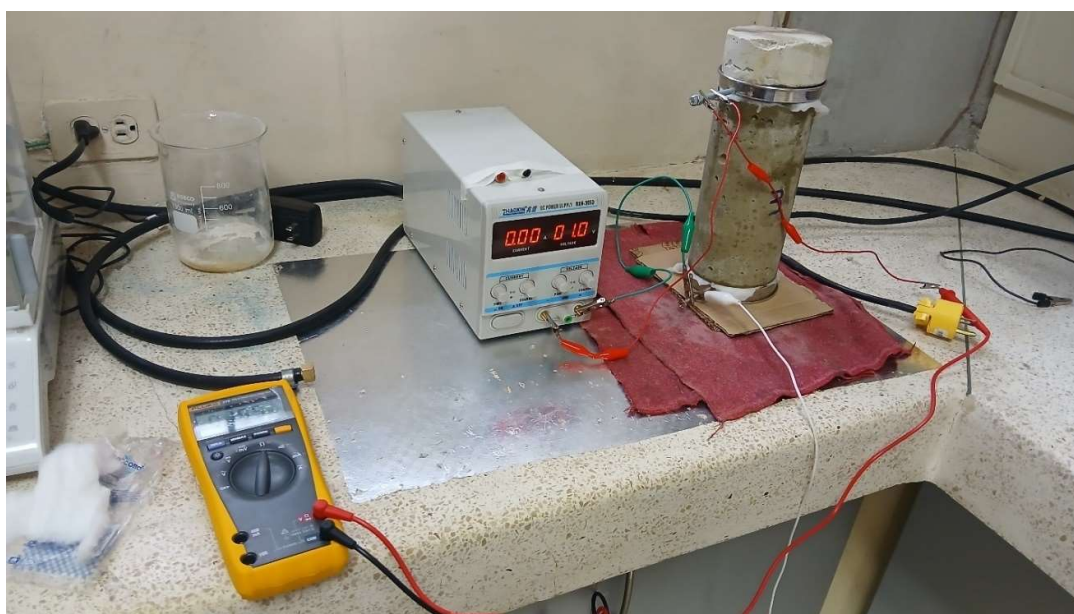


Figura 14 Montaje ensayo de Resistividad electrica

2.3.1.3 Ensayo de difusión de cloruros

El coeficiente determinado por el método es una medida de la Resistencia del material ensayado a la penetración de cloruro. El coeficiente de migración en estado no estacionario no se puede comparar directamente con coeficientes de difusión de cloruro obtenidos de los Otros métodos de prueba, como la inmersión en estado no estacionario prueba o la prueba de migración en estado estacionario(NT BUID 492, 1999).

Se ejecuto según el procedimiento de la norma NT BUILD 492.

Para la preparación de la muestra se cortaron los cilindros en 4 partes con un espesor de 50mm ($\pm 2mm$), la cual fue forrada con una lámina plástica en su perímetro. Se procedió con la preparación de la solución para el ánodo el cual era hidróxido de sodio y el cátodo y la solución salina al 10% para el cátodo (Ver figura 15).



Figura 15 Montaje Ensayo de Difusión de Cloruros

Se procedió a montar el ensayo una vez que los materiales estaban listos, con una fuente de corriente continua, se aplicó una corriente inicial de 30V la cual nos daba una intensidad menor a 5 (mA), según la norma para realizar el ensayo debíamos subir el voltaje a 60V en un periodo de 96 horas. Finalizado el tiempo se desmonto el ensayo y se cortó la muestra para ver la penetración de cloruros a través de la probeta.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Ensayo de corrosión Acelerada

Los datos fueron registrados por una máquina de medición la cual grababa el registro de corriente a través de la barra de acero. Esta lectura se tomaba cada 5 min, se fue monitoreando el avance del ensayo en donde se fue registrando las novedades observadas en cada uno de los recipientes que contenían los cilindros.



Figura 16 Corrosión en muestras de CT y CH

Las muestras de los cilindros de cemento tradicional y cemento híbrido empezaron a mostrar coloración en el agua y expulsión del óxido del interior del cilindro a través de la barra hacia la parte superior (Figura 16 y 17), y una leve corrosión en algunas placas de acero inoxidable.



Figura 17 Corrosión en muestras de Geopolimeros

Por otra parte, los cilindros de Geopolímeros únicamente presentaron coloración en el agua y se podía observar que la sal de la solución se pegaba en las paredes de la muestra. A medida que pasaban los días se podía observar mayor coloración en el agua y mayor cantidad de óxido saliendo por la barra de acero y las fisuras que presentaban los cilindros.



Figura 18 Falla de Cilindros

Se tomaron lecturas hasta que ocurrió el fallo en los cilindros (Figura 18), el cual era una fisura vertical por donde la barra de acero expulsaba óxido. Luego de esto se desmontó el ensayo y se cortaron los cilindros de manera axial en sentido de la fisura para ver la penetración de la corrosión en el mortero (Figura 19).



Figura 19 Corrosión en barra de Acero

En la Figura 20 se puede observar como la corrosión ha afectado a la integridad de nuestro espécimen, que es lo que ocurre en las estructuras de acero expuestas a estas condiciones.



Figura 20 Pérdida de Peso en Barra de Acero

Los pesos de las barras de acero fueron registrados antes de fabricar los cilindros y una vez finalizado los ensayos para obtener la pérdida de masa en el acero de refuerzo con esto se busca obtener una relación de corrosión con respecto al tiempo.

Tabla 5 Pérdida de peso en barras de acero

Canal	Material	Barra de acero (L=30cm)	
		Peso inicial (g.)	Peso Final (g.)
7	Geopolimero	178.00	158.179
2	Geopolímeros	179.20	176.259
4	Cemento Tradicional	178.25	159.759
1	Cemento Tradicional	178.50	177.195
8	Cemento Hibrido	178.60	152.303
9	Cemento Hibrido	178.00	157.361

Las placas de acero inoxidable conectadas al polo negativo, también sufrieron cambios como pequeñas perforaciones, pérdida de masa y oxidación esto es debido a que la solución salina junto con la corrosión ocasionó que estas también se vean afectadas (Figura 21).



Figura 21 Corrosion de placas de Acero Inoxidable

El ensayo de Corrosión Acelerada nos muestra cual fue la resistencia máxima antes de que el cilindro se fisure, para esto generamos las gráficas con los datos tomados en la máquina de medición.

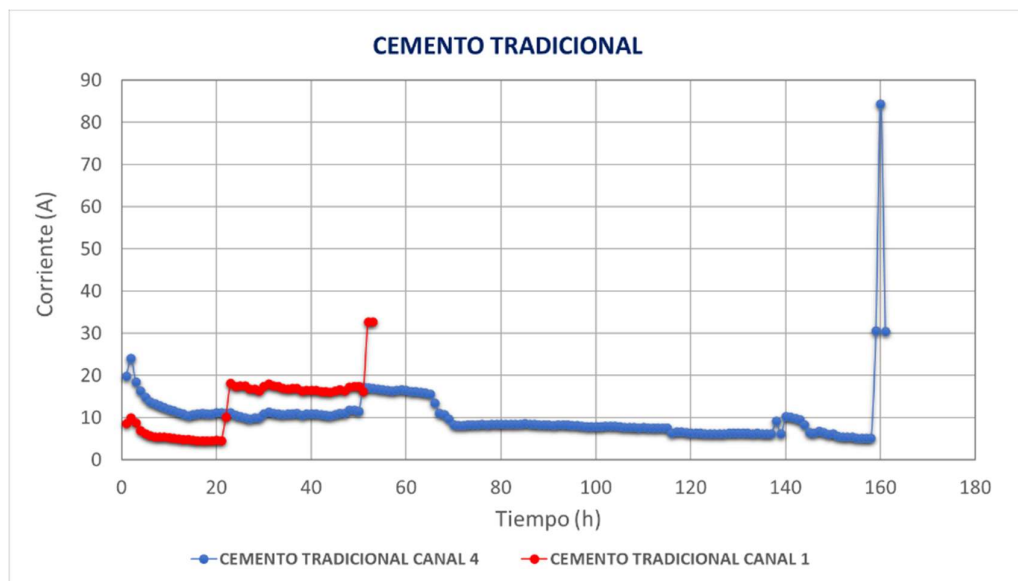


Figura 22 Grafica Corriente-Tiempo Cemento tradicional (CT)

Las muestras de cemento tradicional mostraron 2 comportamientos (Figura22). El cilindro del canal 1 durante las primeras 22h se puede observar que la corriente está por debajo de los 10A y a partir de aquí aumenta hasta un promedio de 16.92A hasta su fallo

a las 53 horas con una corriente de 32.75A. El cilindro del canal 4 en las primeras 50 horas tiene un promedio de 11.86A durante las siguientes 16H se puede observar un aumento de 16.31A y luego una caída de 7.48A hasta su fallo a las 160 horas con una corriente de 84.38A.

El cemento híbrido tuvo un comportamiento parecido en las 2 muestras (Figura 23). Según la gráfica se puede apreciar que la muestra del canal 8 tuvo una mayor intensidad durante las primeras 62 horas, a partir de este punto tuvieron una diferencia promedio de intensidad de 4.15A. Los especímenes fallaron a las 138 horas con una corriente de 135.30A para el canal 8 y 146.30A para el canal 9.



Figura 23 Grafica Corriente - tiempo Cemento Híbrido (CH)

Los Geopolímeros mostraron un comportamiento diferente en los 2 cilindros ensayados (Figura 24). En la muestra del canal 2 se tomaron lecturas menores a 11A hasta que fallo a las 140 horas con una intensidad de 22.25A, esto se debe a que el cilindro que estaba en este canal presentaba grietas por contracción. mientras que en la muestra del canal 7 durante las primeras 116 horas se tomaron lecturas superiores a los 20A luego tuvo una recaída hasta las 142 horas en donde se midió una intensidad promedio de 13.81A e incrementaron las lecturas hasta que fallo a las 175 horas con una intensidad de 154.84A.

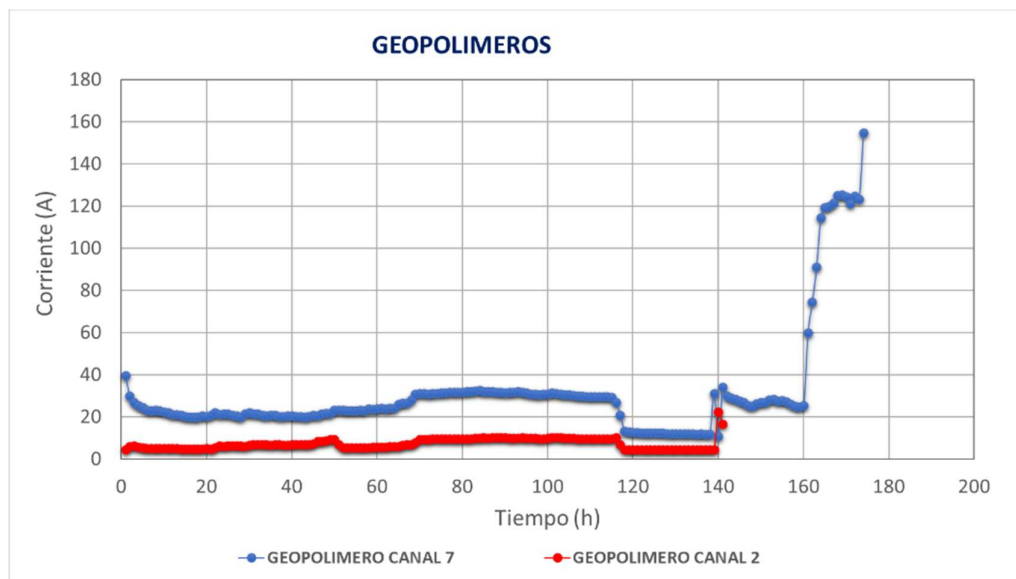


Figura 24 Grafica Corriente - tiempo Geopolímeros (GP)

Una vez realizada la comparación entre los 2 especímenes de cada material podemos extraer los datos de los 3 cilindros que han tenido un mejor desempeño para evaluar los 3 tipos de materiales (Figura 25). Aquí podemos observar que los Geopolímeros tienen una mayor durabilidad ante la corrosión acelerada, en comparación con el cemento híbrido y el cemento tradicional, los cuales fallaron con menores intensidades y en un menor tiempo.

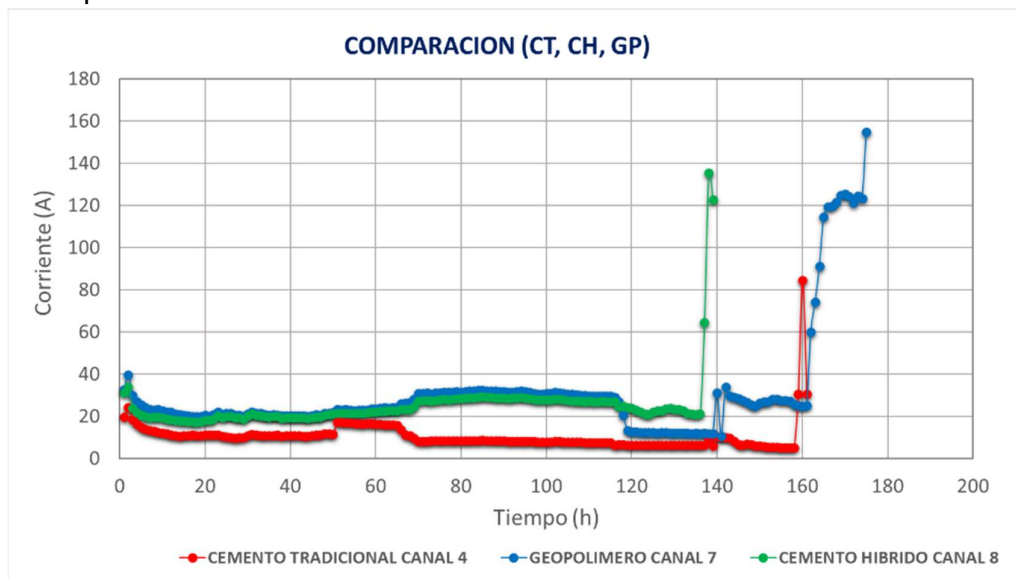


Figura 25 Mejores Desempeños (CT, CH, GP)

3.1.1.1 Pérdida de peso en acero de refuerzo

Una vez observado el comportamiento de las gráficas de corrosión acelerada podemos calcular el porcentaje de peso que ha perdido la barra de cada uno de los cilindros ensayados. Este porcentaje de pérdida es la relación entre el peso final con respecto al peso inicial como se observa en la Tabla 7.

Tabla 6 Pérdidas de peso - duración

Canal	Material	Barra de acero (L=30cm)		Pérdida de Acero		Duración del ensayo (h)
		Peso inicial (g.)	Peso Final (g.)	Peso (g.)	%	
7	Geopolímeros	178.00	158.179	19.821	11.14%	175
2		179.20	176.259	2.941	1.64%	140
4	Cemento Tradicional	178.25	159.759	18.491	10.37%	160
1		178.50	177.195	1.305	0.73%	53
8	Cemento Híbrido	178.60	152.303	26.297	14.72%	138
9		178.00	157.361	20.639	11.59%	138

En este caso el más crítico fue el CT-1 el cual falló a las 53 horas con una intensidad menor a los 20A durante este menor paso de corriente la muestra no tuvo una pérdida significativa de peso, la muestra de GP-2 fallo a las 140 horas, pero con intensidades menor a 10A por eso no tuvo pérdida significativa debido al bajo paso de corriente. A continuación, tenemos el CH-9 y el CH-8 los cuales fallaron a las 138 horas con intensidades por debajo de los 40A y tuvieron pérdidas de 26.29A y 20.63A respectivamente, el CT-4 duro 160 horas con corrientes por debajo de los 12A y perdió 18.49g.

El que tuvo una mejor durabilidad fue el GP-7 el cual se ensayó en un tiempo de 175 horas con intensidades por encima de los 20A y una pérdida de 19.82g. lo que nos demuestra que fue la que estuvo soportando una mayor corriente por mucho más tiempo antes de su colapso.

3.1.2 Ensayo de resistividad eléctrica

Se tomaron lecturas a 3 cilindros de cada material, en donde se aplicó corriente de 1V y de 3V durante un lapso de tiempo de aproximadamente 10 min por lectura en donde se tomaron los valores con un multímetro una vez que la lectura se estabilizaba.

Tabla 7 Datos tomados ensayo de REH

MATERIAL	MUESTRA #1		MUESTRA #2		MUESTRA #3	
	LECTURAS 1V	LECTURAS 3V	LECTURAS 1V	LECTURAS 3V	LECTURAS 1V	LECTURAS 3V
CEMENTO TRADICIONAL	.54 M	0.499M	0.55 M	0.495M	0.514M	.466M
CEMENTO HIBRIDO	.45 M	0.546M	.57M	.465M	.383M	.527M
GEOPOLIMERO	0.43 M	0.482	0.433M	.515M	.526M	0.535M

Los valores detallados a continuación fueron medidos utilizando una fuente de corriente continua con un 1V y 3V respectivamente. Las muestras de cemento tradicional podemos observar que tuvieron resistencias por encima de 0.51 Ohm aplicando una corriente de 1V mientras que al aplicar la corriente de 3V su resistencia disminuyo a valores por debajo de 0.50 Ohm (Figura 26). Esto podría definirse que el cemento tradicional a mayor voltaje aplicado tiene una menor resistividad eléctrica.

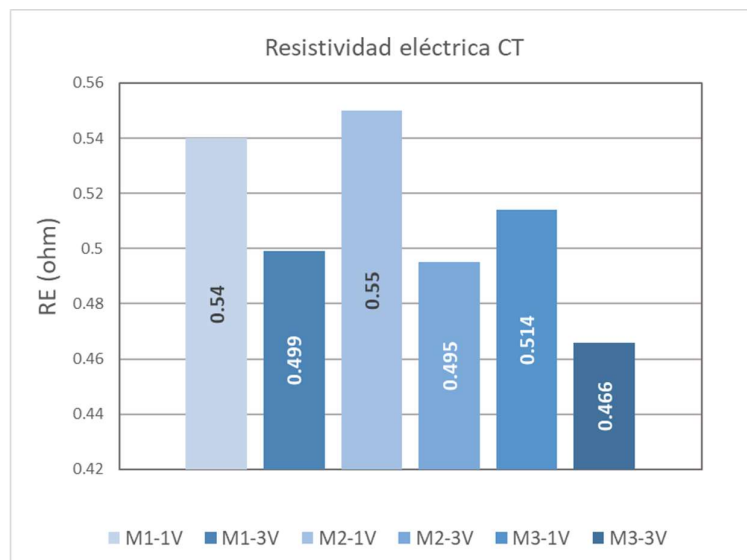


Figura 26 Resistividad Eléctrica en Cemento tradicional

La muestra 1 y muestra 3 del cemento hibrido podemos ver que tuvieron una mayor resistividad aplicando los 3 voltios a diferencia de la muestra 2 que tuvo una menor resistencia con 3V y una mayor con 1V (Figura 27). Este fenómeno es causado por la porosidad que tiene el material, mayor resistividad es igual a menor porosidad.

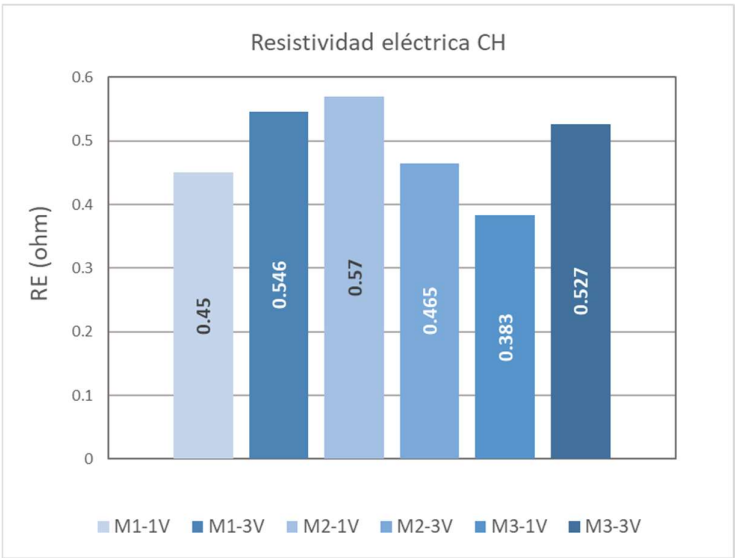


Figura 27 Resistividad eléctrica en Cemento Hibrdo

En los Geopolímeros podemos observar un comportamiento similar en las 3 muestras, la resistividad aumenta cuando se cambia la corriente de 1V a 3V (Figura 28), siendo la muestra 3 la que soporta mayor paso de corriente 0.535mA siendo únicamente superada por la muestra 1 de Cemento hibrido la cual tiene una resistividad de 0.546mA.

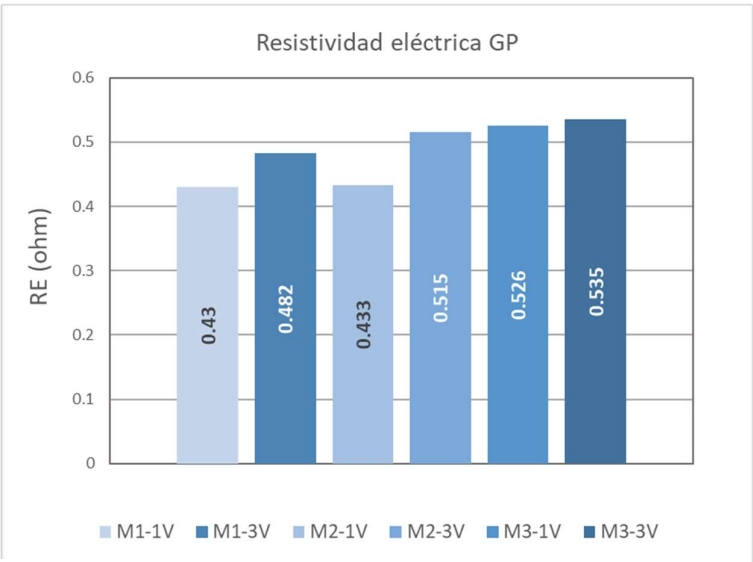


Figura 28 Resistividad Eléctrica Geopolímeros

3.1.3 Ensayo de difusión de cloruros

La muestra de cemento tradicional y de cemento híbrido se ensayaron durante 96 horas mientras se aplicaba una corriente continua de 60V. Luego de transcurrido este periodo se cortó en dos mitades y se colocó el nitrato de plata, luego de 20 minutos aproximadamente se pudo visualizar la penetración de cloruros a través de las muestras.

Estos datos fueron medidos para realizar las respectivas graficas de penetración de cloruros(Figura 29).



Figura 29 Penetración de Cloruros en CT y CH

La muestra del Geopolímeros nos daba una intensidad inicial de 35V por lo que se aplicó una corriente de 40V con una duración del ensayo de 24 horas en este espécimen. Una vez finalizado se aplicó el mismo procedimiento para ver la penetración de cloruros (Figura 30).



Figura 30 Penetración de Cloruros en Geopolímeros

Una vez terminado los ensayos se realizaron las gráficas de penetración de cloruro de los 3 materiales de los cuales se midieron las profundidades cada 10mm, con esto se busca calcular el coeficiente de migración en estado no estacionario (D_{nssm}), para ello necesitamos también de los datos de las demás variables que nos solicita la formula.

Tabla 8 Datos de cilindros para cálculo del (D_{nssm})

Datos	CT	CH	GP
V	60	60	40
Ti (°C)	25	25	25
Tf (°C)	38	38	40
xT(°C)	31.5	31.5	32.5
L (mm)	50	50	50
t (h)	96	96	24
xd (mm)	46.85	32.71	23.85

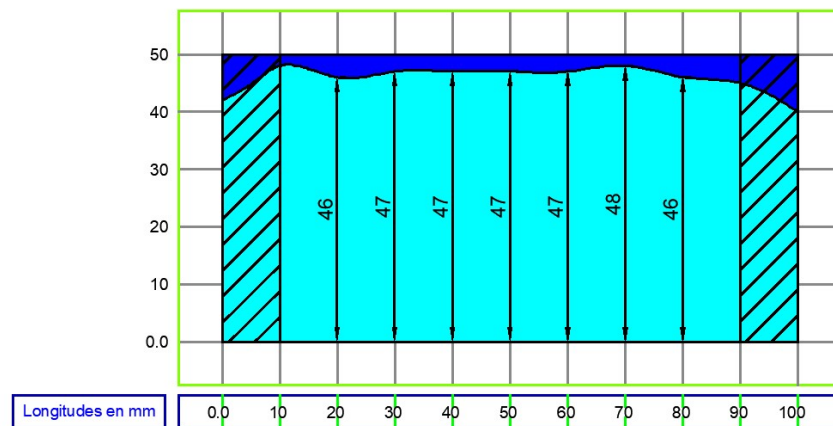


Figura 31 Grafica de penetración de cloruros CT

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + 31.5) * 50}{(60 - 2) * 96} * \left[46.85 - 0.0238 * \sqrt{\frac{(273 + 31.5) * 50 * 46.85}{60 - 2}} \right]$$

$$D_{nssm} = 8.026 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

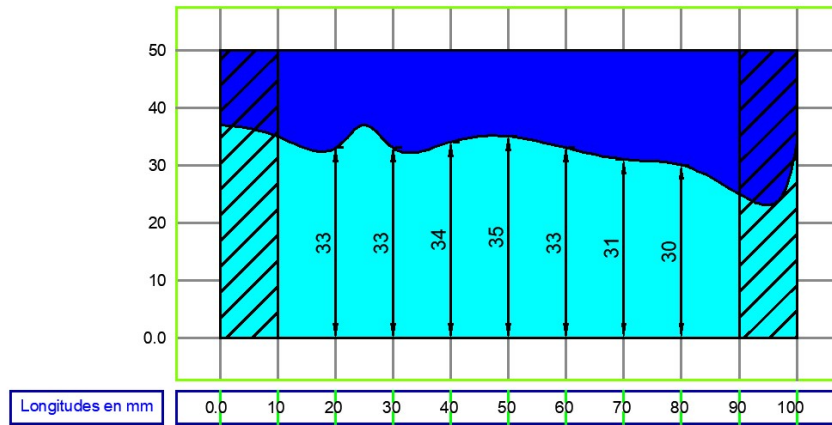


Figura 32 Grafica de penetración de cloruros CH

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + 31.5) * 50}{(60 - 2) * 96} * \left[32.71 - 0.0238 * \sqrt{\frac{(273 + 31.5) * 50 * 32.71}{60 - 2}} \right]$$

$$D_{nssm} = 5.538 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

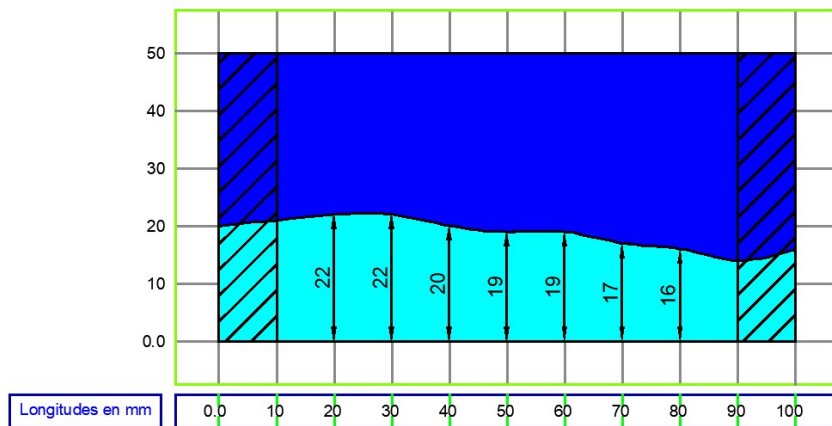


Figura 33 Grafica de penetración de cloruros GP

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + 32.5) * 50}{(40 - 2) * 24} * \left[19.29 - 0.0238 * \sqrt{\frac{(273 + 32.5) * 50 * 19.29}{40 - 2}} \right]$$

$$D_{nssm} = 1.912 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Corrosión Acelerada

Para evaluar cual material ha tenido un mejor desempeño debemos tomar en consideración la duración del ensayo y la intensidad de corriente que pasaba a través de cada barra (Figura 34). La pérdida de peso puede indicarnos un porcentaje de corrosión de cada elemento, pero no podría servirnos como indicador de durabilidad ya que la oxidación del acero de refuerzo no es una medida lineal, la pérdida de peso al inicio no va a ser la misma perdida ya cuando existe corrosión en la armadura.

Tabla 9 Duración del ensayo - Corriente promedio

Canal	Material	Indicador		Corriente Promedio
		Duración	Peso Perdido	
7	Geopolímeros	175	19.821	31.48
2		141	2.941	7.24
4	Cemento Tradicional	161	18.491	10.49
1		53	1.305	12.97
8	Cemento Hibrido	139	26.297	25.28
9		139	20.639	24.09

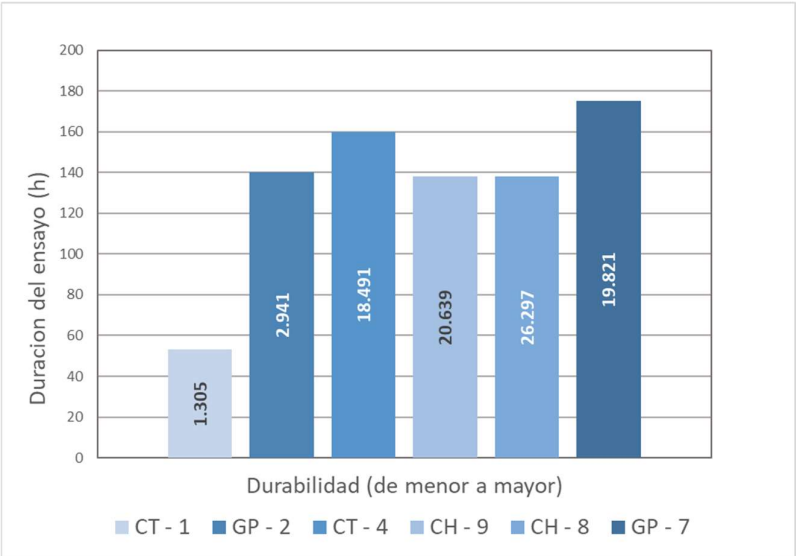


Figura 34 Desempeño ensayo de Corrosión Acelerada

Si ordenamos de izquierda a derecha los cilindros que presentaron un bajo desempeño con respecto al que demostró mejores características de durabilidad nos queda de la siguiente manera. En este ensayo podemos que la muestra GP-7 predomina con el

mayor tiempo ensayado y corriente promedio con respecto a los demás materiales, incluyendo el GP-2 el cual fallo en un menor tiempo debido a las fisuras por contracción que presentaba el espécimen.

3.2.2 Resistividad Eléctrica

La tendencia de los cilindros de CT nos dio como resultado que a medida que se aumentaba el voltaje su resistividad bajaba, el CH a su vez mostro la misma tendencia en una de las probetas ensayadas mientras que en las otras dos tuvo una baja resistencia cuando se aplicó 1V y se observó que cuando se aplicaban 3V su REH aumento. A diferencia de los Geopolímeros que en las tres muestras ensayadas demostraron el mismo comportamiento un valor menor aplicando 1V y una mayor REH al aplicarse los 3V.

En la Figura 35 la gráfica podemos observar una comparación de la muestra que presento el mejor desempeño de cada material siendo los Geopolímeros el que mostro mejor durabilidad.

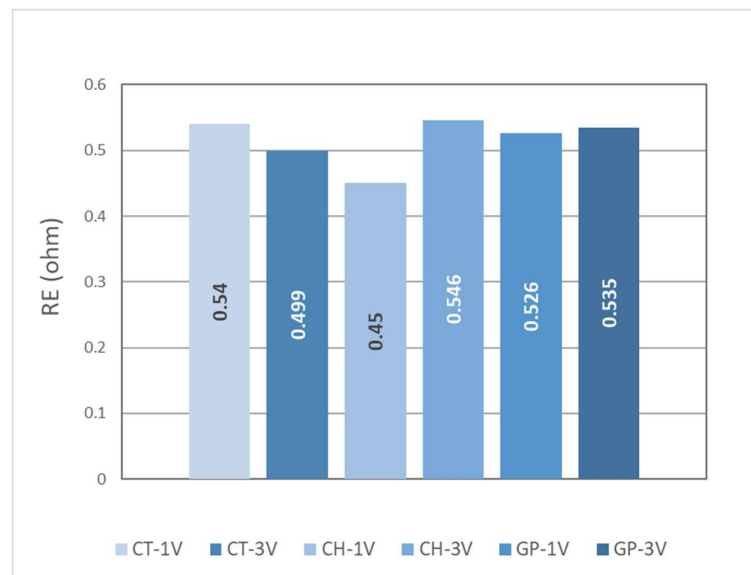


Figura 35 Desempeño Ensaro de resistividad Eléctrica

3.2.3 Difusión de cloruros

Una vez encontrado el coeficiente de migración en estado no estacionario (D_{nssm}), se puede visualizar que los Geopolímeros tuvieron una menor permeabilidad en comparación con el cemento tradicional y el híbrido el cual tuvo la permeabilidad más alta como se indica en la gráfica (Ver figura 36).

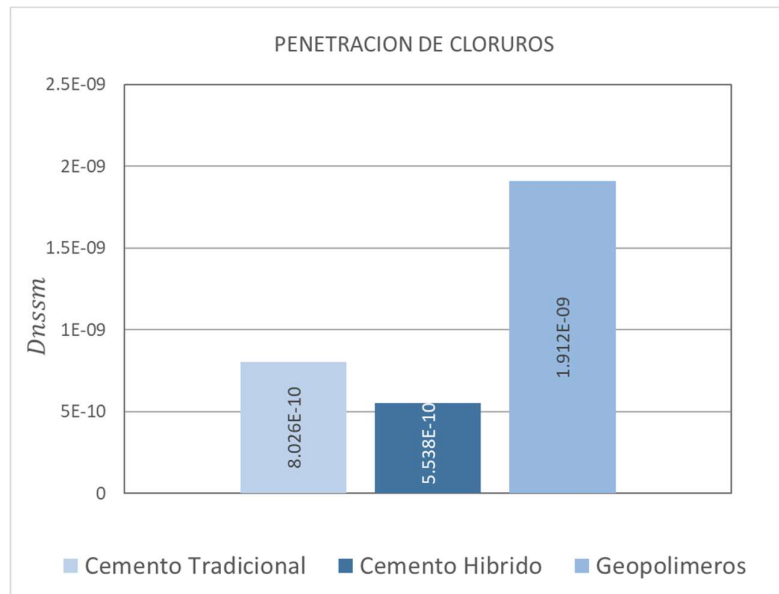


Figura 36 Permeabilidad en muestras ensayadas D_{nssm}

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las mezclas utilizadas fueron fabricadas con zeolitas naturales disponibles en el mercado local, mismas que son de producción nacional. A partir de los resultados Obtenidos podemos establecer las siguientes conclusiones:

Conclusiones

- Los resultados obtenidos luego de realizar los ensayos de laboratorio demostraron que las muestras de Geopolímeros presentaron una menor corrosión en la barra de acero de refuerzo, tuvieron una menor permeabilidad frente a la penetración de cloruros y resistieron un mayor paso de corriente eléctrica a través de la muestra en comparación con los cementos híbridos y el cemento tradicional.
- Los Cementos híbridos demostraron un buen comportamiento con respecto a la resistividad eléctrica, pero frente a la corrosión acelerada el cual es el efecto más común en las armaduras de hormigón armado, mostraron un mayor desgaste en la barra de acero con un bajo voltaje aplicado, y en la difusión de cloruros fue la mezcla que presento mayor penetración.
- Es posible elaborar materiales de construcción con un reemplazamiento total o parcial del cemento comercial cuyo desempeño supere en algunos indicadores de durabilidad al cemento portland. Este tipo de materiales eco sostenible contribuye al propósito global de reducir las emisiones de gas de efecto invernadero, por lo tanto, es una ayuda a nuestra lucha contra el cambio climático.
- Uno factor limitante para el uso de Geopolímeros es su proceso de curado ya que debe de realizarse en un horno a una temperatura de 60°C durante 24 horas, actualmente no existe en el mercado un aditivo o producto que nos ayude a generar esta reacción en el proceso de fraguado de la mezcla.

Recomendaciones

- Realizar otras muestras de cemento hibrido con diferentes dosificaciones y someterla al ensayo de corrosión celerada y difusión de cloruros para verificar si se puede mejorar su durabilidad cambiando su composición.
- Verificar que la fuente de corriente continua se encuentre en buen estado para los ensayos de corrosión acelerada y difusión de cloruros ya que algún corte de luz o interrupción en los ensayos puede ocasionar errores en su ejecución y en el registro de lecturas.
- Realizar evaluaciones para definir una mejor viabilidad en la producción a mayor escala de los materiales que conforman los Geopolímeros, ya que actualmente su costo supera en gran medida al cemento tradicional.
- Comprobar que en la fabricación de Geopolímeros las dosificaciones de cada componente sean las correctas al momento de realizar la mezcla ya que en este trabajo realizado una de las seis muestras fabricadas presento fisuras por contracción.
- El tiempo y la temperatura de curado de los Geopolímeros es importante para que este pueda desarrollar su durabilidad y así tenga un mejor desempeño.
- Las muestras de cemento tradicional y cemento hibrido que contenían la barra de acero para realizar el ensayo de corrosión acelerada, no debe tener contacto con el agua en su proceso de curado ya que esto puede ocasionar que se genere el proceso de corrosión antes de iniciar el ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

ACI-318. (2022). *ACI 318S-14*.

Aguirre, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. In *Materiales de Construcción* (Vol. 63, Issue 309). <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>

Amaral Alves, L., & Nogueira, A. (2020). O USO DE GEOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL. *Projectus*, 3(4). <https://doi.org/10.15202/25254146.2018v3n4p18>

ASTM C-31. (2003). *American Society for Testing and Materials C-31*.

Baykara, H., Riofrio, A., & Cornejo, M. (2024). Preparation, characterization, and environmental impact analysis of natural Ecuadorian zeolite tuff-based silicoaluminophosphate geopolymer. *Construction and Building Materials*, 438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137126>

Díaz, B., Collazo, A., Nóvoa, X. R., & Pérez, M. C. (2006). Determinación de coeficientes de difusión de cloruros mediante medidas de impedancia. *Cemento-Hormigón*, 77(889).

Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2015). Low environmental impact hybrid cements: reducing clinker content. In *ALCONPAT Journal* (Vol. 5, Issue April).

Guth, J.-L., & Kessler, H. (1999). Synthesis of Aluminosilicate Zeolites and Related Silica-Based Materials. In *Catalysis and Zeolites*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03764-5_1

Liu, Z., Shao, N. N., Wang, D. M., Qin, J. F., Huang, T. Y., Song, W., Lin, M. X., Yuan, J. S., & Wang, Z. (2014). Fabrication and properties of foam geopolymer using circulating fluidized bed combustion fly ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0870-4>

Luiza da Silva, D., McCartney da Fonseca, J. M., José Bento, A., Aquino Rocha, J. H., & Barreto Monteiro, E. C. (2018). Corrosión en estructuras de hormigón armado: métodos de prevención y recuperacion. *Journal Boliviano de Ciencias*, 14(42), 6–14. <https://doi.org/10.52428/20758944.v14i42.766>

Lynch, J. L. V., Baykara, H., Cornejo, M., Soriano, G., & Ulloa, N. A. (2018). Preparation, characterization, and determination of mechanical and thermal stability of natural

zeolite-based foamed geopolymers. *Construction and Building Materials*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.253>

Madhavi, T. C., & Annamalai, S. (2016). Electrical conductivity of concrete. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9).

NT BUID 492. (1999). *NT BUILD 492 CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS: CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS*.

NT BUILD 356. (1989). *CONCRETE, REPAIRING MATERIALS AND PROTECTIVE COATING: EMBEDDED STEEL METHOD, CHLORIDE PERMEABILITY*. www.nordtest.org

Perepérez Ventura, B., Barbera Ortega, E., & Andrade, C. (1987). La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón. *Informes de La Construcción*, 38(388). <https://doi.org/10.3989/ic.1987.v38.i388.1639>

Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., & Medeiros, M. H. F. (2015). Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. *Revista ALCONPAT*, 5(2). <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>

Torres-Acosta, A. A., Moreno-Valdés, A., Rodríguez-Mendo, G., Lomelí-González, M. Gu., & Martínez-Madrid, M. (2019). Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto. *Instituto Mexicano Del Transporte*, 543.

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista Ingenieria de Construccion*, 32(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200001>

PLANOS Y ANEXOS

DATOS MEDIDOS EN EL ENSAYO DE CORROSION ACELERADA

horas	Corriente en Canal de Medicion					
	Canal 1	Canal 2	Canal 4	Canal 7	Canal 8	Canal 9
1	8.577	4.523	19.783	32.530	31.299	10.680
2	10.022	5.843	24.144	39.553	34.018	12.400
3	8.770	6.343	18.493	29.843	23.759	9.839
4	6.967	5.699	16.288	26.898	21.791	9.298
5	6.160	5.353	14.819	25.404	20.533	8.876
6	5.738	5.144	13.778	24.298	19.831	8.808
7	5.484	5.020	13.258	23.256	19.419	9.026
8	5.429	5.053	12.888	23.033	19.659	9.788
9	5.405	5.112	12.394	23.180	19.685	10.783
10	5.308	5.108	11.944	22.820	19.283	10.922
11	5.149	5.058	11.630	22.205	18.862	9.890
12	5.013	5.028	11.267	22.001	18.478	9.428
13	4.858	4.914	10.892	21.174	18.121	8.618
14	4.773	4.857	10.486	20.968	17.915	7.992
15	4.703	4.754	10.817	20.653	17.804	7.923
16	4.565	4.609	10.933	20.268	17.373	7.692
17	4.518	4.626	11.123	19.842	17.443	7.682
18	4.490	4.610	10.960	19.843	17.366	7.907
19	4.496	4.618	10.849	19.910	17.513	8.240
20	4.664	4.873	11.250	20.576	18.213	8.833
21	4.594	4.844	11.224	20.038	18.120	8.988
22	10.206	5.419	11.096	20.721	18.847	11.404
23	18.181	6.151	11.257	22.078	20.293	14.693
24	17.350	6.004	10.672	20.985	19.419	14.074
25	17.579	6.135	10.255	21.396	19.803	14.038
26	17.524	6.244	10.019	21.343	19.888	13.826
27	16.877	6.085	9.745	20.669	19.223	12.863
28	16.876	6.212	9.951	20.431	19.351	12.323
29	16.338	6.073	10.026	19.892	18.795	11.739
30	17.442	6.590	10.960	21.310	20.189	15.328
31	18.085	6.947	11.358	21.942	21.053	17.348
32	17.598	6.828	11.012	21.455	20.490	16.593
33	17.385	6.819	10.849	21.318	20.258	15.679
34	16.970	6.733	10.758	20.858	19.805	15.157
35	16.803	6.635	10.853	20.619	19.661	15.089
36	16.922	6.759	10.962	20.833	19.822	15.338
37	16.937	6.762	11.038	20.686	19.923	15.328

horas	Corriente en Canal de Medicion					
	Canal 1	Canal 2	Canal 4	Canal 7	Canal 8	Canal 9
38	16.367	6.500	10.630	20.312	19.188	14.823
39	16.447	6.578	10.833	20.251	19.349	14.960
40	16.467	6.703	10.882	20.345	19.393	15.208
41	16.503	6.835	10.891	20.387	19.463	15.372
42	16.280	6.827	10.741	20.148	19.233	15.696
43	16.249	6.813	10.663	20.199	19.223	15.604
44	16.034	6.882	10.511	19.885	19.008	15.758
45	16.325	7.058	10.807	20.158	19.428	15.963
46	16.609	8.280	11.019	20.765	19.762	15.811
47	16.409	8.278	11.073	20.369	19.589	15.414
48	17.228	8.598	11.793	21.371	20.643	16.309
49	17.345	9.123	11.793	21.592	20.891	16.860
50	17.493	9.128	11.556	21.821	21.183	17.683
51	16.178	6.751	17.314	23.281	21.563	18.998
52	32.750	5.448	17.169	23.093	21.448	20.547
53	32.750	5.445	16.993	23.137	21.483	20.518
54	-	5.424	16.816	22.889	21.439	20.440
55	-	5.431	16.714	22.795	21.511	20.503
56	-	5.410	16.465	22.974	21.353	20.397
57	-	5.433	16.424	23.069	21.507	20.578
58	-	5.468	16.510	23.042	21.730	20.820
59	-	5.578	16.629	23.708	22.141	21.257
60	-	5.573	16.458	23.452	22.142	21.326
61	-	5.642	16.280	23.752	22.244	21.436
62	-	5.747	16.133	24.108	22.391	21.721
63	-	5.856	16.108	23.880	22.627	22.254
64	-	5.982	15.864	24.084	22.768	22.435
65	-	6.068	15.569	24.228	22.715	22.530
66	-	6.663	13.548	26.054	23.305	23.612
67	-	6.788	11.130	26.439	23.220	22.506
68	-	6.888	10.732	26.533	23.279	22.365
69	-	7.737	9.655	28.026	24.623	25.382
70	-	9.233	8.258	30.918	27.320	31.729
71	-	9.249	8.232	30.980	27.412	31.918
72	-	9.406	8.196	31.117	27.455	31.970
73	-	9.578	8.282	30.705	27.335	31.877
74	-	9.712	8.317	31.013	27.558	32.118
75	-	9.708	8.400	31.193	27.800	32.427
76	-	9.684	8.467	31.414	28.006	32.677

horas	Corriente en Canal de Medicion					
	Canal 1	Canal 2	Canal 4	Canal 7	Canal 8	Canal 9
77	-	9.525	8.358	31.483	27.850	32.453
78	-	9.487	8.450	31.601	28.150	32.778
79	-	9.485	8.475	31.678	28.338	32.975
80	-	9.519	8.483	31.602	28.460	33.130
81	-	9.647	8.533	31.790	28.655	33.327
82	-	9.676	8.425	31.961	28.587	33.216
83	-	9.723	8.442	32.012	28.646	33.199
84	-	9.878	8.550	32.293	29.055	33.663
85	-	10.034	8.601	32.471	29.323	33.965
86	-	9.998	8.533	32.045	29.023	33.621
87	-	10.145	8.517	32.081	29.072	33.681
88	-	10.118	8.342	31.969	28.748	33.198
89	-	10.070	8.290	31.738	28.620	33.043
90	-	10.079	8.292	31.654	28.688	33.113
91	-	9.942	8.222	31.525	28.528	32.872
92	-	9.953	8.257	31.576	28.730	33.233
93	-	9.981	8.266	31.636	28.798	33.251
94	-	10.066	8.273	31.985	28.893	33.404
95	-	10.020	8.223	31.618	28.740	33.217
96	-	9.918	8.101	31.319	28.357	32.762
97	-	9.780	7.998	30.738	27.997	32.401
98	-	9.718	7.898	30.696	27.756	32.091
99	-	9.693	7.882	30.534	27.678	32.091
100	-	9.812	7.948	30.773	27.790	32.238
101	-	10.080	7.923	30.731	27.755	32.177
102	-	10.247	8.057	31.319	28.168	32.710
103	-	10.173	8.083	31.165	28.210	32.743
104	-	10.009	7.965	30.816	27.903	32.357
105	-	9.911	7.873	30.559	27.661	31.903
106	-	9.750	7.757	30.416	27.360	31.345
107	-	9.661	7.723	30.236	27.243	31.043
108	-	9.590	7.731	29.886	27.182	30.863
109	-	9.534	7.602	29.988	27.003	30.545
110	-	9.555	7.664	29.698	27.138	30.811
111	-	9.534	7.566	29.663	27.027	30.837
112	-	9.636	7.584	29.610	27.052	30.803
113	-	9.625	7.603	29.554	27.078	30.871
114	-	9.519	7.539	29.578	26.960	30.828
115	-	9.473	7.497	29.553	27.010	30.966

horas	Corriente en Canal de Medicion					
	Canal 1	Canal 2	Canal 4	Canal 7	Canal 8	Canal 9
116	-	10.290	6.387	29.186	26.839	30.563
117	-	6.856	6.618	26.821	24.366	27.426
118	-	4.464	6.586	20.688	24.854	27.941
119	-	4.455	6.456	13.257	24.288	25.288
120	-	4.395	6.378	12.786	23.742	24.564
121	-	4.383	6.380	12.741	22.928	23.662
122	-	4.385	6.285	12.452	22.201	22.606
123	-	4.375	6.252	12.264	21.234	21.386
124	-	4.373	6.252	12.367	20.789	20.820
125	-	4.344	6.277	12.232	22.013	22.048
126	-	4.330	6.252	12.178	22.621	22.718
127	-	4.354	6.268	12.222	22.604	22.771
128	-	4.378	6.302	12.298	23.673	23.937
129	-	4.368	6.362	12.017	23.802	24.076
130	-	4.388	6.318	12.138	23.186	23.543
131	-	4.398	6.335	12.093	23.170	23.587
132	-	4.405	6.285	12.075	22.801	23.218
133	-	4.418	6.218	12.034	21.603	22.023
134	-	4.389	6.310	11.888	21.097	21.565
135	-	4.388	6.235	11.999	20.925	21.453
136	-	4.410	6.227	11.777	21.078	21.592
137	-	4.384	6.177	11.923	64.504	70.608
138	-	4.485	9.214	11.684	135.308	146.309
139	-	4.484	6.159	11.677	122.634	107.458
140	-	22.253	10.358	31.208	-	-
141	-	16.437	10.153	10.670	-	-
142	-	-	9.916	34.024	-	-
143	-	-	9.545	29.748	-	-
144	-	-	8.269	29.058	-	-
145	-	-	6.540	28.426	-	-
146	-	-	6.328	27.411	-	-
147	-	-	6.838	26.753	-	-
148	-	-	6.541	25.296	-	-
149	-	-	6.013	24.901	-	-
150	-	-	6.150	26.166	-	-
151	-	-	5.658	26.900	-	-
152	-	-	5.500	26.830	-	-
153	-	-	5.475	28.051	-	-
154	-	-	5.423	28.272	-	-

horas	Corriente en Canal de Medicion					
	Canal 1	Canal 2	Canal 4	Canal 7	Canal 8	Canal 9
155	-	-	5.190	27.436	-	-
156	-	-	5.123	27.648	-	-
157	-	-	5.082	27.078	-	-
158	-	-	5.165	25.849	-	-
159	-	-	30.632	25.054	-	-
160	-	-	84.384	24.859	-	-
161	-	-	30.414	25.200	-	-
162	-	-	-	59.821	-	-
163	-	-	-	74.284	-	-
164	-	-	-	91.078	-	-
165	-	-	-	114.528	-	-
166	-	-	-	119.213	-	-
167	-	-	-	119.777	-	-
168	-	-	-	121.492	-	-
169	-	-	-	124.895	-	-
170	-	-	-	125.424	-	-
171	-	-	-	124.280	-	-
172	-	-	-	121.064	-	-
173	-	-	-	124.588	-	-
174	-	-	-	123.334	-	-
175	-	-	-	154.848	-	-