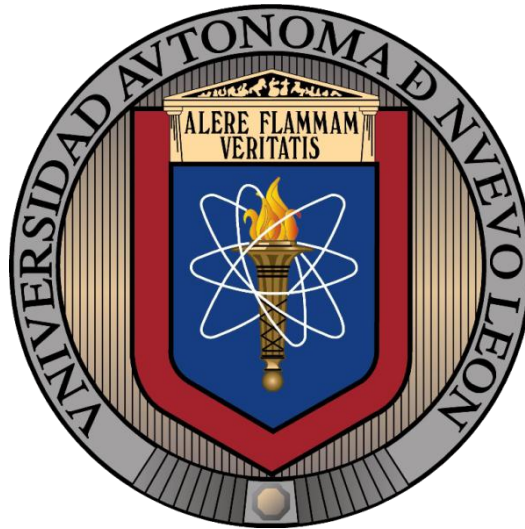


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE
NANOPARTÍCULAS DE SILICE EN PROBETAS DE MORTERO
ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS**

POR

CHRISTIAN FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN**

SEPTIEMBRE DE 2011



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-302-2011

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

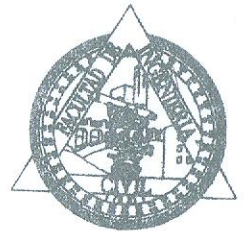
Por este conducto me permito comunicarle que la **Ing. Christian Fernández Gutiérrez**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
“ALERE FLAMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria a 24 de agosto del 2011.

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.
Rtp.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Autónoma de Nuevo León

Presente:-

Distinguido Dr. Valdez:

Por este medio comunicamos a usted que la ING. CIVIL **CHRISTIAN FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis titulado: **“TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE NANOPARTICULAS DE SÍLICE EN PROBETAS DE MORTERO ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS”**, por lo que no tenemos inconveniente en solicitarle que dé las instrucciones necesarias para iniciar los trámites de solicitud de examen de grado de la Ing. Civil Christian Fernández Gutiérrez, de acuerdo con el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradecemos de antemano su atención a la presente solicitud, y quedamos a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente

ALERE, FLAMMAM VERITATIS

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 23 de Agosto de 2011

Dr. Javier Rodríguez González López
Director de Tesis

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel
Revisor de Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Autónoma de Nuevo León

Presente:-

Estimado Dr. Valdez:

En atención a la carta, en la que se me asigna como evaluador de la tesis **“TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE NANOPARTICULAS DE SÍLICE EN PROBETAS DE MORTERO ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS”** que presenta la ING. CIVIL **CHRISTIAN FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Una vez que he leído y evaluado el trabajo de tesis, me permito comentarle que el documento cumple con todas las características de una tesis de maestría, además se reconoce la calidad científica. Por lo que no tengo ningún inconveniente en **APROBAR** este documento para que la estudiante Christian Fernández Gutiérrez pueda seguir con los trámites necesarios para la defensa de la misma.

Sin otro particular, me despido enviándole un cordial saludo y quedando a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente

ALERE, FLAMMAM VERITATIS

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 23 de Agosto de 2011

Dr. Javier Rodrigo González López

Director de Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



POLITÉCNICA



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN SEGURIDAD
Y DURABILIDAD ESTRUCTURAL Y DE MATERIALES

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez,

Dra. M^a Cruz Alonso Alonso, Profesor de Investigación en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de ESPAÑA, que realiza su investigación dentro del Centro de Investigación en Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales (CISDEM), como revisor de la tesis de la Ingeniera Christian Fernandez Gutierrez, informa que:

La tesis realizada en la temática **“TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE EN PROBETAS DE MORTERO A EDADES TEMPRANAS”** representa una gran novedad y avance en el empleo de los nanomateriales en construcción, incluyendo en su contenido el uso de nanoparticulas y tecnologías de aplicación que aportan un destacado aporte innovador a la misma. Por ello considero la **APROBACIÓN** de la presente tesis y considero que cumple el nivel científico necesario que justifica el seguir con los tramites necesarios para la defensa de la misma en la obtención del grado pretendido.

Y para que así conste firmo la presente en Madrid a 30 de agosto de 2011


M^a Cruz Alonso




UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Autónoma de Nuevo León

Presente:-

Estimado Dr. Valdez:

Por este medio y como revisor de tesis de la ING. CIVIL **CHRISTIAN FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ** comunico a usted que una vez que he leído, evaluado la calidad y los cambios sugeridos en la tesis “**TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE NANOPARTICULAS DE SÍLICE EN PROBETAS DE MORTERO ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS**” el documento cumple con todas las características de una tesis de maestría, además que se reconoce la calidad científica. Por lo que no tengo ningún inconveniente en **APROBAR** este documento para que la estudiante Christian Fernández Gutiérrez pueda seguir con los trámites necesarios para la defensa de la misma.

Sin otro particular, me encuentro a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente

ALERE, FLAMMAM VERITATIS

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 23 de Agosto de 2011

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

Revisor de Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi angelito de la guarda que siempre está conmigo y a mi familia por acompañarme y apoyarme en cada una de mis decisiones cualquiera que estas sean, a mis padres Laura Gutiérrez y Roberto Fernández que han sido el motor de toda mi vida y a quienes agradezco infinitamente su maravillosa existencia, a mi abue que siempre ha estado conmigo en todo momento, a Leonel Ortiz por todo su apoyo incondicional, a mis niños David, Elizabeth e Itzel que los adoro con todo el corazón y espero algún día también logren cumplir sus sueños, y claro no puede faltar mi Tobías que siempre me alegra el corazón con su presencia.

Con todo mi cariño

Christian Fernández Gutiérrez

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecerle a Dios que nunca me ha abandonado y que al contrario siempre va conmigo iluminando mi camino. Gracias por todas y cada una de las personas que ha colocado en mi camino, y gracias también por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

Mami sabes que eres la mejor de las mejores mamás del mundo, en verdad te agradezco tu esfuerzo, tu apoyo y la confianza que has tenido en mí. Gracias por qué siempre, aun y cuando hemos estado lejos, has estado a mi lado.

Papi, éste es un logro que quiero compartir contigo, gracias de todo corazón por ser mi padre y por creer en mí, con todo lo que ello implica.

Dr. Javier Rodrigo González López, muchas gracias por todo su apoyo, por su amistad, por confiar en mí y por estar conmigo en todo momento, sinceramente no pude haber tenido un mejor director de tesis que usted, muchas gracias!!

Lupita de mi corazón, muchas gracias por tu apoyo y tu amistad, no me pudo haber tocado una mejor hermanita, sabes de sobra que te quiero mucho.

José Luis no te pudo tocar mejor hermanita que yo y no me pudo tocar mejor hermanito que tú, gracias por todo tu apoyo.

Hayde amiga, muchas gracias por todas tus palabras de aliento en estos años y en aquellos momentos que como las necesité, gracias por enriquecerme con tu fortaleza y entereza, eres una mujercita admirable.

Nohemi estoy enormemente agradecida contigo amiga, gracias por siempre estar a mi lado.

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas del transcurso de mi maestría. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez llegan a leer estas líneas quiero darles las gracias por formar parte de mí y de mi vida, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Dra. María Cruz Alonso Alonso es admirable conocer una gran persona como usted y además con ese corazón que usted tiene, muchas gracias por todo su apoyo, usted lo sabe de antemano que ha sido un pilar principal en la realización de este proyecto, gracias por haberme recibido en mi estancia en Madrid, por su interés y valiosa colaboración, muchas gracias.

Dra. Mercedes Sánchez agradezco toda su paciencia, apoyo y dedicación para conmigo ha sido una gran experiencia para mí el poder trabajar con personas como usted.

A Virtudes, José Luis, Alicia y Cristina que me brindaron todo su apoyo incondicional durante mi estancia en el extranjero, así como a mis amigas Beatriz, Juncal y Miriam que fueron y son una parte importante de mi vida, Gracias!!!.

Al Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel por su valiosa colaboración en la revisión de mi trabajo de investigación.

A todo el personal profesional y técnico del laboratorio de Materiales y del departamento de Tecnología del Concreto por su apoyo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil que me dieron la oportunidad de formar parte de ellas.

Y en general, a todos los que me faltaron que han sido muchos pero que quiero que sepan que les agradezco todo el apoyo que me han brindado.

GRACIAS

PRÓLOGO

En la actualidad existe un interés creciente en el desarrollo de tecnologías sostenibles para la rehabilitación y mantenimiento de estructuras de hormigón armado asociado al progresivo deterioro sufrido por este tipo de construcciones fundamentalmente como una consecuencia de su interacción con el medio ambiente.

Tradicionalmente la rehabilitación de estructuras de hormigón armado se ha llevado a cabo mediante el método de parcheo, consistente en la eliminación del recubrimiento de hormigón dañado, limpieza de la armadura situada bajo este hormigón y sustitución por un mortero de reparación. Sin embargo, otras múltiples posibilidades pueden ser planteadas a la hora de diseñar un proyecto de reparación de estructuras de hormigón armado, como la sustitución de la armadura de acero por otro tipo de material (armaduras galvanizadas, armaduras de acero inoxidable, armaduras epoxi) o la aplicación de técnicas de reparación electroquímica.

El desarrollo de estas últimas ha sido importante a lo largo de los últimos años, existiendo incluso normativa relativa a su aplicación y limitaciones. Sin embargo, la incertidumbre que aún existe en relación a la eficacia de estos métodos electroquímicos de reparación limita en muchos casos su consideración como opción viable y competitiva frente al resto de tecnologías de reparación.

Los métodos electroquímicos de reparación se basan en la eliminación del agresivo ión cloruro o la carbonatación del recubrimiento de hormigón, al

tiempo que se produce la eliminación de los óxidos presentes sobre la armadura dañada por corrosión por aplicación temporal de un campo eléctrico entre la armadura, conectada como cátodo, y ánodo metálico externo. Se distinguen fundamentalmente dos métodos electroquímicos en función del objetivo del tratamiento: la extracción electroquímica de cloruros, basada fundamentalmente en la eliminación del cloruro desde el interior del hormigón por migración hacia el ánodo, y la realcalinización electroquímica, basada fundamentalmente en la recuperación de la alcalinidad de la fase acuosa en los poros del hormigón carbonatado a partir de la generación de grupos hidróxido que tiene lugar sobre la armadura conectada como cátodo.

Este hecho supone una importante ventaja de estos métodos de reparación, al reducirse de manera significativa la cantidad de recubrimiento de hormigón dañado que es necesario eliminar. En este sentido, el gran interés suscitado por los métodos electroquímicos de reparación justifica la necesidad del refuerzo que se está llevando a cabo en la búsqueda de soluciones que mejores y garanticen la eficacia asociada a estos tratamientos, de modo que se lleguen a ser consideradas tecnologías competitivas a la hora de plantear un proyecto de reparación de estructuras de hormigón armado.

Se pueden plantear distintas posibilidades para mejorar la eficacia de los métodos electroquímicos de reparación mediante modificación de la tecnología ya existente:

1. Por un lado se puede contemplar la mejora de la protección de la capa pasiva de la armadura de acero por incorporación simultánea de compuestos pasivantes de base iónica, que puedan migrar hacia el interior del hormigón aprovechando el campo eléctrico aplicado durante el tratamiento de reparación.. Existen ya experiencias muy prometedoras

a nivel de laboratorio de aplicación de inhibidores tanto catiónicos, de base orgánica, como aniónicos (destacando el ión nitrito entre ellos).

2. Por otro lado, se plantea la mejora de la eficacia del método a partir de la aplicación de un tratamiento posterior basado en la incorporación de un material sellante a través de los poros del hormigón. De este modo, se dificulta una posible reentrada de agentes agresivos en la estructura rehabilitada.

El auge actual que está experimentando el campo de la nanotecnología favorece la incorporación de la misma a otros campos de actuación como el de la construcción. En este sentido, han sido publicados algunos trabajos preliminares que contemplan la aplicación de suspensiones de nanopartículas cargadas eléctricamente durante una etapa posterior a un tratamiento electroquímico de rehabilitación. Cuando las nanopartículas penetran en el hormigón, reaccionan con las fases sólidas del mismo disminuyendo su porosidad y dificultando de este modo la posible reentrada de agentes agresivos. A pesar de que los resultados publicados por estos estudios son muy prometedores, aún queda un importante esfuerzo a realizar antes de que la tecnología pueda ser considerada como una opción viable para su aplicación en situaciones reales.

Así pues, en este marco descrito, en el que se destaca el interés del estudio realizado en el presente trabajo, enfocado a la caracterización del transporte de nanopartículas bajo la acción de un campo eléctrico, con el objetivo final de definir la configuración óptima de aplicación del postratamiento con nanopartículas que permita un aumento real de la eficacia de los métodos electroquímicos de reparación electroquímica. Los resultados obtenidos en el trabajo permiten identificar las variables más significativas involucradas en esta etapa de postratamiento, lo que implica

un paso importante para la optimización y puesta de los métodos electroquímicos de reparación por el incremento de la eficacia de los mismos a partir de un postratamiento por materiales sellantes basados en suspensiones de nanopartículas capaces de electromigrar a través de los poros del hormigón.

Dra. Mercedes Sánchez Moreno
CISDEM- CSIC (Madrid, España)

RESUMEN

Christian Fernández Gutiérrez Fecha de Graduación: Septiembre, 2011

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título de Tesis:

**TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE
NANOPARTÍCULAS DE SILICE EN PROBETAS DE
MORTERO ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS**

**Número de páginas: 219 Candidata para el grado de Maestría en
Ciencias con Orientación en Materiales de
Construcción**

Propósito y Método de Estudio:

A pesar de que los métodos electroquímicos de reparación hoy en día ya son tecnologías desarrolladas competitivas a la hora de considerar la rehabilitación de una estructura, aún existe falta de experiencia en relación a la durabilidad de dichos tratamientos. En este sentido, en la actualidad existe un interés creciente en el desarrollo de modificaciones que permitan mejorar y aumentar la eficacia de estos métodos incrementando con el ello la vida útil de estos tratamientos.

En este contexto se plantea el transporte de nanopartículas de sílice que penetren en el mortero desde la superficie, interaccionando con el mismo y dificultando la posterior penetración de agentes agresivos al disminuir la porosidad del mortero. En el presente trabajo se plantea la posibilidad de acelerar el transporte de estas partículas por la acción de un campo eléctrico. Se ha realizado un estudio de caracterización del transporte de las

nanopartículas así como de caracterización de la interacción de las nanopartículas transportadas con las fases sólidas del mortero.

Se han estudiado el transporte por migración en mortero de dos tipos de nanopartículas de sílice, con distinto tamaño (7 y 12 nm diámetro) y en distinta concentración (30% y 40 %) en peso. Se ha estudiado a su vez el efecto ejercido por el potencial y la polaridad de los electrodos sobre el transporte de la partícula manteniéndose la acción del campo eléctrico durante 7 días. Se han monitorizado los parámetros de transporte durante el tratamiento (corriente, voltaje, pH, conductividad) y se han caracterizado los morteros al finalizar el ensayo (resistividad, porosimetría por intrusión de mercurio, Microscopía de electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía dispersiva de rayos X (EDX). Los resultados muestran un transporte de las partículas favorecido hacia el ánodo, así como la interacción de las mismas con las fases sólidas del mortero, provocando cambios en la densidad y porosidad del mismo. Este efecto resulta más evidente en los ensayos a mayor voltaje.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
PRÓLOGO.....	IV
RESUMEN.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	X
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis de investigación	5
1.4 Objetivos de la investigación	6
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos particulares	7
1.4.3 Metas general	8
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	9
2.1 Cementantes hidráulicos	11
2.1.1 Evolución de los cementantes hidráulicos	11
2.1.2 Clasificación de los cementantes hidráulicos	13
2.1.2.1 Cales hidráulicas	14
2.1.2.2 Cementos naturales.	14
2.1.2.3 Cementos artificiales o cementos Portland	15
2.2.1 Química del cemento Portland	15

2.2.2 Componentes individuales	18
2.3 Fraguado y endurecimiento	24
2.4 Clasificación de cementos portland en México.	25
2.5 Clasificación de cementos portland en España	27
2.6 Durabilidad del concreto de cemento Portland	28
2.6.1 Estado físico del agua en el concreto	29
2.6.2 Porosidad y permeabilidad	30
2.7 Mecanismos de transporte	35
2.7.1 Difusión	36
2.7.2 Gradiente térmico	36
2.7.3 Adsorción	37
2.7.4 Succión capilar	37
2.7.5 Absorción	37
2.7.7 Osmosis	37
2.8. Cementación	38
2.9 Dispersiones en sistemas materiales	39
2.9 Clasificación de las dispersiones	40
2.10 Nanopartículas en el concreto	42
CAPITULO 3 TÉCNICAS DE ELECTROMIGRACIÓN APLICADAS AL CONCRETO	44
3.1 Electromigración	46
3.1.1 Potencial óhmico	46
3.2 Mecanismos de transporte de masas	48
3.2.1 Electromigración	48
3.2.2. Convección	49
3.2.3 Transferencia de masa por difusión	49

3.3. Métodos electroanalíticos	50
3.3.1 Métodos potenciométricos	50
3.3.2 Medición de pH	51
3.4 Aplicación de la electromigración	52
3.5 Movimiento de iones durante la aplicación del campo eléctrico	61
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	62
4.1 Fabricación de especímenes	64
4.1.1 Definición y descripción de los materiales empleados	64
4.1.1.1 Cemento.	64
4.1.1.2 Agregados	65
4.1.1.3 Agua de mezclado	66
4.1.1.4 Moldes para vaciado	66
4.1.1.5 Suspensiones coloidales	67
4.2 Diseño de mezcla de morteros	68
4.2.1 Fabricación de especímenes	69
4.2.1.1 Mezclas de mortero	69
4.2.1.2 Corte y preparación de especímenes	73
4.3 Montaje de celdas	76
4.3.1 Definición y descripción de los materiales y equipos empleados	76
4.3.1.1 Fuente de poder	76
4.3.1.2 Celdas de migración	76
4.3.1.3 Electrodo s	77
4.3.1.4 Circuito	77
4.4 Aplicación del campo eléctrico	78
4.5 Condiciones de prueba	80

4.5.1 Voltaje e Intensidad de corriente	82
4.5.2 Toma de mediciones en las celdas durante los ensayos	82
4.5.3 Diferencia de potencial eléctrico	82
4.5.4 Intensidad de corriente	84
4.6 Toma de muestra de la solución en las celdas	85
4.7 Mediciones en las soluciones de las celdas	87
4.7.1 Medición de pH	87
4.7.2 Medición de la conductividad	89
4.7.3 Medición de la resistividad	90
4.8 Técnicas de caracterización de morteros	91
4.8.1 Microscopía	91
4.8.1.1 Microscopio electrónico de barrido	91
4.8.1.2 EDX	92
4.8.2 Porosimetría por intrusión de mercurio	92
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	94
5.1 Consideraciones sobre el tipo de celda y especímenes de prueba	95
5.1.1 Efecto del sentido de conexión sobre la migración de partículas	96
5.2 Análisis y resultados de la solución	104
5.2.1 Diferencia de potencial eléctrico	104
5.2.1.1 Conexión normal	105
5.2.1.2 Conexión Inversa	107
5.2.2 Intensidad de corriente	107
5.2.2.1 Celdas de referencia	109
5.2.2.2 Conexión normal	111
5.2.2.3 Conexión invertida	113

5.2.3 Efecto del pH en el anolito y el catolito	114
5.2.3.1 Celdas de referencia	114
5.2.3.2 Conexión normal	118
5.2.3.3 Conexión invertida	121
5.2.4 Comportamiento de la conductividad en la solución	124
5.3 Resultados en el mortero	130
5.3.1 Efecto sobre la resistividad eléctrica de los morteros	130
5.3.1.1 Mediciones en secciones de mortero tratadas a 6V	132
5.3.1.2 Mediciones en secciones de mortero tratadas a 12V	133
5.3.2 Efecto de la electromigración en el tamaño de poro	133
5.3.2.1 Muestras de referencia	133
5.3.2.2 Resultados de las muestras tratadas con un campo eléctrico de 12V	134
5.3.3 Observaciones bajo el microscopio electrónico de barrido	140
5.3.3.1 Muestras de referencia sin tratamiento (R0)	141
5.3.3.2 Muestras de referencia con campo eléctrico de 12V (RH2O 12V)	144
5.3.3.3 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V).....	148
5.3.3.4 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V).....	151
5.3.3.5 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (-) 12V).....	156
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	160
6.1 Conclusión general	161
6.2 Conclusiones particulares	163
6.3 Recomendaciones	166

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
ANEXO A-1 Mediciones de intensidad de corriente en celdas de prueba	175
ANEXO A-2 Mediciones de pH	183
ANEXO A-3 Mediciones de Conductividad	187
ANEXO A-4 Mediciones en las secciones de mortero	192
ANEXO A-5 Porosimetria por intrusión de Mercurio (PIM)	195
ANEXO A-6 SEM y Microanálisis	200
ANEXO A-7 EDX	210

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Molino de cemento Portland certificado	17
Tabla 2.2 Contenido de Óxidos en el Cemento Portland	17
Tabla 2.3 Clasificación de poros en la pasta de cemento hidratada	34
Tabla 2.4 Comparación de las propiedades de las disoluciones, los coloides y las suspensiones	40
Tabla 4.1 Composición Química de la arena estándar utilizada	65
Tabla 4.2 Granulometría de la arena estándar usada para la investigación	65
Tabla 4.3 Composición de la dispersión coloidal al 30% de concentración	68
Tabla 4.4 Composición de la dispersión coloidal al 40% de concentración	68
Tabla 4.5 Descripción experimental	79
Tabla 5.1 Tabla de identificación de muestras en conexión invertida	97
Tabla 5.2 Características electroquímicas de las suspensiones y el agua desionizada de prueba	115
Tabla 5.3 Porcentaje de incremento de la resistividad eléctrica en muestras tratadas con 6V	131
Tabla 5.4 Porcentaje de incremento de la resistividad en muestras tratadas con 12V	131
Tabla 5.5 Porosidad total en muestras de referencia	134
Tabla 5.6 Distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 30% en conexión normal	136
Tabla 5.7 Distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 40% en conexión normal	137
Tabla 5.8 Distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 30% en conexión invertida	138
Tabla 5.9 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V	148

Tabla 5.10 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V 150

Tabla 5.11 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V 153

Tabla 5.12 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V 157

Tabla A-1.1 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en muestras de referencia con un campo eléctrico aplicado de 6V 176

Tabla A-1.2 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en muestras de referencia con un campo eléctrico aplicado de 12V 177

Tabla A-1.3 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 30% en conexión normal y con 6V aplicados 178

Tabla A-1.4 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 30% en conexión normal y con 12V aplicados 179

Tabla A-1.5 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión normal y con 6V aplicados 180

Tabla A-1.6 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión normal y con 12V aplicados 180

Tabla A-1.7 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión inversa y con 6V aplicados 181

Tabla A-1.8 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión inversa y con 12V aplicados 182

Tabla A-2.1 Mediciones del pH en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 6V 184

Tabla A-2.2 Mediciones del pH en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12 V 184

Tabla A-2.3 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión normal al 30% 185

Tabla A-2.4 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión normal al 30% 185

Tabla A-2.5 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión normal al 40% 185

Tabla A-2.6 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión normal al 40% 185

Tabla A-2.7 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión inversa al 40%..... 186

Tabla A-2.8 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión inversa al 40%..... 186

Tabla A-3.1 Mediciones de la conductividad en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 6V 188

Tabla A-3.2 Mediciones de la conductividad en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12V 188

Tabla A-3.3 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión normal al 30%..... 189

Tabla A-3.4 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión normal al 30%..... 189

Tabla A-3.5 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión normal al 40%..... 190

Tabla A-3.6 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión normal al 40%..... 190

Tabla A-3.7 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6V en conexión inversa al 40%.. 191

Tabla A-3.8 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 12V en conexión inversa al 40% 191

Tabla A-4.1 Medición de la resistencia eléctrica y cálculo de la resistividad eléctrica en celdas tratadas a 6V 194

Tabla A-4.2 Medición de la resistencia eléctrica y cálculo de la resistividad eléctrica en celdas tratadas a 12V 194

Tabla A-5.1 Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero sin aplicación de campos eléctricos 196

Tabla A-5.2 Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero de referencia con un campo eléctrico aplicado de 6V 197

Tabla A-5.3 Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero de referencia con un campo eléctrico aplicado de 12V 197

Tabla A-5.4 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 30% en conexión normal 198

Tabla A-5.5 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 40% en conexión normal 198

Tabla A-5.6 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 40% en conexión invertida 199

Tabla A-5.7 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 30% en conexión invertida 199

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Piedra de cantera de la isla de Portland (que inspiró el nombre de cemento Portland) cerca de un cilindro del concreto moderno	12
Figura 2.2 Tasas relativas de hidratación de $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	20
Figura 2.3 Diferentes formas del agua en el concreto	29
Figura 2.4 Rango dimensional del tamaño de poros en la pasta de cemento endurecida. a) Clasificación en base al tamaño de poro, b) analogía en base al tamaño humano	33
Figura 3.1 Curvas corriente- potencial para un electrodo ideal: a) polarizado; b) no polarizado. Las líneas de puntos muestran la desviación del comportamiento ideal por parte de los electrodos reales	47
Figura 3.2 Configuración de la aplicación de corriente	54
Figura 3.3 Celda de migración por electrofóresis estructurada con 8 electrodos	55
Figura 3.4 Diagrama del circuito utilizado para la extracción de cloruros y migración iónica	56
Figura 3.5 Diagrama de conexión para el tratamiento de electromigración	58
Figura 3.6 Diagrama de conexión para la extracción de sulfatos y aplicación del tratamiento de electromigración	59
Figura 3.7 Diagrama de conexión	60
Figura 3.8 Movimiento de iones en un mortero en contacto de agua desionizada y nanosílice coloidal bajo la influencia de un campo eléctrico	61
Figura 4.1 Esquema donde se muestra la forma en que fueron seccionados los cilindros de mortero elaborados	64
Figura 4.2 Arena normalizada	66
Figura 4.3 Moldes cilíndricos de acero	67
Figura 4.4 Amasadora Eléctrica	69
Figura 4.5 Amasadora mezclando agua y cemento	70

Figura 4.6 Incorporación de la arena normalizada71

Figura 4.7 Mezcla final71

Figura 4.8 Llenado de moldes cilíndricos72

Figura 4.9 Moldes llenos y enrasados73

Figura 4.10 Equipo de Saturación74

Figura 4.11 Probetas Saturadas75

Figura 4.12 Fuentes de voltaje76

Figura 4.13 Celdas de Migración77

Figura 4.14 Diagrama general de la configuración de la celda de migración78

Figura 4.15 Diagrama de conexión de la celda de migración conexión normal 80

Figura 4.16 Diagrama de conexión de la celda de migración conexión invertida
.....81

Figura 4.17 Diagrama de conexión de la celda de migración con agua destilada
.....81

Figura 4.18 Medición de la diferencia de potencial eléctrico de una celda de migración83

Figura 4.19 Medición de la diferencia de potencial eléctrico en una celda en conexión invertida.83

Figura 4.20 Diagrama de medición de la intensidad de corriente84

Figura 4.21 Medición de la intensidad de corriente en una celda de migración 85

Figura 4.22 Toma de muestra de la solución a cada lado de la celda de migración86

Figura 4.23 Muestras de solución de cada celda86

Figura 4.24 Medición de pH con el equipo pH 1500 de Eutech Instruments88

Figura 4.25 Calibración del equipo de medición de pH con búfer de calibración de 4, 7, 10 y 1388

Figura 4.26 Medición de la conductividad en soluciones de celdas89

Figura 4.27 Medición de la resistividad en pastillas de mortero con el equipo Escort ELC-131D90

Figura 4.28 Muestreo de probetas de morteros enviadas al microscopio Electrónico de barrido (SEM) y a pruebas de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM).91

Figura 4.29 Secciones de muestras de morteros enviadas al Microscopio Electrónico de barrido (SEM)92

Figura 4.30 Muestras de morteros para análisis de porosimetria93

Figura 5.1 Probeta de mortero tratada con una suspensión al 40%, con conexión invertida a 12V, superficie de contacto con el anolito97

Figura 5.2 Gel en estado fresco formado en anolito de la celda tratada con 12V en conexión invertida98

Figura 5.3 Gel en estado seco formado en el anolito de la celda tratada con 12V en conexión invertida98

Figura 5.4 Espectro de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco ...101

Figura 5.5 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido101

Figura 5.6 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 100x102

Figura 5.7 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 400x102

Figura 5.8 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 1500x103

Figura 5.9 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 400x103

Figura 5.10 Comportamiento de la caída de potencial en muestras de referencia a 6 y 12 V104

Figura 5.11 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión normal y concentración al 30%.106

Figura 5.12 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión normal y concentración al 40%.106

Figura 5.13 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión invertida y concentración al 40%.108

Figura 5.14 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión invertida y concentración al 30%. 108

Figura 5.15 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras de referencia tratadas con campos eléctricos de 6 y 12 V respectivamente 109

Figura 5.16 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras de referencia tratadas con campos eléctricos de 6 y 12 V respectivamente 110

Figura 5.17 Comportamiento de la intensidad de corriente eléctrica en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 30% de concentración 111

Figura 5.18 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 30% de concentración 111

Figura 5.19 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 40% de concentración 112

Figura 5.20 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 40% de concentración 112

Figura 5.21 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras tratadas conectadas de manera invertida y al 40% de concentración 113

Figura 5.22 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera invertida y al 40% de concentración 113

Figura 5.23 Tendencia del pH en el agua desionizada del polo positivo de las celdas de referencia 117

Figura 5.24 Tendencia del pH en al agua del polo negativo de las celdas de referencia 117

Figura 5.25 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 30% de concentración en conexión normal 119

Figura 5.26 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 30% de concentración en conexión normal 119

Figura 5.27 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión normal 120

Figura 5.28 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión normal 121

Figura 5.29 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión invertida 123

Figura 5.30 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión invertida 123

Figura 5.31 Variación de la conductividad en el anolito de las celdas de referencia 124

Figura 5.32 Variación de la conductividad en el catolito de las celdas de referencia 125

Figura 5.33 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 30%. 126

Figura 5.34 Variación de la conductividad en el catolito en celdas en conexión normal al 30%. 126

Figura 5.35 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 40%. 127

Figura 5.36 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 40%. 127

Figura 5.37 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión invertida al 40%. 128

Figura 5.38 Variación de la conductividad en el catolito en celdas en conexión invertida al 40%. 129

Figura 5.39 Valores de resistividad de las secciones de mortero tratadas a 6V, calculo mostrado en el anexo A-4..... 132

Figura 5.40 Valores de resistividad de las secciones de mortero tratadas a 12V, calculo mostrado en el anexo A-4..... 133

Figura 5.41 Distribución del tamaño de poro en muestras de referencia con y sin tratamiento eléctrico 135

Figura 5.42 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 30% en conexión normal a 28 y 90 días 137

Figura 5.43 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 40% en conexión normal a 28 y 90 días 138

Figura 5.44 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 30% en conexión invertida a 28 y 90 días. 139

Figura 5.45 Imagen obtenida del SEM de una muestra R0, a 40 magnificaciones 142

Figura 5.46 Comparación de una imagen del muestra R0 contra un modelo de una pasta de cemento portland hidratada. "A" representa a las partículas CSH (dimensiones de 1-100nm). 142

Figura 5.47 Análisis semicuantitativo de la muestra R0..... 143

Figura 5.48 Análisis por EDX de la muestra R0, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio 144

Figura 5.49 Imágenes del SEM de la muestra RH2O 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa. 144

Figura 5.50 Imágenes del SEM de la muestra RH2O 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 145

Figura 5.51 Análisis semicuantitativo de la muestra RH2O 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo 146

Figura 5.52 Análisis semicuantitativo de la muestra RH2O 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo 146

Figura 5.53 Análisis por EDX de la muestra RH2O 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, polo positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio 147

Figura 5.54 Análisis por EDX de la muestra RH2O 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, polo negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio. 147

Figura 5.55 Imágenes del SEM de la muestra 30%(+) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 148

Figura 5.56 Imágenes del SEM de la muestra 30%(+) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 149

Figura 5.57 Análisis semicuantitativo de la muestra 30%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo..... 149

Figura 5.58 Análisis semicuantitativo de la muestra 30%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo 150

Figura 5.59 Análisis por EDX de la muestra 30%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio..... 150

Figura 5.60 Análisis por EDX de la muestra 30%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio..... 151

Figura 5.61 Imágenes del SEM de la muestra 40%(+) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 152

Figura 5.62 Imágenes del SEM de la muestra 40%(+) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 152

Figura 5.63 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo..... 153

Figura 5.64 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo. 153

Figura 5.65 Análisis por EDX de la muestra 40%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio 154

Figura 5.66 Análisis por EDX de la muestra 40%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio 154

Figura 5.67 Imágenes del SEM de la muestra 40%(-) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa 155

Figura 5.68 Imágenes del SEM de la muestra 40%(-) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa. 156

Figura 5.69 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(-) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo 156

Figura 5.70 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(-) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo. 157

Figura 5.71 Análisis por EDX de la muestra 40%(-) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio. 158

Figura 5.72 Análisis por EDX de la muestra 40%(-) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio 158

Figura A-6.1 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo) 201

Figura A-6.2 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado negativo) 202

Figura A-6.3 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo) 202

Figura A-6.4 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado negativo) 203

Figura A-6.5 Microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V, análisis puntual 203

Figura A-6.6 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V 204

Figura A-6.7 Microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V, análisis de área 204

Figura A-6.8 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V 205

Figura A-6.9 Superficie de fractura a 100X en muestra tratada a 12V (lado positivo) 205

Figura A-6.10 Superficie de fractura a 100X en muestra tratada a 12V (lado positivo)206

Figura A-6.11 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo)206

Figura A-6.12 Superficie de fractura a 1500X en muestra tratada a 12V (lado negativo)207

Figura A-6.13 Microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V, análisis de área207

Figura A-6.14 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V208

Figura A-6.15 Microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V, análisis de puntual209

Figura A-6.16 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V209

Figura A-7.1 EDX de la celda de referencia sin aplicación de campos eléctricos211

Figura A-7.2 EDX de la celda de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12V (RH2O 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)212

Figura A-7.3 EDX de la celda de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12V (RH2O 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento).....213

Figura A-7.4 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)214

Figura A-7.5 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)215

Figura A-7.6 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde positivo, 56 días después de la aplicación del tratamiento)216

Figura A-7.7 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde negativo, 56 días después de la aplicación del tratamiento)217

Figura A-7.8 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)218

Figura A-7.9 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)219

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la nanotecnología es una realidad en muchos aspectos de la vida cotidiana sin embargo; su incursión en la industria de la construcción apenas ha comenzado desarrollarse. El uso de nanomateriales con función cementante aunado a la aplicación de tecnologías modernas ha estado en constante evolución dando como resultado que su estudio en la industria de la construcción se haya ido acrecentando, estas tecnologías recientemente desarrolladas son requeridas cada vez más para, incrementar el uso y el tiempo de vida de las estructuras construidas en la actualidad.

El tiempo de servicio de las estructuras es una cuestión de durabilidad y es en este contexto donde la nanotecnología se ha ido integrando como una solución actual. La durabilidad de las estructuras es un tópico de interés para la extensión de la vida útil debido a que el uso de nanomateriales en muchos de los casos busca la reducción del deterioro densificando la matriz y tratar de

evitar la migración al interior de los agentes promotores del deterioro a los cuales se ven expuestas las estructuras durante su vida de servicio.

Respecto al desarrollo de nanomateriales aplicados en la industria de la construcción se ha tratado de posibilitar la fabricación de materiales con propiedades innovadoras y/o la modificación de las ya existentes para que brinden mayores prestaciones en servicio en comparación de los que tienen una microestructura convencional. En base a esto, los avances tecnológicos junto a los nanomateriales han estado a la orden del día buscando nuevas técnicas de reparación, rehabilitación, mitigación y/o mejoramiento de las mismas con la finalidad de atenuar el impacto ambiental que se genera en la industria de la construcción a causa del deterioro de estructuras.

En la actualidad, la mayor parte de la investigación sobre nanotecnologías aplicadas a la construcción se ha centrado en dos temas principales; el primero es la elaboración de materiales nanoestructurados con mayor resistencia que el acero los cuales tienen incluso sólo un 10% de su peso. El segundo, centrado en la elaboración de concretos de ultra alta resistencia a partir de la modificación de la estructura de la matriz cementante y del mecanismo de fractura que resulta de ello. A partir de la elaboración de nuevos cementos con adiciones de nanopartículas principalmente de sílice y más recientemente se han investigado temas tales como, técnicas de rehabilitación no convencionales de estructuras entre estas se encuentran principalmente la migración electroquímica, la realcalinización y la extracción electroquímica de cloruros.

En el estudio de las nanopartículas, las propiedades se caracterizan individualmente pero, cuando se agrupan formando conglomerados de nanopartículas, se puede hablar de materiales nanoestructurados, cuyas

propiedades están determinadas por las propiedades intrínsecas de las nanopartículas y la interacción entre ellas¹.

La sílice (SiO_2) está presente en el concreto como parte común de las materias primas, uno de los temas más frecuentes en las investigaciones con nanopartículas en el concreto estudia la inclusión en la mezcla de partículas ya que conduce a una densificación de la micro y nano- estructura que se resume en mejores prestaciones mecánicas además, que la nanosílice de los materiales a base de cemento también puede controlar la degradación del C-S-H². Otra aplicación que ha sido estudiada es el uso de recubrimientos que se utilizan habitualmente como barreras de protección contra la abrasión, ataque químico, las variaciones hidrotérmicas o para mejorar el acabado. En la actualidad, la mayoría de estos recubrimientos son de tamaño micrométrico y los nuevos materiales y técnicas se están ampliando para el desarrollo de recubrimientos de tamaño nano. De la misma forma, se han desarrollado técnicas de electromigración aplicadas en el concreto endurecido, mismas que plantean el uso de micropartículas y nanopartículas impulsadas hacia el interior del concreto endurecido motivadas por diferentes intereses de estudio.

El uso de múltiples técnicas de electromigración buscan el movimiento de partículas, iones y/o electrolitos hacia el interior del concreto endurecido; por ejemplo, se han realizado investigaciones que estudian la eficiencia de la extracción de cloruros desde el interior de la matriz cementante del concreto; aplicaciones que buscan el movimiento de iones como las técnicas de realcalinización electroquímica, y otras más que buscan la electrocinética de inhibidores de corrosión³⁻⁶. A pesar de todo esto, el conocimiento científico amplio de los fenómenos de electromigración, no están totalmente comprendidos debido a la premura al convertir estos tratamientos en soluciones a la extensión de la vida útil *in situ*. En este contexto, el propósito de éste trabajo propone el uso de suspensiones coloidales comerciales con la finalidad

de generar datos cualitativos y cuantitativos que permitan comprender más éste fenómeno mediante el uso de un arreglo de celda sencillo desarrollado en laboratorio.

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente existen técnicas de rehabilitación electroquímica de estructuras que se han desarrollado de manera efectiva no obstante; a pesar de que los métodos electroquímicos de reparación hoy en día ya son tecnologías desarrolladas competitivas y normalizadas a la hora de considerar la rehabilitación de una estructura, existe un interés científico creciente en el desarrollo de modificaciones que permitan mejorar y aumentar la eficiencia y eficacia de estos métodos incrementando con ello la utilidad de estos tratamientos. De otra manera, surge también la necesidad de desarrollar nuevas técnicas que puedan aplicarse como una forma de prevención del deterioro de las estructuras de concreto reforzado basándose en el impedimento de la penetración de agentes del medio que dañen la estructura y la microestructura del elemento de concreto.

1.2 Justificación

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado debido a la corrosión en el acero de refuerzo es un grave problema a nivel mundial. Los costos para reparar o sustituir las estructuras de concreto dañadas son importantes y todos los mecanismos de deterioro se encuentran estrechamente relacionados con la interacción de sus componentes y el medio de exposición, lo que provoca que en numerosas ocasiones el concreto experimente una degradación acelerada.

Los mecanismos de deterioro tienen un factor común éste es, el transporte de agentes agresivos hacia el interior de la estructura principalmente agua así como también, los gases y las sustancias nocivas que contienen estos y que entran al concreto teniendo como consecuencia el deterioro. Dicha entrada se hace a partir de la red de poros presentes en la matriz cementante por lo tanto, la presencia de los poros capilares y los huecos de aire influyen en la permeabilidad del concreto. De esta manera la resistencia y la durabilidad están relacionadas con la estructura de poros en el concreto y a la interconexión entre estos sin embargo; si la cantidad de poros conectados se reduce se puede esperar que la durabilidad de la estructura sea preservada, ya que al existir una menor cantidad de poros interconectados en la matriz cementante los agentes agresivos tardarían más en penetrar a la misma y causar algún tipo de deterioro.

La presente investigación se fundamenta en el desarrollo de una técnica que permita prevenir el deterioro acelerado de las estructuras de concreto reforzado a partir de la introducción de nanopartículas de sílice en estado coloidal mediante la acción de un campo eléctrico en un elemento de concreto endurecido a edades tempranas.

1.3 Hipótesis de investigación

El electrotransporte controlado de una suspensión de nanopartículas coloidales de sílice al interior de una matriz cementante puede ser factible para reducir la porosidad en función de la naturaleza electrocinética de los elementos involucrados.

En este contexto se plantea el transporte de nanopartículas hacia el interior de morteros a edades menores o iguales a 56 días desde la superficie y por acción de un campo eléctrico, buscando que las partículas interactúen con la matriz cementante disminuyendo así, la porosidad del mortero mediante un arreglo de celda tal que, se pueda evaluar entre otras cosas; el sentido de la migración y el efecto de la diferencia de potencial, cuando se utilizan suspensiones coloidales con partículas de diferente tamaño y concentración, a partir de la caracterización electroquímica y microestructural sobre los especímenes de prueba.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad de la electromigración de una suspensión de nanosílice coloidal a través de una matriz cementante y caracterizar su efecto sobre la microestructura a edades tempranas.

1.4.2 Objetivos Particulares

- Caracterizar el mecanismo de electromigración a partir de parámetros como diferencia de potencial, intensidad de corriente, variaciones de pH en las soluciones, conductividad eléctrica, concentración y tamaño de partícula.
- Determinar el sentido de la migración que predomina a partir de la naturaleza eléctrica de las partículas en la suspensión.

- Caracterizar microestructuralmente los especímenes antes y después de la aplicación del tratamiento, mediante MEB y EDX.
- Medir el porcentaje de porosidad que presentan los especímenes antes y después de la aplicación del tratamiento mediante la porosimetría por intrusión de mercurio.

1.4.3 Metas

- Obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.
- Dar a conocer la información obtenida en congresos nacionales e internacionales.
- Participar en la vinculación con el CISDEM- CSIC contribuyendo a la internacionalización del programa.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

A través del tiempo los materiales cementantes han ido evolucionando y su uso en la industria de la construcción se ha ido acrecentando así pues, con el crecimiento la producción de materiales cementantes las nuevas tecnologías aplicadas a los materiales cementantes son requeridas cada vez, más para maximizar los usos y el tiempo de vida de las estructuras construidas a base de estos materiales.

Actualmente, la durabilidad de las estructuras es un tema de gran interés ya que es una de sus propiedades más importantes, debido a los diferentes medios a los que se encuentran expuestas durante su vida de servicio. En base a esto, los avances tecnológicos están a la orden del día buscando técnicas de reparación, rehabilitación y mejoramiento de las mismas.

En este capítulo se presenta la evolución de los materiales cementantes, principalmente en los cementos Portland, debido a que es el material primordial utilizado en la presente investigación, más adelante se describirán las

reacciones químicas de mayor relevancia durante el proceso de endurecimiento del concreto a base de cemento portland y finalmente se describirán los principales factores de durabilidad en estructuras de base cemento Portland.

2.1 Cementantes hidráulicos

Un cementante es un material compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecerse a corto o largo plazo, y en consecuencia, capaces de unir materiales heterogéneos de distinta naturaleza.

Los cementantes pueden ser de naturaleza orgánica tales como resinas o polímeros en general, o inorgánicos, de entre estos últimos nos referiremos únicamente a los silico- cálcicos, que son los de más común empleo en la construcción: yesos, cales grasas o aéreas, cales hidráulicas, cementos naturales, cementos Portland, y sus diversas clases.

El orden de su enumeración es prácticamente el de su aparición histórica; tan sólo fueron precedidos por la arcilla, empleada como sustancia que mezclada con el agua, forma una masa plástica y por tanto moldeable y es capaz de endurecer, en cierto modo, por simple secado. ⁷

2.1.1 Evolución de los cementantes hidráulicos

La historia de los materiales cementantes es tan antigua como la humanidad; el yeso fue utilizado por los egipcios, griegos y romanos; que usaron la cal común y la cal hidráulica. La primera se obtiene al calcinar la piedra caliza y solo endurece en presencia del dióxido de carbono (CO₂)

contenido en el aire; la segunda se obtiene cuando la piedra caliza contiene impurezas de arcilla y endurece principalmente por la reacción que se produce entre sus elementos constitutivos en presencia del agua.

La era del cemento sílico-cálcico inicia aproximadamente en 1750 con John Smeaton quién mezcló cal con arcillas y obtuvo un producto que se empleó en la preparación del faro de Eddystone pero su descubrimiento no tuvo mayor trascendencia en ese época, fué hasta que en 1824 Joseph Aspdin, conoció los estudios de Smeaton y prosiguió sus investigaciones patentando el "Cemento Portland", material que presentaba un aspecto parecido a unas piedras de construcción extraídas en Portland, ciudad que queda al sur de Inglaterra, de donde toma su nombre. La investigación sobre el desarrollo del cemento continuó y en 1845 el inglés Issac Johnson es quién le da a la mezcla la temperatura adecuada para formar el Clinker, producto que después de molido ofrece óptima calidad como cementante y es muy similar al que actualmente se utiliza. ⁸



Figura 2.1 *Piedra de cantera de la isla de Portland (que inspiró el nombre de cemento Portland) cerca de un cilindro del concreto moderno.*⁹

Los cementos Portland son conglomerantes obtenidos a partir de la calcinación de mezclas de arcilla y piedra caliza (con o sin adiciones artificiales). Estas mezclas, molidas finamente y convenientemente pastadas con agua, forman conglomerados que fraguan y endurecen, y que dan lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua.

2.1.2 Clasificación de los cementantes hidráulicos

Gomá F.⁷ describe a los cementantes cálcicos, teniendo como una característica común que se preparan como una mezcla homogénea en crudo es decir, antes de su calcinación, compuesta por caliza en proporción dominante.

Estos crudos son luego calcinados a distintas temperaturas y forman según diferentes condiciones, los materiales calcinados o el clinker que, debidamente molidos (y con adición de un retardante en el caso del cemento Portland) se utilizan como cementantes o aglomerantes.

La arcilla es fundamentalmente un silicato de aluminio, la presencia de esta sustancia en el cemento aporta óxidos distintos al CaO: Al_2O_3 y SiO_2 . Generalmente aporta también Fe_2O_3 y otros minoritarios como MgO; álcalis, etc.

La propiedad fundamental de los cementantes hidráulicos es el fraguado hidráulico, es decir, su capacidad de endurecer en presencia del agua. En forma esquemática, la constitución básica de estos cementantes y sus elementos diferenciales se pueden resumir como se menciona a continuación:

2.1.2.1 Cales hidráulicas. Son una mezcla homogénea, natural o artificial, de caliza CaCO_3 y arcilla $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, con una proporción de ésta última comprendida entre el 10 y el 22%, es calcinada a una temperatura comprendida entre 1050 y 1150°C en la que no aparece todavía la fase sólida.

El producto calcinado, así obtenido, contiene silicatos y aluminatos formados por reacción de los óxidos en estado sólido y un exceso de CaO libre. Este CaO libre debe ser, previamente a su empleo como aglomerante, transformado en hidróxido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para evitar así su expansión en la hidrólisis (apagado).

El apagado de la CaO libre deberá ser en este caso selectiva es decir, debe hidratarse todo el CaO, evitando hidratar en lo posible aquellos silicatos y aluminatos que son los que le confieren su valor hidráulico en mayor o menor intensidad. Finalmente es molturado a una finura conveniente para su empleo.

2.1.2.2 Cementos naturales. Una mezcla homogénea natural o artificial de caliza y arcilla, ésta con una proporción del 22 al 26%, es calcinada a una temperatura comprendida entre los 1280°C y 1350°C a cuya temperatura se obtiene una fase líquida en mayor o menor grado. En presencia de éste líquido se consigue mayor cantidad de silicatos y aluminatos y desciende considerablemente el contenido de CaO libre. Se obtiene así un producto aglomerado, al que llamamos clinker de cemento natural, porque incluye una fase líquida cristalizada por enfriamiento. El producto así obtenido es molturado a la finura adecuada para su empleo.

A diferencia de los cementos artificiales, en su fabricación no se añaden sustancias que regulen su fraguado además, se trituran con menor finura que los cementos artificiales.⁷

2.1.2.3 Cementos artificiales o cementos Portland. Los cementos artificiales son aquellos que se obtienen a partir de mezclas de arcilla y caliza convenientemente preparadas y dosificadas, éstos presentan por tanto, una constancia en su composición que no se da en los cementos naturales.¹⁰

Existe una mezcla de caliza y arcilla artificial con una curva granulométrica de 0 a 150 μ y homogeneizada; con una proporción de arcilla muy próxima al 20% y estrictamente dosificada para poder conseguir, en cada caso, la combinación prácticamente total del CaO. Este se calcina a la temperatura de clinkerización comprendida entre los 1400°C y 1650°C, lo que permite esta incorporación del CaO, específica en cada caso.

A esta temperatura se produce una cantidad de fase líquida del orden de un tercio del peso del material y se obtiene por enfriamiento del clinker de cemento Portland compuesto de silicatos, aluminatos y una pequeña cantidad de CaO, próxima al 1%.⁷

2.2.1 Química del cemento Portland

Las materias primas para la fabricación de cemento Portland contienen, en proporciones definidas, sílice, alúmina, óxido de calcio y óxido férrico. La fuente de la cal es proporcionada por los ingredientes calcáreos tales como piedra caliza o la cal, y la fuente de sílice y óxido de aluminio son las arcillas o pizarras. Los materiales que contienen hierro son las piritas. El óxido férrico

forma compuestos con la cal y la alúmina. Las materias primas también contienen pequeñas cantidades de otros compuestos, como magnesio, álcalis, fosfatos, compuestos de flúor, óxido de zinc y sulfuros.¹¹

La composición química del cemento Portland ocupa un lugar importante entre las características que constan en los datos proporcionados por las empresas de cemento. Como se muestra en la Tabla 2.1, la composición química se da en términos del contenido de óxidos presentes. En particular, esta tabla se puede ver que el contenido de CaO y SiO_2 son mucho mayores que otros óxidos. El contenido promedio de CaO es de alrededor del 65 % el cual, es casi tres veces el contenido de SiO_2 . Cuando son adheridos el CaO y el SiO_2 representan más del 85% de la composición química del cemento Portland. Los óxidos mayores próximos contenidos son el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 los cuales son usualmente inferiores al 8%. Los cuatro óxidos CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 representan a los llamados óxidos principales.

En las tablas 2.1 y 2.2, se muestra que el contenido de otros óxidos diferentes a los cuatro óxidos principales es mucho menor; normalmente el contenido de óxido de magnesio es inferior al 5%, el contenido de SO_3 es menor al 3%, y el contenido de los óxidos de sodio y potasio están por debajo del 1%. El contenido de estos dos óxidos alcalinos usualmente es expresado en términos de contenido equivalente de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.¹²

Tabla 2.1 Molino de cemento Portland certificado.¹²

Análisis Químico (%)		Propiedades Físicas		
CaO	62.40	Finura	Blaine	349 m ² /kg
SiO ₂	20.0		Pasa 45 µm	89 %
Al ₂ O ₃	4.20	Expansión en Autoclave		-0.010 %
SO ₃	3.70	Expansión en agua		+0.010 %
Fe ₂ O ₃	3.10	Tiempo de fraguado	Inicial	150 min
Pérdida por ignición	2.90		Final	235 min
MgO	1.90	Contenido de aire		7.4 %
Álcalis (Na ₂ O _{eq})	0.84	Falso fraguado		84 %
Cal libre	0.50			
Insolubles	0.40			
Composición de Bogue		Resistencia a la compresión		
C ₃ S	58.6%	3 días		22.2 MPa
C ₂ S	13.2%	7 días		27.8 MPa
C ₃ A	5.9%	28 días		36.4 MPa
C ₄ AF	9.5%			

Tabla 2.2 Contenido de Óxidos en el Cemento Portland.¹²

Óxidos	Contenido Máximo (%)	Contenido Promedio (%)
CaO	60-69	65
SiO ₂	18-24	21
Al ₂ O ₃	4-8	6
Fe ₂ O ₃	1-8	3
MgO	<5	2
K ₂ O, Na ₂ O	<2	1
SO ₃	<3	1

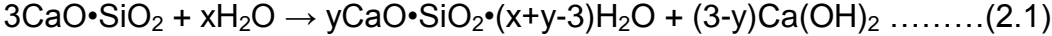
El cemento Portland es un material complejo con compuestos multifásicos con base esencialmente de silicato tricálcico y dicálcico y, de otras fases minerales que existen en proporciones mucho menores, lo que los hace más difíciles de identificar. Las fases principales del cemento Portland son silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), y una fase de ferrita de composición media $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. La fase $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ se produce en forma β , y es denominado belita, contiene, además de Al y Mg, algunos K_2O .¹²

2.2.2 Componentes individuales.

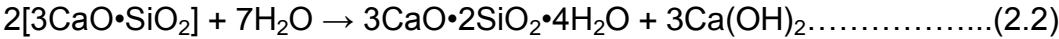
El conocimiento del comportamiento de la hidratación de los compuestos individuales del cemento y sus mezclas, constituye una base para la interpretación de las reacciones que se producen cuando el cemento Portland se hidrata en diversas condiciones.

a. Silicato Tricálcico

El Silicato tricálcico (alita) y silicato dicálcico (belita) juntos constituyen del 75 al 80% del cemento Portland. En presencia de una cantidad limitada de agua, la reacción de C_3S con agua se representa como sigue:¹¹



O en general



Las principales características de la alita son las siguientes:

- Se hidrata y endurece rápidamente
- Es el más importante de los compuestos del cemento
- Determina la rapidez o velocidad de fraguado
- Determina la resistencia inicial del cemento
- La cantidad de calor de hidratación liberada es equiv. a 120 cal/gr.
- Contribuye a una buena estabilidad de volumen
- Contribuye a la resistencia al intemperismo

b. Silicato Dicálcico

La hidratación del silicato dicálcico (belita) se puede expresar a partir de la siguiente ecuación:



La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formada en esta reacción, es menor que la producida en la reacción de hidratación del C_3S . La fase de silicato dicálcico se hidrata mucho más lentamente que la fase de silicato tricálcico. En la Figura 2.2 se comparan las tasas de hidratación del C_3S y C_2S .¹¹

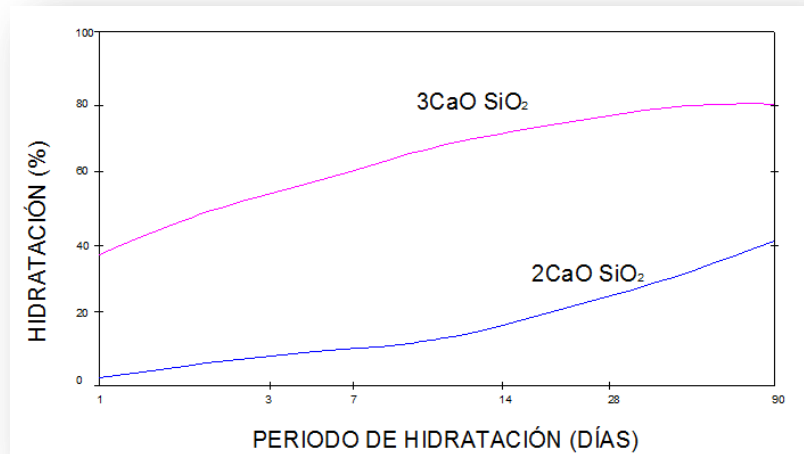


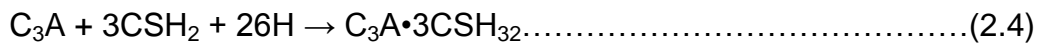
Figura 2.2 Tasas relativas de hidratación de $3CaO \cdot SiO_2$ y $2CaO \cdot SiO_2$.¹¹

En general, el silicato dicálcico actúa de la siguiente manera:

- Contribuye con las resistencias a edades mayores a una semana
- Por su porcentaje en el clínker es el segundo en importancia
- Se hidrata y endurece con lentitud
- Alcanza elevada resistencia a la compresión a largo plazo (después de prolongado endurecimiento)
- El valor de hidratación es equivalente a 63 cal/gr
- Contribuye a la resistencia al intemperismo junto al C_3S
- Su contribución a la estabilidad de volumen es regular

c. *Aluminato Tricálcico*

Aunque la media de contenido de C₃A en el cemento Portland es de 4.11%, influye significativamente en las primeras reacciones. En el fenómeno de reacción, la formación de aluminato de calcio y de varios hidratos de azufre y carboaluminatos, consiste en las reacciones del C₃A. A mayor cantidad de C₃A en el cemento Portland se pueden plantear problemas de durabilidad. En el cemento Portland, la hidratación de la fase C₃A es controlada por la adición de yeso. La fase C₃A reacciona con el yeso en unos pocos minutos para formar etringita de la siguiente manera:



El yeso es un fuerte retardador para la hidratación del C₃A y juntos son aún más eficaces que cualquiera de ellos por separado. La explicación del retraso de la hidratación del C₃A por yeso es que se forma un grano fino de etringita que retarda la hidratación. Cuando el sulfato se consume, la etringita reacciona con el C₃A formando hidratos de sulfoaluminato. Esto sucede en un periodo de 12-36 horas en cementos exotérmicos. ¹¹

Las características principales del C₃A, son las siguientes:

- Es el primero en hidratarse, o sea fragua con mucha rapidez (hidratación violenta)
- Libera gran cantidad de calor durante los primeros días de la hidratación
- Incide levemente en la resistencia mecánica

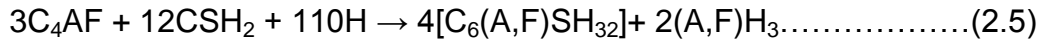
- Tiene baja resistencia al intemperismo (acción del hielo y deshielo)
- No tiene estabilidad volumétrica
- Escasa resistencia a la acción del ataque de los sulfatos y ataques químicos
- Calor de hidratación equivalente a 207 cal /gr

d. Fase Ferrita

La fase de ferrita constituye aproximadamente el 8-13% de un cemento Portland ordinario. En el cemento Portland la fase de ferrita puede tener una composición variable.

Es entre las fases minerales del cemento, la ferrita la que ha recibido mucha menos atención que otras en lo que respecta a su hidratación y las características físico-mecánicas. Esto en parte puede atribuirse a la suposición de que la fase de ferrita y la fase C_3A se comportan de manera similar. No hay evidencia, sin embargo, que existan diferencias significativas. La fase de C_4AF presenta el mismo mecanismo de hidratación que los productos C_3A , sin embargo, las reacciones son más lentas.

En cementos, el C_4AF reacciona mucho más lento que el C_3A en la presencia de yeso. En otras palabras, el yeso retarda la hidratación de C_4AF más eficientemente que lo hace con el C_3A . La tasa de hidratación depende de la composición de la fase ferrita, que contiene mayores cantidades de Fe y presenta una menor tasa de hidratación. La reacción de C_4AF con el producto de yeso se presenta de la siguiente manera:¹¹



El aporte de la fase ferrita a la hidratación del cemento pórtland es la siguiente:

- Reduce la temperatura de formación del clínker
- Lenta velocidad de hidratación
- El calor de hidratación es equivalente a 100 cal/gr (moderado)
- En la resistencia mecánica no está definida su influencia
- Tiene baja estabilidad volumétrica.
- Influye en el color final del cemento.

e. Los álcalis

Los álcalis (sodio y potasio) en el cemento Portland se derivan principalmente de los componentes de la arcilla en la mezcla de crudo y carbón, y su volumen total, expresado como equivalentes Na_2O_{eq} ($Na_2O + 0.64K_2O$), en un rango de 0,3 a 1,5 por ciento. Los sulfatos en un horno de cemento en general, provienen del combustible. Su presencia tiene una influencia significativa en las reacciones de hidratación inicial del cemento.

En el cemento Portland ordinario la fuente de la mayor parte del sulfato (expresado como SO_3) es el sulfato de calcio en una de sus varias formas

posibles agregado al clinker durante la molienda. El objetivo principal de este aditivo es para retardar la tendencia de fraguado rápido, atribuible a la fase C_3A altamente reactiva. El sulfato de calcio puede existir como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemihidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$), o como anhidrita ($CaSO_4$).¹³

2.3 Fraguado y endurecimiento.

Cuando se mezcla un aglomerante hidráulico con una cantidad conveniente de agua para obtener una consistencia normalizada, se forma inmediatamente una masa más o menos plástica según sea la naturaleza del aglomerante y el grado de su finura. Esta mezcla, moldeable, guarda su plasticidad durante cierto tiempo; su temperatura aumenta sensiblemente e inmediatamente también su viscosidad.

En el caso del cemento Portland, tras unos quince minutos a partir del contacto con el agua, se consigue un estado de espesamiento gelificado, pudiendo volverse a una mayor fluidificación mediante un simple amasado mecánico. Este fenómeno tixotrópico es reversible en los primeros momentos de contactos y no modifica sensiblemente el fenómeno del fraguado posterior y pone de relieve la naturaleza coloidal de la pasta.

La tendencia de la masa a mantenerse rígida da lugar a un principio de fraguado, observable por la resistencia que la masa opone a la penetración. El tiempo transcurre desde el momento del contacto con el agua hasta el principio de fraguado se denomina tiempo de fraguado inicial. A partir de este momento, la resistencia de la masa aumenta hasta llegar a ser completamente indeformable, momento que se conoce como el fin del fraguado. Análogamente,

el tiempo que transcurre desde el inicio hasta el fraguado final se denomina tiempo de fraguado final⁷.

2.4 Clasificación de cementos Portland en México

Según lo menciona Kosmatka S.⁹, en México los cementos se especifican según la norma NMX –C-414- ONNCCE. De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos:

CPO.- Cemento Portland Ordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza;

CPP.- Cemento Portland Puzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total del cemento.

CPEG.- Cemento Portland con Escoria de Alto Horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria.

CPC.- Cemento Portland Compuesto, se compone de clínker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones se pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado, la cantidad de clínker y yeso debe ser del 50% al 94%.

CPS.- Cemento Portland con Humo de Sílice, que contiene del 1% al 10% de humo de sílice.

CEG.- Cemento con Escoria de Alto Horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como:

- RS.- Resistente a sulfatos.
- BRA.- Baja reactividad álcali-agregado.
- BCH.- Bajo calor de hidratación.
- B.- Blanco.

Los cementos se dividen en clases de resistencia: 20, 30, 40, las cuales designan resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm^2 , 300 kg/cm^2 y 400 kg/cm^2), respectivamente. Hay dos clases más de resistencia: 30R y 40R, que además de presentar resistencia a compresión mínima a los 28 días de 30 MPa y 40 MPa, respectivamente, también deben presentar resistencia a compresión a los 3 días de 20 MPa (200 kg/cm^2) y 30 MPa (300 kg/cm^2), respectivamente.

La norma también especifica resistencias máximas a los 28 días, para las clases 20, 30 y 30R. El tiempo mínimo de fraguado inicial de todas las clases es 45 minutos. Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial. Por ejemplo, un cemento Portland puzolánico de clase resistente 30R, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se designaría como CPP 30R BRA/BCH.

La norma NMX – C – 184 presenta el cemento de escoria, que se compone del 65% al 90% de escoria de alto horno. Además de estos cementos,

aún están disponibles en el mercado mexicano, el cemento para servicios de albañilería y el cemento para cementaciones de pozo de petróleo tipo G (según la norma NMX-C-315).

2.5 Clasificación de cementos Portland en España

En España, según la RC-08¹⁴, El cemento Portland se designará con las siglas CEM I, seguidas de la clase de resistencia (32.5, 42.5 y 52.5 MPa) y de la letra (R) si es de alta resistencia inicial o de (N) si es de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1.

Los cementos Portland con adiciones se designarán con las siglas CEM II seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A o B) separada por un guión (-) de la letra identificativa del componente principal empleado como adición del cemento, es decir:

- **S** escoria de horno alto
- **D** humo de sílice
- **P** puzolana natural
- **Q** puzolana natural calcinada
- **V** ceniza volante silíceo
- **W** ceniza volante calcárea
- **T** esquistos calcinados
- **L, LL** caliza.

A continuación se indicará la clase de resistencia (32,5 – 42,5 – 52,5), y seguidamente la letra (R) si es de alta resistencia inicial o la letra (N) en el caso de ser de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1.

En el caso de cemento Portland Mixto (M) se indicará además, entre paréntesis, las letras identificativas de los componentes principales empleados como adición, y los cementos compuestos se designarán con las siglas CEM III, CEM IV y CEM V, respectivamente, seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A; B o C). En el caso de cementos puzolánicos tipo IV o cementos compuestos tipo V, se indicarán, además, las letras identificativas de los componentes principales empleados como adición. A continuación se indicará la clase de resistencia (32,5 – 42,5 – 52,5), y seguidamente la letra (R) si es de alta resistencia inicial o la letra (N) en el caso de ser de resistencia inicial normal. En estos cementos, la designación comenzará con la referencia a la norma EN 197-1

2.6 Durabilidad del concreto de cemento Portland

La durabilidad del concreto a través de la vida de una estructura es una de sus propiedades más importantes debido a que, es esencial que la estructura sea capaz de resistir las condiciones para las cuales ha sido diseñada durante el tiempo especificado de servicio.

El deterioro puede ser causado por agentes externos en el ambiente o por agentes internos en el concreto. Las causas se clasifican en físicas, mecánicas y químicas. Las primeras provienen de la acción de la congelación y las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento, mientras que las segundas están asociadas principalmente con la abrasión, por último las causas químicas como lo son los ataques de sulfatos,

ácidos, agua de mar y cloruros también pueden presentarse en las estructuras de concreto.¹⁵

2.6.1 Estado físico del agua en el concreto.

Los distintos estados físicos del agua dentro del concreto y asociados con la estructura C-S-H son mostrados en la figura 2.3. El agua que se encuentra químicamente combinada es aquella que está de manera integral en la estructura de los productos de hidratación. Esta agua no se pierde por secado sin embargo; sometida a calentamientos y elevadas temperaturas los hidratos se descomponen.

El agua de la intercapa penetra entre capas de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Tras un fuerte secado ésta agua se perderá, resultando en el cierre del espacio entre las capas del C-S-H, además del agrietamiento de la pasta de cemento endurecido.

El agua absorbida es aquella que está en la superficie sólida, y se encuentra bajo la influencia de las fuerzas físicas de la atracción, por lo tanto, una parte importante del agua absorbida se puede perder por eliminación de los hidratos de cemento Portland y el 30% de humedad relativa. La pérdida de agua absorbida se encarga principalmente de la contracción de la pasta de cemento Portland en el secado.¹⁶

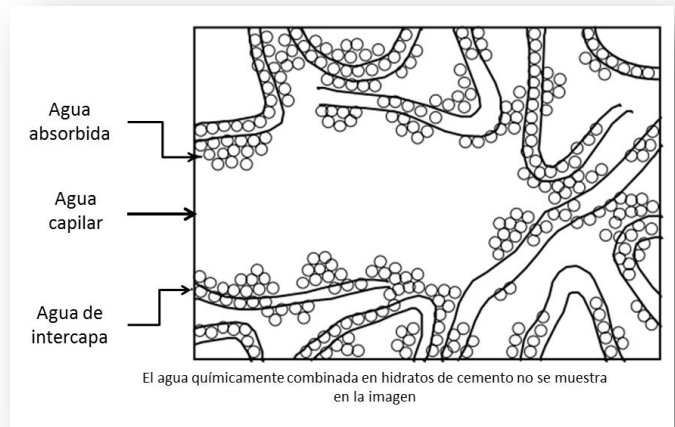


Figura 2.3 *Diferentes formas del agua en el concreto.*¹⁷

2.6.2 Porosidad y permeabilidad

El ataque químico, uno de los tipos de deterioro con mayor recurrencia en las estructuras de concreto, tiene lugar en el interior de la masa, su inicio depende de la penetración del agente atacante a través del concreto, y para que esto suceda, el concreto debe ser permeable. Cuando nos referimos a permeabilidad, podemos tomar el concepto de Kosmatka⁹ el cual describe a la permeabilidad como la habilidad del concreto para resistir la penetración del agua u otra sustancia (líquidos, gases o iones).

Así, la permeabilidad se refiere al flujo a través de un medio poroso; por tanto, el movimiento de los fluidos a través del concreto sucede no solamente por el flujo a través del sistema de poros, sino también por difusión y por absorción o adsorción, sin embargo de manera general se utiliza el término permeabilidad para el movimiento de fluidos hacia adentro y a través del concreto.¹⁵

Análogamente, la porosidad es uno de los factores principales que influyen en la resistencia y durabilidad del concreto; mientras más poroso sea el concreto menor es su resistencia mecánica y tendrá mayor vulnerabilidad ante la agresividad del medio ambiente.¹³

Para el concreto hecho con agregado común de peso normal, la permeabilidad es controlada principalmente por la porosidad de la pasta de cemento, sin embargo; la permeabilidad no es una función simple de la porosidad ya que es necesario que, los poros se encuentren interconectados, es decir, que para los mismos niveles de porosidad, el concreto pueda tener diferentes valores de permeabilidad si sus poros se interconectan en forma interrumpida o no.¹⁸

Existen diversos tipos de poros en el concreto estos, se diferencian en cuanto a su tamaño y sus contribuciones relativas a la permeabilidad, las clasificaciones referidas a ellos se han establecido de acuerdo a su origen o a su efecto, anticipando esta última propiedad en ámbitos mesurables como la fuerza o la permeabilidad. Las causas que originan porosidad en el concreto son las siguientes:

- a) Poros en el gel de cemento
- b) Poros capilares pequeños
- c) Poros capilares grandes
- d) Vacíos grandes (también incluidos en esta categoría pueden estar los vacíos intencionalmente agregados por ejemplo por el arrastre del aire.)
- e) Porosidad asociada con las zonas de interfaz de pasta-agregado

- f) Microvacíos y discontinuidades asociadas con inestabilidades dimensionales que ocurren durante el curado
- g) Porosidad del agregado

López Orozco¹⁹ menciona que el diámetro de un poro de gel estable es de aproximadamente 2 nm. La selección de estos valores están basados en la suposición que los productos de hidratación no pueden precipitar en poros que tienen los diámetros más pequeños que el descrito anteriormente, porque la porosidad de gel reside en la hidratación de productos que se acumulan entre la fase líquida y los granos anhídridos del cemento. La porosidad del gel tiene un efecto mayor en la hidratación pero sólo un efecto menor en procesos de transporte que involucran los líquidos. Sin embargo, no hay en la actualidad ninguna justificación por ignorar los otros tipos de poros listados anteriormente. De esta manera se puede decir que la contribución de cada uno de los tipos restantes de porosidad a la permeabilidad debe ser considerada.

Según la IUPAC²⁰ el diámetro de un microporo es de menos 2 nm, mientras el de un mesoporo está entre aproximadamente 2 y 50 nm. Los mesoporos están entre un rango de tamaño que sirven para las interacciones electrostáticas entre las paredes del poro y el líquido que se filtra y se extiende por encima de un fragmento significativo del área de sección transversal. Una consecuencia de esto puede ser que los procesos de transporte a través de poros que tienen los diámetros en este rango son obstaculizados por efectos electrostáticos. Se sabe bien que las mezclas minerales afectan la permeabilidad; la base para este efecto puede entenderse por lo que se refiere a la formación de una cantidad grande de porosidad en el rango de mesoporos. Sin embargo, esta vista requiere la comprobación

experimental más allá para los sistemas de cemento de Portland-puzolana y Portland-escoria.¹⁹

En la figura 2.4 se esquematiza el rango de tamaño de los poros en la pasta de cemento hidratado, así como una analogía a escala humana del impacto de cada tamaño de poro.

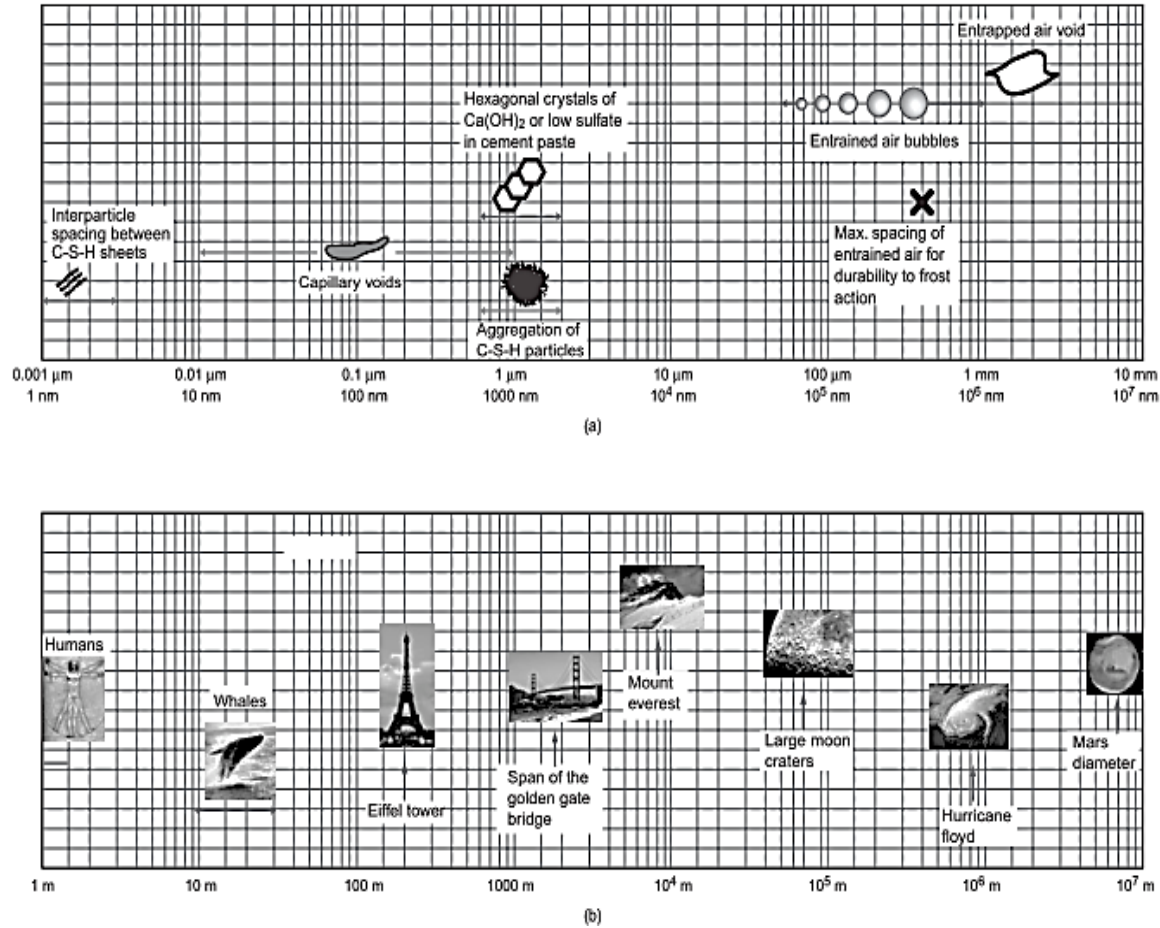


Figura 2.4 Rango dimensional del tamaño de poros en la pasta de cemento endurecida. a) Clasificación en base al tamaño de poro, b) analogía en base al tamaño humano.²¹

Desde el punto de vista de la durabilidad en los sistemas de materiales de base cemento, la clasificación de mayor importancia es la que se establece en base al tamaño de los poros, misma que se describe en la tabla 2.3. De todos

los tipos de poros presentes en el concreto, los de mayor importancia son aquellos que influyen de manera directa en el proceso de capilaridad (poros capilares) y los poros de mayor tamaño (macroporos).

Tabla 2.3 Clasificación de poros en la pasta de cemento hidratada.²²

Designación	Diámetro	Características	Papel del Agua	Propiedades influenciadas
Macroporos	1.0-0.1 mm	Huecos esféricos grandes	Tiene propiedades de fase sólida	Resistencia
	50-10 µm	Capilares grandes	Tiene propiedades de fase sólida	Permeabilidad y resistencia
Poros capilares	10-0.05 µm	Capilares de tamaño moderado. Huecos capilares. Poros entre partículas	Genera fuerzas de tensión superficial moderadas	Permeabilidad, resistencia y retracción a elevada humedad relativa.
	10-2.5 nm	Pequeños capilares de gel	Genera fuerzas de tensión superficial intensas	Retracción a humedad relativa del 50%
Poros de Gel	2.5-0.5 nm	Microporos, poros de gel y poros intergranulares.	Agua fuertemente absorbida; no forma menisco	Retracción y fluencia
	< 0.5 nm	Microporos interlaminares. Poros intergranulares.	Agua estructural implicada en los enlaces.	Retracción y fluencia

Según Powers²³, los poros de gel son aquellos que se forman como resultado de la hidratación del cemento, dado que los productos de hidratación no rellenan completamente el volumen y dejan un espacio entre las partículas del gel. Basado en sus estudios de adsorción- desorción de vapor de agua, los poros de gel son los espacios entre las fibras del gel C-S-H.

Por otra parte, la porosidad capilar es inherente al exceso de agua que se emplea durante el amasado de los materiales base cemento para conseguir una buena trabajabilidad. Según los estudios realizados por Powers²³ a relaciones a/c menores de 0.39 no se puede dar la hidratación completa, pero es necesaria una relación a/c de 0.44 para que los poros de gel se encuentren completamente llenos de agua y no se produzca el fenómeno de la auto-desecación por tanto, a relaciones a/c mayores, los productos de hidratación no rellenan el volumen libre en la pasta de cemento hidratado, dejando un volumen remanente que forma los poros capilares y que puede llegar a formar una red de poros interconectada con el exterior. En función de su tamaño y distribución, pueden ejercer bastante influencia en las propiedades de los materiales base cemento - permeabilidad, durabilidad, resistencia mecánica, etc.

Por otro lado, los macroporos de mayor tamaño (1-0.1 mm) suelen ser generalmente esféricos, originados por burbujas de aire atrapadas durante el amasado del concreto. Dado que son sistemas cerrados, su presencia no interviene en los fenómenos de transporte y suelen estar secos. Estos poros afectan negativamente a la resistencia mecánica por su gran tamaño, aunque juegan un papel muy importante de cara a la resistencia al congelamiento y deshielo.

2.7 Mecanismos de Transporte

Los gradientes de humedad, temperatura, presión hidrostática y concentración de productos químicos del medio ambiente, tienden a perturbar el equilibrio de fluidos y agentes en el concreto ²⁴, así el flujo de fluidos hacia su interior se produce con el fin de mantener el equilibrio interno. Rose, D. A. y Washburn (cit. (Ramachandran & Beaudoin , 2001)¹¹), describen a los procesos de transporte de fluidos en términos de absorción, difusión, adsorción, y

permeabilidad. Para el caso del concreto, tanto su estructura física como el estado físico del agua contenida en los poros, influyen en los mecanismos mencionados, además que las descripciones teóricas de los procesos de transporte, constituyen la base para medir las propiedades de transporte en el concreto.¹¹

2.7.1 Difusión

Es un proceso mediante el cual un ion puede pasar a través del concreto saturado sin flujo de agua, P.A. Claisse ¹⁷ explica que la difusión es impulsada por un gradiente de concentración. Si una solución fuerte está en contacto con una solución más débil, ambos tienden a tener la misma concentración, o sea buscan el equilibrio. Ramachandran lo define como el proceso por el cual un líquido, gas, o iones, pueden pasar a través del hormigón bajo la acción de un gradiente de concentración. La transferencia de masa es el resultado del movimiento aleatorio de las moléculas libres o iones en disolución.

11

2.7.2 Gradiente Térmico

El agua se moverá desde las regiones cálidas a las regiones frías en los sólidos. La velocidad a la que se mueve depende de la permeabilidad de los sólidos. Este proceso es independiente y adicional al proceso de secado (evaporación), que tendrá lugar en las superficies expuestas que están calientes.

La situación más evidente cuando este proceso puede ocurrir es cuando una estructura de concreto que ha sido contaminada con sales de deshielo se calienta por el sol. El agua saturada de sal en los poros de la superficie igran rápidamente en la estructura, e incluso si esto no llega al acero por este mecanismo, la sal puede difundir la distancia restante.¹⁷

2.7.3 Adsorción

Es el proceso mediante el cual las moléculas se adhieren a las superficies sólidas en el concreto (láminas de C-S-H) ya sea por las fuerzas físicas de la adhesión, o como resultado de los enlaces químicos.¹¹ Cabe señalar que los iones adsorbidos se fijan en la matriz cementante de varias maneras y son incapaces de moverse, por lo tanto no pueden causar ningún deterioro.

2.7.4 Succión capilar

La succión capilar se produce la red de poros capilares del concreto, con superficies húmedas o mojadas, y es causada por la tensión superficial del agua²⁵.

2.7.5 Absorción

Es el proceso mediante el cual el concreto absorbe por succión capilar un fluido con el fin de rellenar los huecos vacíos en su interior.¹⁶

2.7.7 Ósmosis

La osmosis depende de una membrana semi- impermeable, ésta actúa como una barrera a través de la cual el agua puede pasar, pero el material disuelto en ella no. Un ejemplo es la capa superficial del concreto que permita la entrada del agua, pero restringiendo el movimiento de la cal disuelta en el agua de los poros. ¹⁷

2.8. Cementación

La mayor parte de sustancias no se mueven en el interior del concreto sin una interacción más o menos importante con los componentes del mismo. Ésta interacción es a veces llamada "cementación" o fijación, y la propiedad del material que se conoce como la capacidad de "cementación". La cementación de una sustancia transportada reducirá su profundidad de penetración y prolongará el tiempo requerido para penetrar un cierto espesor de concreto. Así, la concentración de la sustancia se reducirá debido a la cementación de la misma. Dicha cementación es la responsable del flujo lento, y las pequeñas profundidades de la lixiviación de hidróxido de calcio del cemento, así como del secado del concreto.

El tipo de reacción entre las propiedades cementantes puede ser diferente. Gases, vapores y iones que físico-químicamente no son interactivos con los constituyentes del concreto, muestran una capacidad de cementación en el concreto en función del espacio disponible en los poros y contenido de agua del sistema de poros.

El transporte de sustancias cementantes reducirán la profundidad de penetración y prolongarán el tiempo requerido para la penetración de agentes

en un cierto espesor del concreto. La concentración de sustancias libres también será reducida debido a los efectos cementantes.²⁶

2.9 Dispersiones en sistemas materiales

Jiménez Molero²⁷ define a una dispersión como un sistema formado por la distribución de pequeñas partículas de una o más sustancias en el seno de otra sustancia. Así, se denomina:

Fase dispersiva o medio de dispersión → La sustancia más abundante

Fase dispersa → La (las) sustancia(s) menos abundante(s).

Según el tamaño de las partículas que se dispersan, las dispersiones se pueden clasificar en:

- Disoluciones verdaderas
- Disoluciones coloidales
- Suspensiones

Todos los agentes capaces de deteriorar al concreto en sus diferentes etapas de vida, son parte de sistemas materiales, estos tipos de sistemas están definidos por su composición, estructura y comportamiento. En seguida, se describirán los tipos de sistemas materiales homogéneos y no homogéneos, y ahondaremos en aquellos de aparición frecuente durante los procesos de deterioro.

Por definición, los sistemas materiales homogéneos son aquellos que en todos sus puntos tienen igual composición, estructura y comportamiento, o

bien, que sus propiedades varíen en forma continua, de manera que no se observe superficie límite definida entre sus distintas porciones del sistema. Si se relaciona la homogeneidad con el tamaño de partículas constituyentes de cada uno de los componentes del sistema material cabe decir que en un sistema homogéneo las partículas constituyentes de todos y cada uno de sus componentes tienen un tamaño inferior a 10 \AA , es decir, son como máximo de tamaño molecular. Por exclusión de lo anterior puede decirse que sistema material no homogéneo es aquel que tiene al menos un componente constituido por partículas de tamaño superior a 10 \AA .

Dentro de los sistemas materiales no homogéneos se distinguen a su vez dos tipos de sistemas: Sistemas coloidales (tamaño de las partículas coloidales: $1 \leq \phi \leq 200 \text{ \mu m}$) y sistemas heterogéneos.²⁸

2.9 Clasificación de las dispersiones

La tabla 2.4 muestra las comparaciones y diferencias entre disoluciones, suspensiones y colides, a continuación se define cada una de las anteriores.

*Tabla 2.4. Comparación de las propiedades de las disoluciones, los colides y las suspensiones.*²⁹

Propiedad	Disolución	Coloide	Suspensión
Tamaño de partícula	< 1 nm	10-10000nm	> 10000 nm
Homogeneidad	homogénea	En el limite	Heterogénea
Acción de la gravedad	No sedimenta	Puede sedimentar	Sedimenta
Filtrabilidad	No filtrable	No filtrable	Filtrable

Solución: Es una mezcla homogénea de dos o más sustancias en una sola fase. A esto debemos agregar que, en una solución verdadera no debe observarse asentamiento del soluto y sus partículas deben estar en forma de iones o moléculas relativamente pequeñas.²⁹

Disolución: Mezcla homogénea y monofásica en la que el tamaño de las partículas de la fase dispersa es del orden de las moléculas y no es posible observar la heterogeneidad química existente a nivel molecular y por ningún método físico directo.

Componente en mayor proporción → Disolvente

Componente(s) en menor proporción → soluto(s)

Coloide. Los coloides representan un estado intermedio entre una solución y una suspensión²⁹. El tamaño de la partícula está comprendido entre 10-3 μm y 0.1 μm , a simple vista puede observarse que es heterogénea. El coloide puede separarse del disolvente por ultra centrifugación.¹⁹

Las dispersiones coloidales se denominan también indistintamente, sistema coloidal, estado coloidal, coloide y sol. Así, si en un sol constituido por sílice y agua (hidrosol) se elimina parcialmente el agua, se forma un gel constituido por una masa gelatinosa de SiO₂ fuertemente embebido en agua; si se elimina completamente el agua, aparece un sólido pulverulento cuyas partículas son de tamaño coloidal que suele designarse como gel de sílice.

Las dispersiones coloidales presentan algunas propiedades particulares que no son efecto de la composición química de las partículas coloidales sino del tamaño de las mismas. De entre las propiedades consideradas como específicas de los coloides unas tienen su origen inmediato en el tamaño de las partículas coloidales.²⁸

Suspensión: Las partículas de la fase dispersa son mucho mayores que en las disoluciones y en los coloides. El tamaño de una partícula en suspensión va de las 10 000 veces el tamaño molecular en adelante, lo cual equivale a un tamaño aproximado igual o superior a 200 000 nm. Por ello, en una suspensión es relativamente fácil distinguir a simple vista las partículas que constituyen la fase dispersa, y si se dejan reposar durante el tiempo suficiente llegan a asentarse en el fondo del recipiente por la acción de la gravedad.³⁰

2.10 Nanopartículas en el Concreto

En términos generales se puede decir que una pasta de cemento es un sistema poroso compuesto de cristales de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y un producto de silicato de calcio hidratado conocido como gel CSH.^{31,32} Las pastas de cemento son casi los materiales frágiles y sus propiedades mecánicas dependen básicamente de la porosidad y la relación gel /espacio.^{22,23}

Las nanopartículas se han venido aplicando cada vez más en los múltiples campos para la fabricación de nuevos materiales y/o mejorando las propiedades físicas y/o químicas de los materiales ya existentes. Si las nanopartículas se integran en los materiales de base cemento, pueden poseer algunas propiedades excepcionales.³³

Una reciente contribución al desarrollo de materiales de construcción comprende la adición de sílice coloidal para morteros y concretos, mediante el cual el producto resultante muestra mejores propiedades contra el deterioro con respecto a la ganancia de resistencia, al ataque por sulfatos y reacciones álcali-sílice.³⁴ La sílice coloidal (CS) consta de un núcleo amorfo de SiO_2 con una superficie hidroxilada, que son insolubles en agua. El tamaño de las partículas puede variar entre 1 y 500 nm, por lo que son suficientemente pequeñas como para permanecer suspendidas en un fluido medio sin resolver. Parámetros como la superficie específica, tamaño y distribución de tamaño puede ser controlado por la técnica de síntesis. Debido a la gran superficie específica de las partículas de tamaño nano. Sin embargo, aún no se ha establecido si la hidratación más rápida de cemento en la presencia de nano-sílice es debido a su reactividad química en disolución (actividad puzolánica) o para una actividad de superficie considerable.³⁵

En el estudio de las nanopartículas de SiO_2 es conocido el proceso de reacción con los cristales de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) existentes en la zona de transición entre las pasta de cemento y los agregados; para finalmente producir gel C-S-H. Por lo tanto el tamaño y la cantidad de cristales de hidróxido de calcio se reducen de manera significativa.^{36,38} Ji Tao informó que las nanopartículas de sílice pueden mejorar la permeabilidad al agua del concreto.³⁷

Aguilar Mundaca³⁹ describe que cuando la sílice se mezcla con iones de calcio, sodio o potasio, como los productos provenientes de la reacción de hidratación del cemento, produce partículas de CSH (silicato de calcio hidratado), el que mantiene cohesionadas a todas sus partículas.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE ELECTROMIGRACIÓN APLICADAS AL CONCRETO



CAPITULO 3

TÉCNICAS DE ELECTROMIGRACIÓN APLICADAS AL CONCRETO

En la actualidad, los métodos de electromigración de partículas son tecnologías desarrolladas y competitivas a la hora de considerar la rehabilitación de una estructura y, hoy en día, existe un interés creciente en el desarrollo de modificaciones que permitan mejorar y aumentar la eficacia de estos métodos, incrementando con ello la vida útil de las estructuras.

Básicamente, las técnicas de electromigración consisten en la aplicación de una corriente eléctrica entre dos electrodos al interior de una celda, contenida con soluciones iónicas a migrar, los iones metálicos, iones de amonio y compuestos orgánicos cargados positivamente migrarán hacia el cátodo; mientras que los aniones cloruros, cianuros, fluoruros, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente lo harán hacia el ánodo. Alrededor del ánodo se generan condiciones ácidas, que pueden ayudar a movilizar los contaminantes metálicos para su transporte al sistema colector del cátodo.

En este capítulo, se describirán las bases de la electromigración, así como algunas aplicaciones en la rehabilitación de estructuras de concreto.

3.1 Electromigración

La remediación electrocinética es una técnica innovadora para la restauración de estructuras contaminadas con compuestos iónicos y no iónicos que se hacen migrar mediante la acción de un campo eléctrico. Cuando se aplica corriente eléctrica continua de baja intensidad en la estructura se provoca la migración de las especies presentes en el fluido a través del medio poroso hacia uno de los electrodos.

El fenómeno de transporte por electromigración ha sido un aspecto importante de la ciencia de coloides desde principios del siglo XX. A pesar de que las primeras observaciones sobre los fenómenos electrocinéticos, sus inicios se remontan a los estudios realizados por Reuss en 1809, los primeros desarrollos teóricos de transporte electrocinético se atribuyen a Helmholtz (1879) y Smoluchowski (1903).⁴⁰

3.1.1 Potencial óhmico

Para que circule una corriente tanto en una celda galvánica como en una electrolítica se necesita una fuerza de conducción en forma de un potencial que venza la resistencia de los iones al movimiento hacia el ánodo y el cátodo. Como en la conducción metálica, esta fuerza sigue la ley de Ohm y es igual al producto de la corriente en amperios (A) y a la resistencia de la celda en ohmios (Ω). Generalmente, la fuerza se conoce como potencial óhmico o caída IR.

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ánodo}} = IR \dots\dots\dots Ec.3.1$$

Varios métodos electroanalíticos importantes se basan en las curvas corriente- potencial, que se obtienen midiendo la variación de la intensidad de corriente en una celda en función de su potencial. A potenciales constantes de un electrodo, existe una relación lineal entre el potencial de celda y la intensidad de corriente. A menudo, se encuentran desviaciones de la linealidad y, en estas circunstancias se dice que la celda está polarizada (véase figura 3.1).

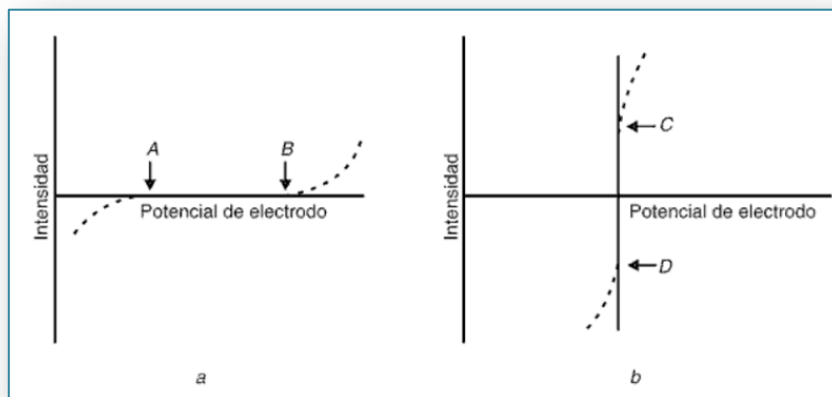


Figura 3.1 Curvas corriente- potencial para un electrodo ideal: a) polarizado; b) no polarizado. Las líneas de puntos muestran la desviación del comportamiento ideal por parte de los electrodos reales.⁴¹

3.2 Mecanismos de transporte de masas

La transferencia de electrones puede estar limitada por la transferencia de masa de iones desde o hacia el electrodo, o por la velocidad de transferencia de electrones en la interfase electrodo- solución. En la siguiente discusión se supone que la velocidad de transferencia en la interfase electrodo- solución es rápida comparada con la velocidad de transferencia de masa. Wilches Zúñiga⁴¹ menciona tres procesos generales de transferencia de masa mediante los cuales pueden llegar las especies reaccionantes a la superficie del electrodo:

- Migración de iones cargados en un campo eléctrico
- Convección debida al movimiento de la solución o del electrodo
- Difusión bajo la influencia de un gradiente de concentración

3.2.1 Electromigración

Se produce cuando un campo eléctrico (diferencia de voltaje) está presente. El ejemplo más claro es el que se presenta en el potencial eléctrico de la corrosión por picaduras en el acero de refuerzo. Si un campo eléctrico es aplicado a través del concreto los iones negativos se mueven hacia el electrodo positivo, y en lugar de electrones en un metal, la corriente va a llevar a los iones de cloruro en el concreto o, posiblemente, los iones hidroxilo de la misma. Este mecanismo se utiliza en el proceso de desalinización en el que se aplica un voltaje positivo a la superficie de una estructura de concreto con el fin de extraer los cloruros de ella. Este proceso tiene la ventaja adicional de la aplicación de un voltaje negativo para el acero de refuerzo que directamente inhibir la corrosión de la misma manera como la protección catódica. Esta técnica tiene el

inconveniente de la eliminación de otros iones negativos en el concreto que puede causar problemas en la práctica.¹⁷

La migración eléctrica está restringida a sustancias iónicas o a moléculas dipolares capaces de experimentar un movimiento dirigido en un campo magnético. Las contribuciones a la corriente límite debidas a la migración eléctrica dependen directamente del número de transferencia (la fracción de corriente transportada por un ión dado) del ión en la solución y del gradiente de potencial eléctrico en la vecindad de la superficie del electrodo. La migración eléctrica puede favorecer a la difusión o bien oponerse a ella dependiendo de si la especie electroactiva es un catión o un anión.

3.2.2. Convección

Las especies electroactivas se pueden trasladar a causa de corrientes termales o por gradientes de densidad, al igual que cuando se agita la solución hacia el trayecto del electrodo. Tales procesos se agrupan bajo el término general de convección. Aun cuando se puede minimizar la convección usando soluciones en reposo en general, es difícil realizar medidas de difusión por periodos mayores de 30, e incluso, medidas de más de 20 pueden presentar efectos convectivos.

3.2.3 Transferencia de masa por difusión

Los gradientes de concentración en la superficie del electrodo dependen del tiempo. En los métodos transitorios o dinámicos el sistema en equilibrio es perturbado intencionalmente por señales de excitación consistentes en

potenciales o corrientes variables. La corriente es la intensidad con la cual la carga fluye a través de la interfase electrodo- solución. La corriente que se origina a partir de un proceso faradáico es una medida directa de la velocidad del proceso y, si la velocidad es proporcional a la concentración, también resulta ser una medida de la concentración de la especie electroactiva en el seno de la solución.⁴¹

3.3. Métodos electroanalíticos

Wilches Zuñiga⁴¹ propone una división de métodos de medición, en primer lugar los que ocurren en la interfase y en segundo los que tienen lugar en el seno de la solución siendo los primeros los que tienen mayor aplicación. Los métodos de medición que suceden en la interfase se basan en fenómenos que ocurren en la interfase entre las superficies de los electrodos y la fina capa de solución adyacente a estas superficies mientras que, los segundos por el contrario, se basan en fenómenos que tienen lugar en el seno de la solución y se intentan evitar los efectos de las interfases.

3.2.1 Métodos potenciométricos

Estos métodos se basan en las medidas del potencial de las celdas electroquímicas en ausencia de corrientes apreciables. Actualmente éste tipo de mediciones se utilizan en celdas en donde las concentraciones de los iones se obtienen directamente del potencial eléctrico de un electrodo de membrana selectiva de iones. Los métodos potenciométricos comprenden dos tipos fundamentales de análisis. Uno implica la medición directa de un potencial de electrodo a partir del cual se pueden determinar la actividad (o concentración)

de un ion activo. Otro tipo comprende la medición de los cambios de la fuerza electromotriz (FEM) originados por la adición de un titulante de la muestra.

3.2.2 Medición de pH

La escala de pH es una serie de números que expresan el grado de acidez de una solución, en contraste con la cantidad total de ácido o base presente en un material, como es el caso con una valoración alcalimétrica o acidimétrica. Sorensen propuso el término pH, y lo definió como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno expresada en molaridad:⁴¹

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \dots\dots\dots (\text{Ec.3.2})$$

La utilidad del pH como una medida de la acidez o basicidad de un medio acuoso, la amplia disponibilidad de los electrodos de vidrio comerciales y la relativamente reciente proliferación de pH-metros de estado sólido han hecho de las mediciones potenciométricas de pH una de las técnicas analíticas más comunes en toda la ciencia.

La medición de pH es una de las técnicas analíticas más utilizadas en la investigación. Un sistema de medición de pH siempre consiste en cuatro partes:

- Un electrodo sensor
- Un medidor de pH (o iones) que contiene un amplificador operacional de entrada con alta impedancia, para medir y señalar el potencial de la celda
- Un electrodo de referencia
- La solución a la cual se le determina el pH

La estandarización de las mediciones se lleva a cabo con lecturas de soluciones de calibración variando el número de soluciones de calibración en función del pH de las muestras a medir.⁴¹

3.4 Aplicación de la electromigración

La electromigración se ha utilizado ampliamente en la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado, ya sea extrayendo iones de cloruros, sodio, entre otros, con el fin de evitar la corrosión e incrementar la vida útil de la estructura; de otra manera ésta técnica también se ha utilizado para introducir iones, inhibidores de corrosión y otras partículas que modifiquen las propiedades o comportamiento del concreto ante los agentes del medio. Una aplicación reciente de ambas aplicaciones lo menciona Mercedes Sánchez⁶ en su estudio “Extracción electroquímica de cloruros en estructuras de concreto armado: Mejoramiento de la eficacia de la migración simultánea de nitrito de calcio” en donde realiza una extracción de cloruros contenidos en el concreto al mismo tiempo que migra hacia el interior del mismo inhibidores de corrosión, en este caso nitrito de calcio, el estudio resultó efectivo logrando el movimiento iónico y mejorando la remoción de cloruros en 35% de eficiencia.

La idea de la electromigración moderna se originó de los experimentos de Kohlrausch⁴² a partir de la migración de iones en una solución electrolítica. Más tarde Arne Tiselius⁴³ con sus mezclas de proteínas y separadas por una técnica de electromigración llamada electroforesis, le valieron el premio Nobel en 1948. El primer aparato de electroforesis fue diseñado por Hjerten⁴⁴ en 1967 y la era actual de la electromigración mediante electroforesis se considera que comenzó con las publicaciones de Jorgenson y Lukacs⁴⁵⁻⁴⁷ en donde se describe la instrumentación de la electroforesis capilar. Aunque la electroforesis

había sido un tema de debate entre los científicos, ganó el reconocimiento en 1989 durante el Primer Simposio Internacional de Alto Rendimiento de la electroforesis capilar, que se celebró en Boston⁴⁹. Esta reunión atrajo a más de 400 científicos para asistir a 100 presentaciones en la teoría y la práctica de la electroforesis.

La técnica de electromigración llamada electroforesis, consiste en el movimiento de moléculas cargadas mediante la influencia de un campo eléctrico sin el transporte del solvente, así las partículas migran en la dirección del electrodo que lleva la carga opuesta. Durante este proceso, las sustancias suelen estar en suspensión acuosa. Debido a sus diferentes cargas y masas, las moléculas y partículas diferentes de una solución migrarán a velocidades diferentes y por lo tanto se separarán en fracciones individuales. Las separaciones se llevan a cabo en soluciones libres de sistemas capilares y en sistemas de flujo tales como placas de capa delgada, películas o geles.⁵⁰

La electroforesis es una técnica analítica de separación de fundamento cinético basada en el movimiento o migración de las macromoléculas disueltas en un determinado medio, a través de una matriz o soporte reticulado como resultado de la acción de un campo eléctrico. El comportamiento de la molécula viene dado por su movilidad electrocinética y ésta dada por la carga, tamaño y forma de la misma. Cuanto mayor es la relación carga/tamaño más rápido migra una partícula en el seno del campo eléctrico.⁵⁰

La electromigración ha sido ya una técnica competitiva en la rehabilitación de estructuras, sin embargo aún existe mucho que investigar, cronológicamente los avances enfocados al uso de la electromigración, específicamente el uso de la técnica de la electroforesis se menciona a continuación.

En el 2001, Jae-Suk Ryua y Nobuaki Otsuki ⁵¹ realizaron un estudio con vigas de concreto reforzado y relación a/c de 0.7 sometidas a corrosión acelerada (expuesta 18 meses a cloruros), la idea principal en esta investigación fue cerrar las grietas producto de la expansión del acero por corrosión. El tratamiento consistió en la migración hacia el interior de las partículas contenidas en soluciones de $[MgCl_2, ZnSO_4, AgNO_3, CuCl_2, Mg(NO_3)_2, CuSO_4, Ca(OH)_2, NaHCO_3]$. Los parámetros en uso fueron una densidad de corriente de $0.5 A/m^2$, tiempo de 8 semanas, el polo de migración fue hacia en negativo como se muestra en la figura 3.2. Los resultados fueron positivos, las grietas en las vigas fueron selladas casi en su totalidad variando con respecto a su profundidad, el tratamiento electrolítico redujo a los iones cloro en el concreto; después de las 4 semanas de aplicación se observó una reducción de iones del 70% de iones en el acero de refuerzo.

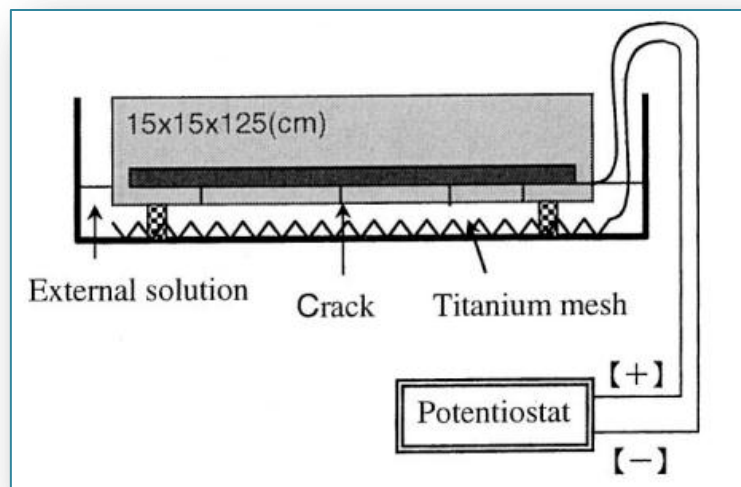


Figura 3.2 Configuración de la aplicación de corriente. ⁵¹

En el 2006, Henry E. Cardenas y Leslie J. Struble ⁵², realizaron una investigación la cual se fundamentó en el transporte electroforético de nanopartículas coloidales de sílice y alúmina de 20nm y 2nm de tamaño de

partícula respectivamente con un campo eléctrico de 39 V/m por 5 minutos, para transportarlas al interior de los poros de la pasta de cemento endurecido. Los especímenes se probaron a cuatro semanas a partir del colado y en el momento de la prueba, todas las muestras fueron saturadas con sustancias altamente alcalinas (hidróxido de sodio, sulfato de potasio, hidróxido de potasio e hidróxido de calcio) simulando fluido de poro, se aplicó un voltaje de 5V por 5 minutos, la configuración de la celda se muestra en la figura 3.3 y consistió en 8 electrodos, (1-6) monitoreo de resistividad y los otros 2 para aplicar carga al sistema.

Se utilizaron pastas de baja calidad con relación a/c de 0.8 y 1, y curados en agua con cal por tres días. Los resultados obtenidos sobre esta investigación dicen que para un campo eléctrico de 39 V/m se exhibió una velocidad de partícula de $2,8 \times 10^{-8}$ m/s en el caso del sílice, en la alúmina se obtuvieron $1,3 \times 10^{-7}$ m/s; además que se obtuvieron reducciones en la permeabilidad, sin embargo, la sílice tuvo que adicionarse con sulfato de calcio.

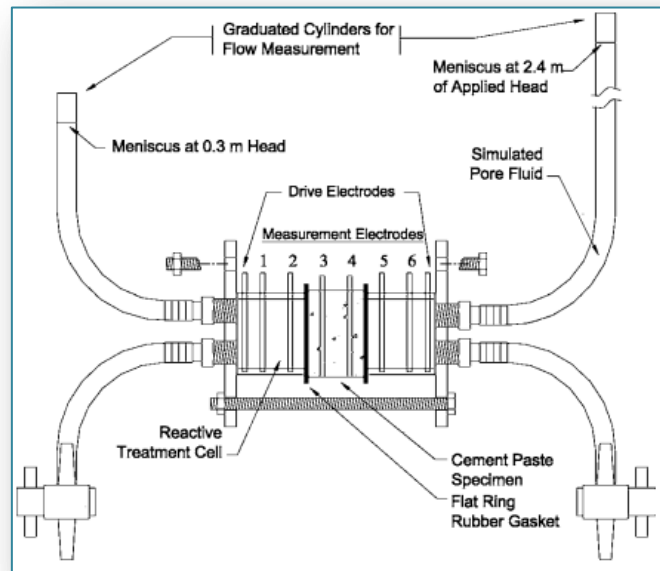


Figura 3.3 Celda de migración por electroforesis estructurada con 8 electrodos. ⁵²

Posteriormente en el 2008, se realizó la modelación de la investigación sobre el transporte electroforético de nanopartículas, en esta modelación se realizaron una serie de correlaciones de datos para obtener un modelo de predicción de la penetración a partir del tratamiento.⁵³

En 2008 Kunal Kupwade-Patil y Henry Cárdenas⁵⁴ trabajaron con especímenes de concreto reforzado exponiéndolos a cloruros, y llevaron al interior de la matriz de concreto un compuesto a base de nanopartículas de sílice recubiertas con alúmina utilizando campos eléctricos, el objeto del estudio fue investigar el efecto de las nanopartículas de alúmina- sílice en el interior de la matriz cementante como agente bloqueador de poros para prevenir el ingreso de cloruros en el concreto. La experimentación consistió primeramente en ingresar cloruros al interior de la matriz cementante, para posteriormente realizar la extracción de los mismos por 14 días con solución de hidróxido de sodio al finalizar este proceso se aplicó el tratamiento electroforético por 6 semanas, reemplazando la solución de nanopartículas cada dos días aplicando una corriente de 1 A/m^2 (Figura 3.4). Se llevó a cabo el seguimiento de potencial electroquímico a partir de pruebas de resistencia a la polarización electroquímica.

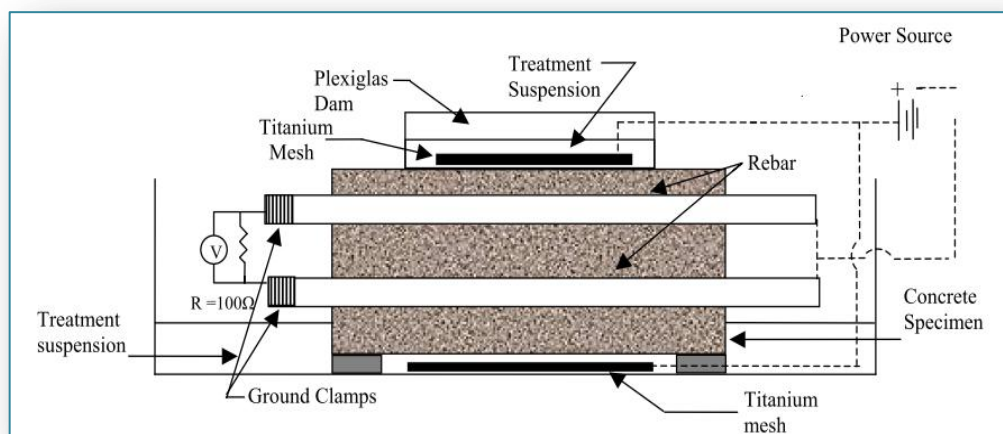


Figura 3.4 Diagrama del circuito utilizado para la extracción de cloruros y migración iónica.⁵⁴

El tratamiento fue exitoso en la mitigación de moderada a alta en la corrosión y prevención del agrietamiento por corrosión en el concreto. Las probetas de control muestran una relación de corrosión alta con un factor de 26 comparado con los especímenes tratados. Por último, el tratamiento fue efectivo en el bloqueo de poros en el concreto e inhibiendo los cloruros que corroen el refuerzo.

En el mismo año, Sean W. Morefield ⁵⁵ del Centro de Investigación y desarrollo del Ejército en E.U.A encabezó la investigación sobre la aplicación de la “Electroforesis” en morteros de cemento y morteros de cemento- ceniza volante, a los cuales se le migraron nanopartículas de humo de sílice en suspensión en agua destilada; nanopartículas de humo de sílice en solución de nitrato de aluminio, silicato de sodio e hidróxido de sodio; y un tercer tratamiento involucró la migración de nanocristales de calcio en solución de acetato de calcio y carbonato de amonio; utilizando corriente directa de 6 -12 V y densidad de corriente de 2 a 4 mA durante 4 horas. Los resultados fueron favorables por lo cual se logró la densificación de los especímenes de prueba sin embargo, se encontró que el sistema de carbonato de amonio mostró un mayor cambio en la densidad total.

En el año 2010, Henry Cárdenas y colaboradores realizaron una serie de publicaciones acerca de las migraciones eléctricas con nanopartículas. El primero de ellos “Mitigación de la corrosión en concreto reforzado endurecido usando depósitos de puzolanas a nanoescala”⁵⁶ efectúa el tratamiento de electromigración a tres distintos tiempos, las condiciones fueron las siguientes: Los cilindros recién vaciados se dividieron en 3 grupos, el primero fue expuesto a 1 año de aguas con sales y posteriormente se le aplicó el tratamiento de electromigración durante 7 días, finalmente pasaron 2 años más en aguas con

sales; el grupo 2 fue sujeto a electromigración y después expuestos a agua con sales por 3 años; y finalmente el grupo 3 fue el de control, solo expuesto a aguas con sales durante 3 años. Todo el tiempo en aguas se supone en ciclos de húmedo- seco (14 x 14 días), el polo de conexión negativo se colocó en la varilla de refuerzo (Figura 3.5).

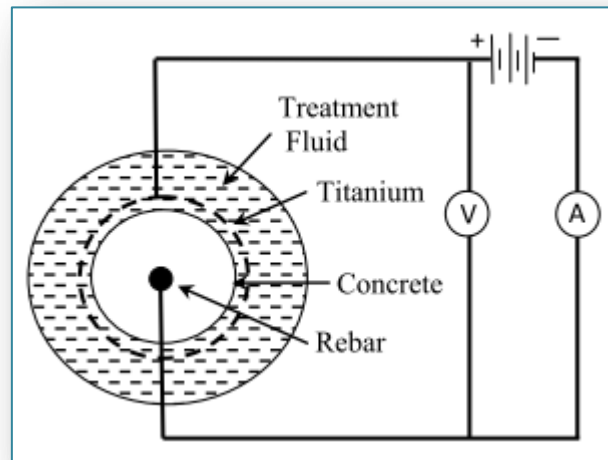


Figura 3.5 Diagrama de conexión para el tratamiento de electromigración.⁵⁶

La aplicación del tratamiento fue efectiva tanto aplicada a edades tempranas como maduras, ya que los resultados muestran que se tuvieron datos de porosidad, pH, y Rp por debajo del umbral.

Otra investigación publicada en el mismo año bajo el título de “Recovery from Sulfate Attack in Concrete via Electrokinetic Nanoparticle Treatment”⁵⁷, los especímenes con los que se trabajó fueron cilindros de 7 cm de diámetro por 15 cm de altura con alambre de titanio al centro de cada muestra curadas en agua de cal, se metieron en solución de sulfatos por 30 días y posteriormente se les extrajeron. Los 7 días posteriores fueron de aplicación de electromigración (véase la figura 3.6), como resultado se observó que en las muestras de referencia hubo una pérdida del 38% de resistencia, en cambio en las muestras

tratadas hubo un incremento a partir de este del 33% y una disminución de la porosidad en un 13%.

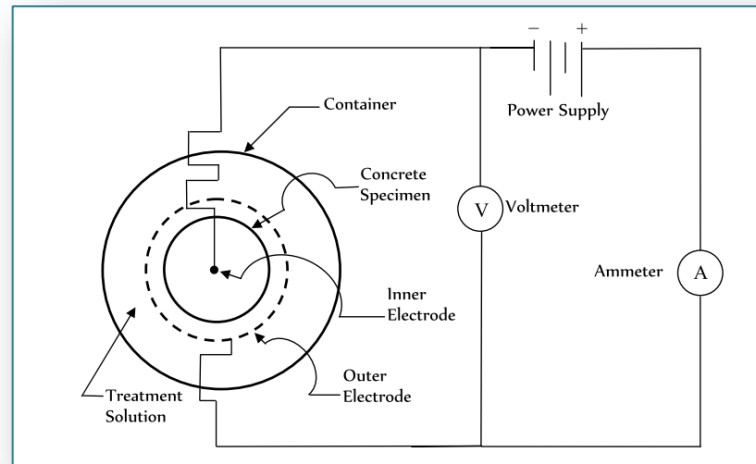


Figura 3.6 Diagrama de conexión para la extracción de sulfatos y aplicación del tratamiento de electromigración.⁵⁷

Finalmente, Henry Cárdenas, Joshua Alexander, Kunal Kupwade-Patil y Luz Marina Calle⁵⁸ realizaron un estudio sobre la aplicación en campo de los tratamientos de electromigración en concreto reforzado como una medida de mitigar la corrosión, en esta investigación se aplicaron tratamientos de migración de nanopartículas de sílice-alúmina, migración de nanopartículas de sílice- alúmina y calcio; se realizó la extracción electroquímica de cloruros en cilindros de concreto expuestos a aguas salinas. Los tratamientos tuvieron éxito en mitigar la corrosión una vez ya iniciada. El pre tratamiento con cal mostró mejoras para evitar el retorno de cloruros, la configuración de la celda fue la mostrada en la figura 3.7.

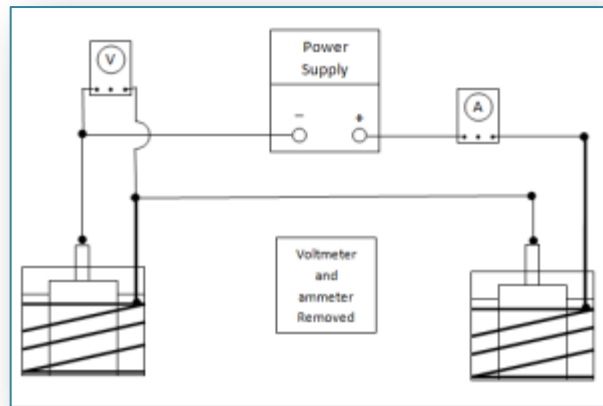


Figura 3.7 Diagrama de conexión.⁵⁸

La presente investigación se propuso en base con los antecedentes anteriores, tomando en cuenta algunos parámetros de medición, configuración de la celda, partículas a migrar, entre otras cosas.

3.5 Movimiento de iones durante la aplicación del campo eléctrico

Durante la aplicación del campo eléctrico se espera un movimiento iónico originado por la aplicación del campo eléctrico, a continuación se muestra un esquema en el que se dicho movimiento en base a la carga de cada ión.

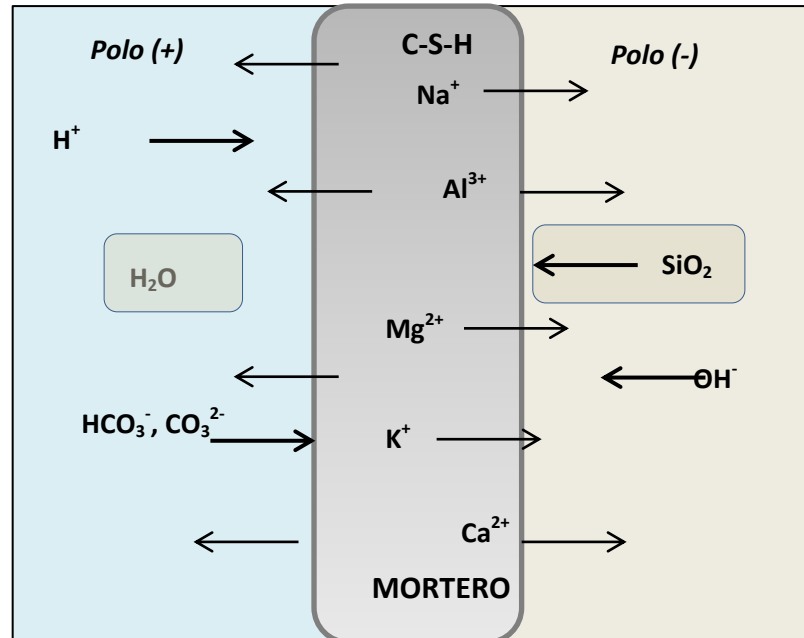


Figura 3.8 Movimiento de iones en un mortero en contacto de agua desionizada y nanosílice coloidal bajo la influencia de un campo eléctrico.

CAPÍTULO 4

MÉTODO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la presente investigación se plantea el efecto de transporte de nanopartículas de sílice coloidal a través de una sección de mortero a edades tempranas a partir de la superficie, con la finalidad de encontrar interacciones con el mismo y ofrecer posteriormente un obstáculo a la penetración de agentes agresivos al disminuir la porosidad y/o permeabilidad del mortero. En el presente trabajo se estudia la posibilidad de acelerar el transporte de nanopartículas por la acción de un campo eléctrico, midiendo el efecto del voltaje de aceleración, el tiempo, tipo y concentración de partículas.

La caracterización del transporte de las nanopartículas así como de la interacción de las nanopartículas transportadas con las fases sólidas del mortero se desarrolló a partir de la siguiente metodología de investigación:

4.1 Fabricación de especímenes

Se elaboraron 4 probetas cilíndricas de mortero estándar con dimensiones de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de alto, de las cuáles se obtuvieron secciones de 1 cm de espesor a partir de cada cilindro, eliminando las partes superior e inferior de cada uno aproximadamente de 2 cm de espesor, teniendo para el estudio solo las secciones interiores (véase figura 4.1).

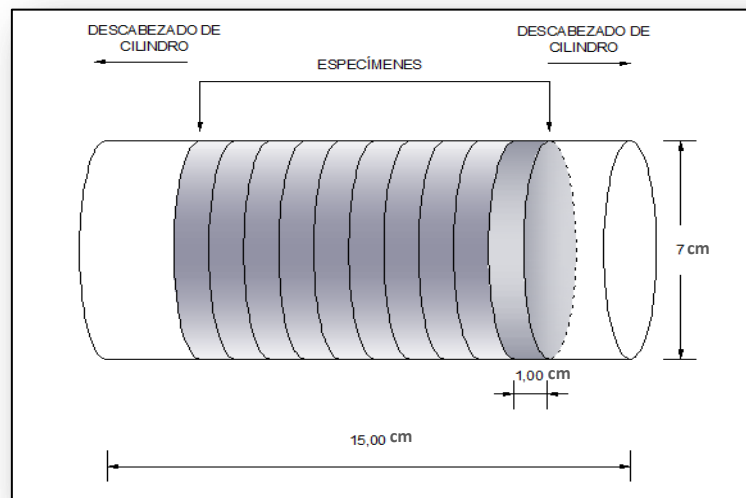


Figura 4.1 Esquema donde se muestra la forma en que fueron seccionados los cilindros de mortero elaborados.

4.1.1 Definición y descripción de los materiales empleados

4.1.1.1 Cemento. Se utilizó Cemento Portland Ordinario, la PCA⁹ define como “un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes,

tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado” (véase sección 2.5).

La posible utilización de este tipo de cemento se decidió con el fin de reducir el efecto en la variación de resultados debido a reacciones posteriores a partir de otros componentes que se dan en cementos compuestos y/o puzolánicos.

4.1.1.2 Agregados. Para la elaboración de los morteros se utilizó arena normalizada (figura 4.2) de acuerdo con las normas UNE 80101, UNE 80101 y la norma ASTM C778. Siendo su composición química y granulometría (tablas 4.1 y 4.2) las siguientes:

Tabla 4.1 *Composición Química de la arena estándar utilizada*

Composición	Porcentaje (%)
SiO ₂	≥ 98
Humedad	< 0,2 %

Tabla 4.2 *Granulometría de la arena estándar usada para la investigación*

Tamiz (Luz de malla (mm))	Residuo acumulado (%)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5



Figura 4.2 Arena normalizada

4.1.1.3 Agua de mezclado. Con la finalidad de evitar la intrusión de iones procedentes del tipo de agua hacia el interior de las mezclas de mortero, se empleó agua desionizada para su elaboración.

4.1.1.4 Moldes para vaciado. A partir de la geometría de las celdas de migración, se decidió la morfología de los moldes de vaciado, por lo cual se emplearon moldes cilíndricos de acero inoxidable con dimensiones de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura, como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3 *Moldes cilíndricos de acero*

4.1.1.5 Suspensiones coloidales. Se dispuso de dos tipos de suspensiones coloidales una con concentración de partículas al 30% en peso y la segunda al 40%, ambas suspensiones cuentan con partículas esféricas, monodispersadas, con superficie modificada con silano y cargada ligeramente negativa; sin embargo, la variación entre ambas soluciones radica en el tamaño de la partícula y la concentración de estas en cada suspensión.

La primer solución cuya composición química es la mostrada en la tabla 4.3 presenta una concentración del 30% en peso de nanopartículas de sílice aproximadamente con un tamaño de partícula de 7 nm, por su parte, la segunda solución coloidal utilizada cuenta con una composición descrita en la tabla 4.4, la cual tiene una concentración del 40% en peso de nanopartículas de sílice coloidal aproximadamente y un tamaño de partículas de 12 nm.

Tabla 4.3 Composición de la dispersión coloidal al 30% en peso.

Silica	29 %
Tamaño de partícula	7 nm
pH	8
Viscosidad	5 mPas
Densidad	1.2 g/cm ³

Tabla 4.4 Composición de la dispersión coloidal al 40% en peso.

Silica	37%
Tamaño de partícula	12 nm
pH	8
Viscosidad	8 mPas
Densidad	1.3 g/cm ³

4.2 Diseño de Mezcla de morteros

La presente investigación pretende evidenciar la migración de nanopartículas hacia el interior de un mortero, debido a esto se propuso la elaboración del mismo con tipo estándar (ASTM-C-91), relación agua- cemento de 0.50 y proporción 1:3 (cemento/arena) en peso.

4.2.1 Fabricación de especímenes

4.2.1.1 Mezclas de Mortero. Las mezclas de mortero se realizaron en una amasadora eléctrica de morteros (véase figura 4.4), siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM-C-305 que se menciona a continuación:



Figura 4.4 Amasadora Eléctrica

a. Procedimiento de amasado

- 30 segundos de mezcla de cemento y agua en la velocidad lenta (140 ± 5 rpm) (véase figura 4.5)
- 30 segundos para el vaciado de la arena con la amasadora encendida y a velocidad lenta (véase figura 4.6)
- 30 segundos de velocidad rápida (285 ± 10 rpm)

- Parar 15 segundos para la limpieza de las paredes del molde de la amasadora, este tiempo sirve para despegar los residuos que aún no han sido mezclados adecuadamente, así mismo mover el resto de los que se encuentren en la base del molde.
- 75 segundos parada
- 60 segundos a velocidad rápida (véase figura 4.7)
- Finalmente, se vacía el Mortero en los moldes.



Figura 4.5 Amasadora mezclando agua y cemento



Figura 4.6 *Incorporación de la arena normalizada*



Figura 4.7 *Mezcla final*

El vaciado por molde se realizó en dos capas iguales correspondientes a un 1/2 de la altura total del molde. Se compactó con una varilla de acero con punta de bala con diámetro de 6.35 mm (1/4") aplicando 25 golpes por capa sobre el área de la misma, así como 4 golpes al molde metálico por capa con un martillo de goma y terminando con un enrase final (véanse figuras 4.8 y 4.9). Todos los especímenes se mantuvieron en los moldes por 24 horas antes del desmolde.

Una vez desmoldados, los cilindros fueron llevados al cuarto húmedo con 100 % de humedad relativa como lo indica la norma ASTM C-192 para cumplir con un curado de manera estándar, por 7 días.



Figura 4.8 *Llenado de moldes cilíndricos*



Figura 4.9 *Moldes llenos y enrasados*

4.2.1.2 Corte y Preparación de especímenes

Las secciones en los cilindros de mortero se realizaron en seco eliminando 2 cm de cada extremo de los cilindros, en seguida se cortaron en secciones de aproximadamente 1 cm de espesor para finalmente someterlos a un proceso de saturación en agua.

El procedimiento utilizado para la saturación fue el siguiente:

1. Se introducen las probetas en un recipiente hermético para vacío (desecador) apoyadas en una rejilla (véase figura 4.10).

2. Se sella el recipiente y se hace vacío hasta reducir la presión interna a menos de 1 mm de Hg (133 Pa)
3. Se Mantiene ese nivel de vacío durante 3 horas.



Figura 4.10 *Equipo de Saturación*

4. Con la bomba de vacío funcionando se deja entrar el agua en el desecador hasta cubrir las probetas, y se deja funcionando la bomba de vacío durante 1 hora más.
5. Después de desconectar la bomba de vacío se permite la entrada de aire en el desecador y las probetas quedan sumergidas en agua mantenida a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 18 ± 2 horas.

6. Posteriormente, las probetas se mantienen sumergidas hasta su ensayo (véase figura 4. 11).



Figura 4.11 *Probetas Saturadas*

4.3 Montaje de celdas

4.3.1 Definición y descripción de los materiales y equipos empleados

4.3.1.1 Fuente de Poder. Se ocuparon dos fuentes de voltaje, una de la marca hp Hewlett Packard modelo E3611A encargada de las celdas suministradas con 12V y otra de la marca Avisor, encargada del suministro de 6V a las celdas restantes (véase figura 4.12).



Figura 4.12 Fuentes de voltaje

4.3.1.2 Celdas de Migración. Se utilizaron celdas acrílicas de migración con un diámetro de 7.5 cm (ver figura 4.13), las celdas fueron llenadas de un lado con solución de nanopartículas y al lado opuesto con agua desionizada, y en otro caso llenadas en ambos lados con agua desionizada; como se muestra en la tabla de desarrollo experimental (véase tabla 4.5).



Figura 4.13 Celdas de Migración

4.3.1.3 Electrodo. Se usó una varilla corrugada de acero al carbón de 5 mm de diámetro a cada lado de la celda de migración y conectadas hacia la fuente de voltaje.

4.3.1.4 Circuito. El circuito completo consta primeramente de la celda de migración, la cual en su interior contempla a la pastilla de mortero, que es el medio poroso a través del cual se quiere realizar el transporte de partículas; también cuenta con dos electrodos de trabajo a cada lado de la celda, los cuales se encargan de generar el efecto de atracción y repulsión iónica, dichos elementos fueron conectados a una fuente de voltaje la cual suministró 12V o 6V según el caso, en cuanto al sentido de la migración(positivo/negativo) se decidió conectar en ambos casos para poder evidenciar el sentido de migración de las nanopartículas de sílice; por otra parte, la celda fue llenada con agua desionizada por un lado y por el otro llenado con la suspensión de nanopartículas coloidales, y en algunos casos con agua desionizada por ambos lados, ésta última conexión con el fin de saber si existe algún arrastre de iones con el agua y bajo el efecto del campo eléctrico.

El montaje de la celda se efectuó según la figura 4.14. Se realizaron dos tipos de conexiones variando el sentido de la migración.

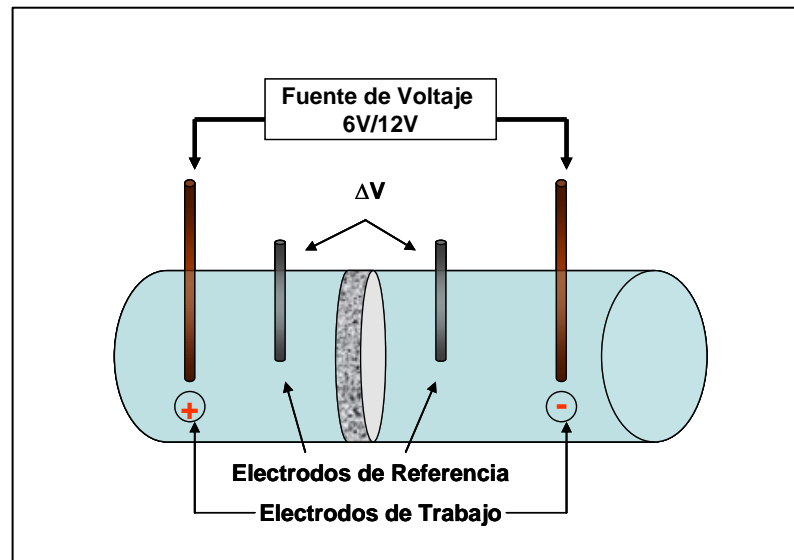


Figura 4.14 Diagrama general de la configuración de la celda de migración

4.4 Aplicación del campo eléctrico

Con el fin de estudiar la efectividad del campo eléctrico, se propusieron dos voltajes de estudio, para este caso se usaron 6 y 12 voltios respectivamente; la corriente fue aplicada durante 7 días de manera constante. Sin embargo, para corroborar el sentido de la migración de las nanopartículas de sílice, se propuso la conexión hacia el polo positivo (en la mayoría de las celdas) y también hacia el polo negativo; lo anterior sin dejar a un lado el posible efecto de arrastre que pudiese tener el agua sola bajo la acción del campo eléctrico (electroósmosis), por esta razón se realizó una tercera variable de conexión, aplicando campos eléctricos en presencia de agua desionizada

únicamente. La última variable considerada fue la concentración de nanopartículas, teniendo suspensiones con concentraciones al 30% y 40% en peso.

4.4.1 Tabla experimental de aplicación de la migración

Tabla 4.5 Descripción experimental

Relación agua/cemento	Voltaje aplicado	Duración del tratamiento	Sentido de migración (→)	Solución
0.5	6 V	28 días	(+)	Agua desionizada
				Nanosílice al 30%
				Nanosílice al 40%
	12 V	28 días	(-)	Nanosílice al 30%
			(+)	Agua desionizada
				Nanosílice al 30%
			(+)	Nanosílice al 40%
			(-)	Nanosílice al 40%

Relación agua/cemento	Voltaje aplicado	Duración del tratamiento	Sentido de migración (→)	Solución
0.5	6 V	90 días	(+)	Agua desionizada
				Nanosílice al 30%
				Nanosílice al 40%
	12 V	90 días	(-)	Nanosílice al 30%
			(+)	Agua desionizada
				Nanosílice al 30%
			(+)	Nanosílice al 40%
			(-)	Nanosílice al 40%

4.5 Condiciones de Prueba

Las celdas fueron montadas en un laboratorio a temperatura y humedad constantes de 24°C y 32% respectivamente, y el tiempo de aplicación del voltaje de 7 días.

La configuración de los montajes de la celda se realizaron de tres formas, la primera propuesta consistió en propiciar hacia el sentido positivo la partícula (véase figura 4.15), en la segunda propuesta de conexión, el sentido de conexión fue hacia el polo negativo (véase figura 4.16).

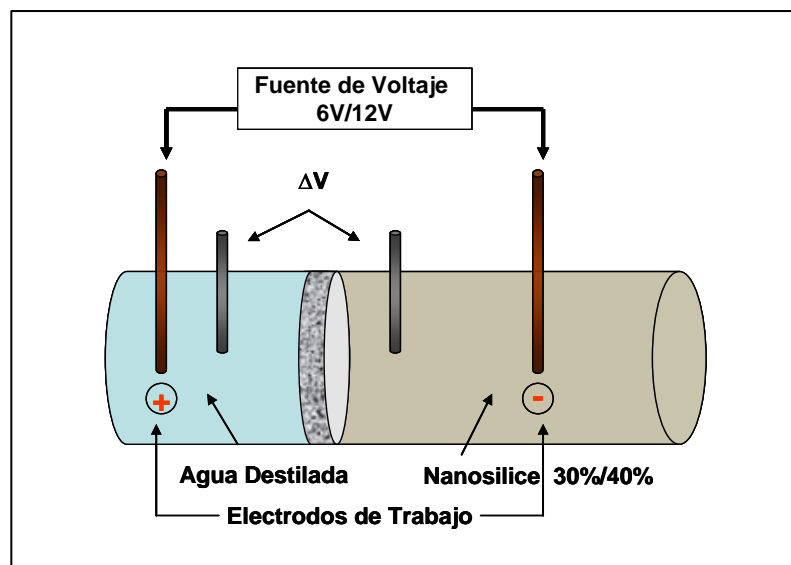


Figura 4.15 Diagrama de conexión de la celda de migración conexión normal

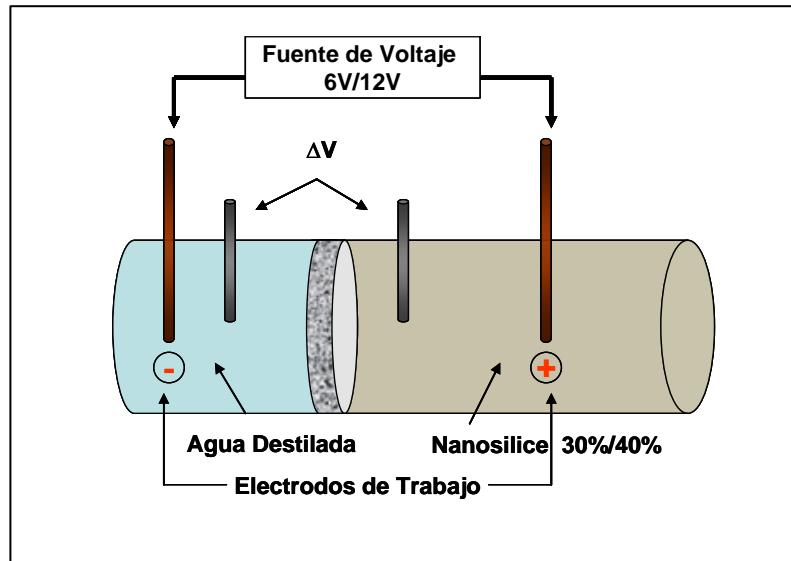


Figura 4.16 Diagrama de conexión de la celda de migración conexión invertida.

En un tercer caso la celda fue montada en las mismas condiciones con la variación que se utilizó agua desionizada a cada lado de la celda (véase figura 4.17) tratando de evidenciar el arrastre o movimiento iónico de agentes del mortero por acción del agua desionizada.

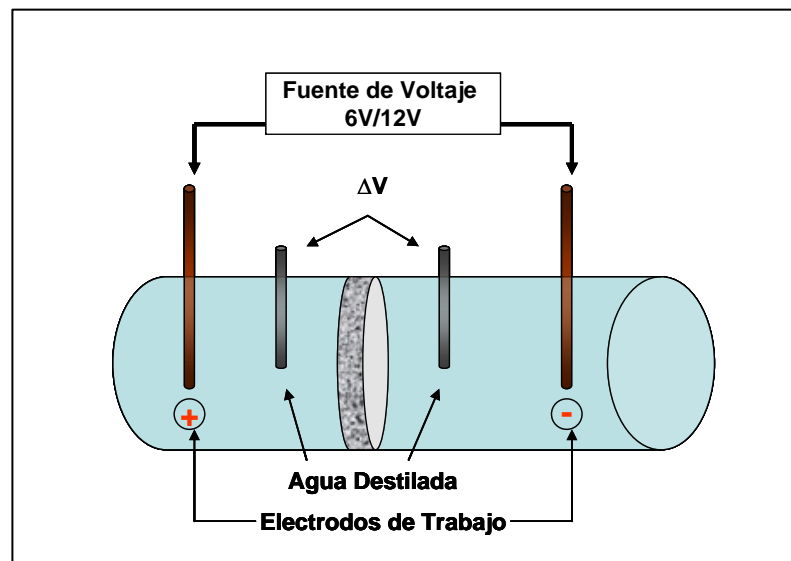


Figura 4.17 Diagrama de conexión de la celda de migración con agua destilada

4.5.1 Voltaje e Intensidad de corriente

El voltaje se aplicó de manera durante 7 días. Por otra parte, la intensidad de corriente fue variable llevando un registro de la variación de ésta dos veces al día durante los días de aplicación.

4.5.2 Toma de mediciones en las celdas durante los ensayos

Todas las mediciones fueron realizadas dos veces cada 24 horas registrando la hora de la toma de medida. Las mediciones realizadas en las celdas fueron dos, la primera fue la medición de la diferencia de potencial en la celda y la segunda la intensidad de corriente en la misma.

4.5.3 Diferencia de potencial eléctrico

La diferencia de potencial eléctrico representa el trabajo para llevar la unidad de carga de uno al otro punto, se realizó la medición de dicho parámetro en la celda a partir de dos electrodos de medición, cada uno se introdujo a cada lado de la celda y un multímetro Autoranging Microvolt DMM de la marca Keithley (equipo de medición), se obtuvo la medición en paralelo la diferencia de potencial en cada celda dos veces cada 24 horas durante el transcurso de aplicación del campo eléctrico (véanse figuras 4.18 y 4.19).

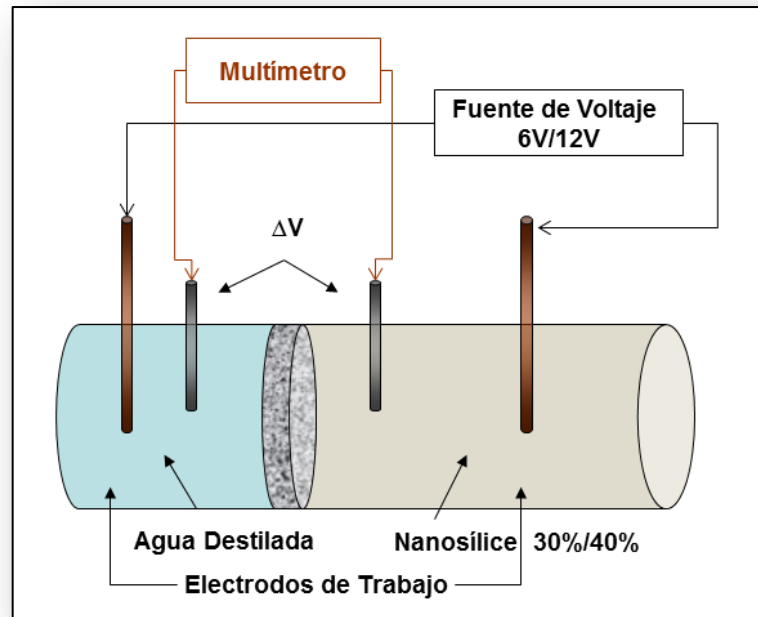


Figura 4.18 *Medición de la diferencia de potencial eléctrico de una celda de migración*



Figura 4.19 *Medición de la diferencia de potencial eléctrico en una celda en conexión invertida.*

4.5.4 Intensidad de corriente

La medición de la variación de la intensidad de corriente en cada celda, se efectuó conectando el sistema en serie, la conexión se realizó de la siguiente manera: Una de las varillas (electrodo de trabajo) se conectó a uno de los polos del multímetro y el cable proveniente de la fuente alimentadora de corriente se conectó al polo restante derivado del equipo de medición (véase figuras 4.20 y 4.21).

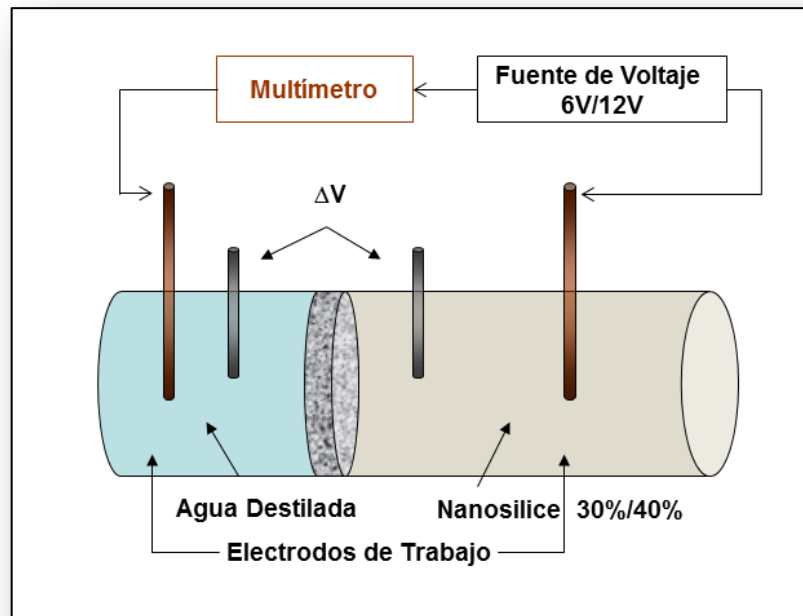


Figura 4. 20 Diagrama de medición de la intensidad de corriente



Figura 4. 21 *Medición de la intensidad de corriente en una celda de migración*

4.6 Toma de muestra de la solución en las celdas

La toma de muestras en la suspensión de cada lado de la celda se realizó simultáneamente a las mediciones de diferencia de potencial eléctrico e intensidad de corriente, después de cada medición se realizó la extracción de una muestra de 5 ml de solución a cada lado de la celdas (véase figura 4.22), después de tomar la muestra se sustituían esos 5 ml por una cantidad igual de la solución que se tratara en cada lado; las muestras fueron almacenadas en tubos de ensayo debidamente identificados (véase figura 4.23)

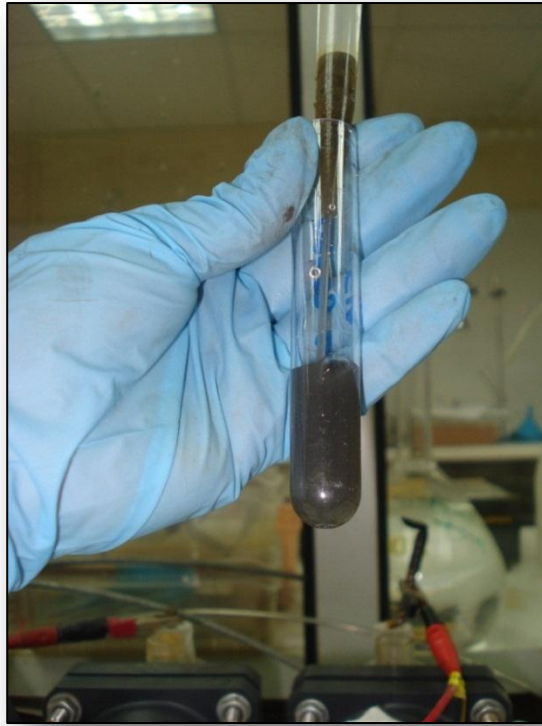


Figura 4.22 Toma de muestra de la solución a cada lado de la celda de migración



Figura 4.23 Muestras de solución de cada celda

4.7 Mediciones en las soluciones de las celdas

Cada celda de migración contenía de un lado solución de nanopartículas dispersas y al otro lado agua desionizada, ambas fueron modificando sus características como la conductividad y acidez con respecto al tiempo de aplicación de los campos eléctricos. Para corroborar esos cambios y cuantificarlos, se realizaron mediciones de conductividad y pH en muestras de 5ml tomadas a cada lado de la celda durante el transcurso de la aplicación de los campos eléctricos.

4.7.1 Medición de pH

En las muestras de 5ml extraídas de cada lado de las celdas, y con ayuda de un equipo pH 1500 de Eutech Instruments, se realizaron las mediciones de pH (véase figura 4.24). La calibración del equipo se realizó al inicio de cada ciclo de medición, el pH de cada solución de calibración (búfer) fue de 4, 7, 10 y 13 (véase figura 4.25).

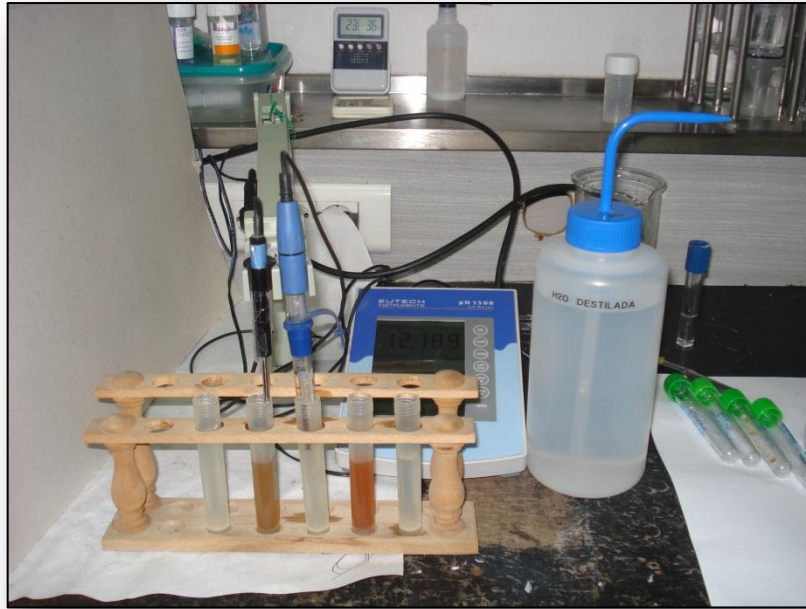


Figura 4.24 Medición de pH con el equipo pH 1500 de Eutech Instruments



Figura 4.25 Calibración del equipo de medición de pH con búfer de calibración de 4, 7, 10 y 13

4.7.2 Medición de la conductividad

Las mediciones de la conductividad se realizaron sobre la misma muestra de 5ml previamente agitada y con ayuda de un equipo HI 255 Combined Meter de la marca Hanna Instruments (ver figura 4.26). El equipo se calibró al inicio de cada ciclo de mediciones con cloruro potásico (KCl) al 0.1 molar.

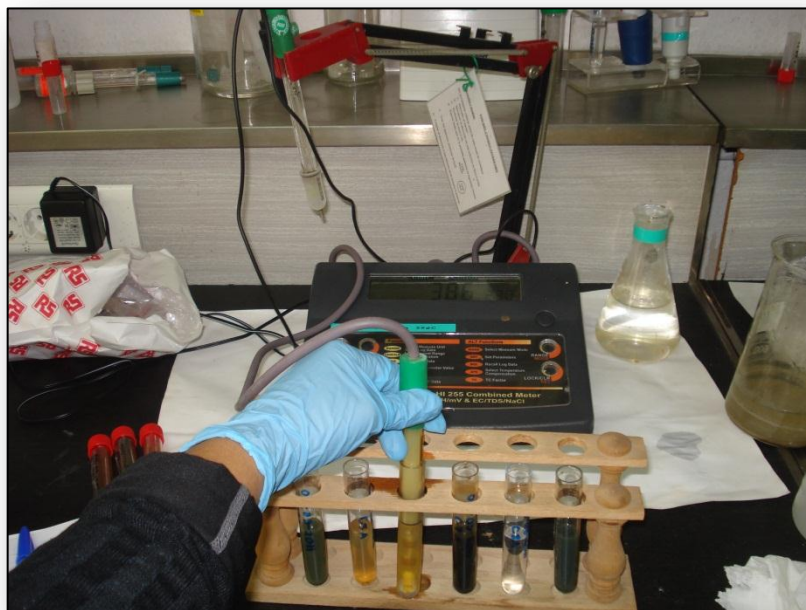


Figura 4.26 Medición de la conductividad en soluciones de celdas

4.7.3 Medición de la Resistividad

La resistividad fue medida en cada pastilla de mortero antes y después del tratamiento con campos eléctricos, el equipo de medición fue el Escort ELC-131D con frecuencia de 1 kHz (véase figura 4.27). EL equipo se calibró al inicio de cada ciclo de medición con una resistencia de 20 ohm.



Figura 4.27 Medición de la resistividad en pastillas de mortero con el equipo Escort ELC-131D

4.8 Técnicas de caracterización de morteros

Con el fin de caracterizar el estado físico de los morteros se tomaron muestras de los morteros con tratamiento aplicado (véase figura 4.28), se llevaron a laboratorio diferentes muestras para realizar los siguientes estudios:

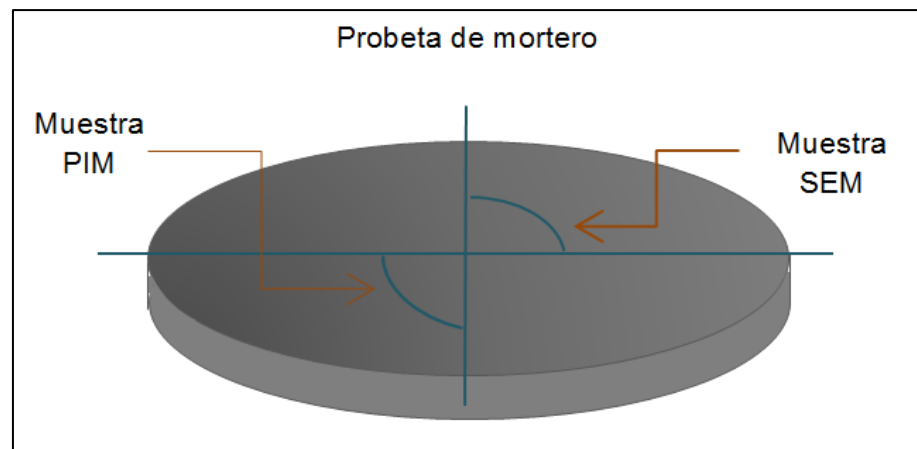


Figura 4.28 Muestreo de probetas de morteros enviadas al Microscopio Electrónico de barrido (SEM) y a pruebas de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM).

4.8.1 Microscopía

4.8.1.1 Microscopio Electrónico de Barrido. Se llevaron muestras de morteros al microscopio electrónico de barrido (véase figura 4.29), se utilizaron aumentos de 40X, 400X y 1500X para observar la superficie general de cada perfil, de otra manera los detalles de cada muestra se tomaron a 1500X y 2000X magnificaciones. El equipo utilizado fue un JEOL JSM. 6360LV y las muestras fueron recubiertas previamente con una lámina fina de oro.



Figura 4.29 Secciones de muestras de morteros enviadas al Microscopio Electrónico de barrido (SEM)

4.8.1.2 EDX. Para esta prueba, las muestras analizadas fueron de las mismas características que las enviadas al SEM, durante dicha prueba se realizaron microanálisis y mapeos cualitativos.

4.8.2 Porosimetría por intrusión de Mercurio. Se realizó la toma de muestras de aproximadamente 3 gramos por muestra sólida (véase figura 4.30), éstas fueron secadas en un horno a 40°C durante 48 horas antes de ser enviadas a la porosimetría. El equipo de medición fue el AutoPore IV 9500 V1.05 de Micromeritics Instrument Corporation.



Figura 4. 30 *Muestras de morteros para análisis de porosimetría.*

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Consideraciones sobre el tipo de celda y especímenes de prueba.

Con dirección a la comprobación de la hipótesis planteada en el capítulo 1, se decidió reducir las posibles variaciones que pudieran haber estado involucradas directamente durante el estudio de los tratamientos. Las primeras fueron las correspondientes a las propiedades del cuerpo poroso en el cuál fué realizada la migración, las principales características controladas fueron el contenido de aire, control de agregados, la calidad de las mezclas de mortero y los procedimientos de elaboración de muestras y saturación por lo cual, fué decidido elaborar el total de probetas en una sola mezcla, siguiendo el mismo procedimiento, así como el llenado de moldes y compactación.

Se utilizó una relación agua cemento de 0.5 con el fin de obtener un mortero con características de calidad estándar y diseñado según la norma ASTM C 1329, obteniendo con estas características una porosidad total de 16.8 %, y con un tamaño de poro predominante de 0.1 a 1 μm y poros menores a 0.1

μm , con ello se puede inferir que el transporte y el alojamiento de las partículas migradas hacia el interior del mortero podría ser realizado.

La configuración de la celda de migración permitió realizar las mediciones electroquímicas y la toma de muestras de las suspensiones durante el tiempo de aplicación del voltaje, el volumen de la suspensión utilizada corresponde a un aproximado de 10 veces el volumen de la muestra de mortero en estudio, para garantizar la homogeneidad de la suspensión durante el desarrollo de la prueba.

Cuando un campo eléctrico es aplicado a través del concreto la electromigración sucede moviendo los iones negativos hacia el electrodo positivo¹⁷, así también existe un incremento de la fracción de poros del concreto menores a $0.05 \mu\text{m}^{59}$, en cuanto al movimiento iónico (Na^+ , K^+ y Ca^{+2}) debido al campo eléctrico dichos iones tienden a moverse hacia fuera de la muestra. Por las razones anteriores para este estudio se decidió someter muestras a la acción de un campo eléctrico en presencia de solamente agua desionizada con el fin de conocer la variación de los rangos de poros por la acción del campo eléctrico generado; así también; debido a la naturaleza de la suspensión coloidal de nanopartículas se consideró necesario comprobar el sentido de migración intercambiando la conexión de la carga en el receptáculo de la suspensión.

5.1.1 Efecto del sentido de conexión sobre la migración de partículas

Como se ha mencionado antes, se realizó la conexión de la celda en sentido normal (migración de negativo a positivo, contenido de suspensión coloidal de nanopartículas de sílice en el lado negativo o catolito de la celda) y

de manera invertida (de positivo a negativo, colocando en el lado positivo o el anolito a la suspensión de nanopartículas de sílice coloidal), ya que debido a la carga eléctrica ligeramente negativa de la partícula se decidió corroborar el sentido de migración. En el caso de los ensayos realizados con la conexión invertida, véase tabla 5.1; se observaron efectos de precipitación en el lado de la celda conectado en positivo (anolito), el cual contenía a la suspensión de nanopartículas, véanse figuras 5.1 y 5.2, formándose un coágulo tipo gel. Una vez terminado el ensayo se procedió a secar a baja temperatura (40°C), véase figura 5.3, con el fin de caracterizar la muestra en el microscopio electrónico de barrido y poder determinar su naturaleza química.

Tabla 5.1 *Tabla de identificación de muestras en conexión invertida.*

Concentración	Polo de conexión	Voltaje
40%	(-)	6V
30%	(-)	12V



Figura 5.1 *Probeta de mortero tratada con una suspensión al 40%, con conexión invertida a 12V, superficie de contacto con el anolito.*

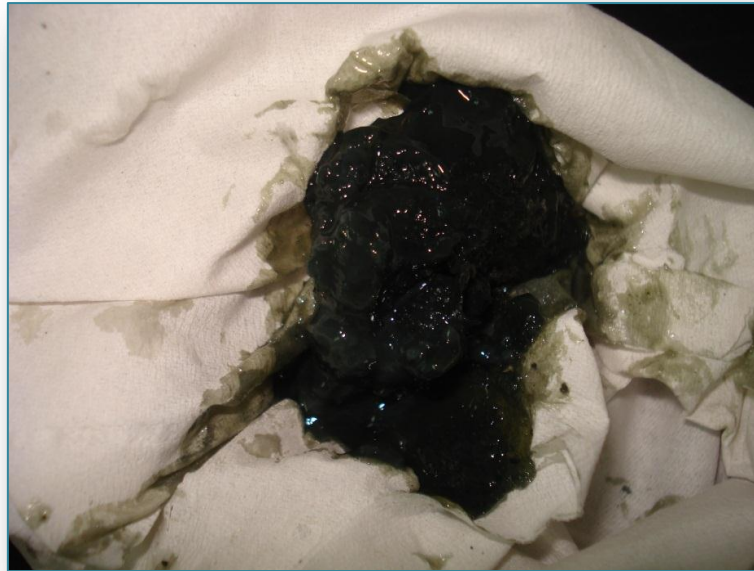


Figura 5.2 *Gel en estado fresco formado en anolito de la celda tratada con 12V en conexión invertida.*



Figura 5.3 *Gel en estado seco formado en el anolito de la celda tratada con 12V en conexión invertida.*



Los procesos mediante los que las partículas de las suspensiones coloidales se agregan y precipitan definen el comportamiento de las mismas en el medio que las rodea. Se sabe que la agregación de partículas es un proceso que se divide en dos clases generales de coagulación y floculación, las cuales se presentan a continuación.

La coagulación implica la reducción de esta repulsión electrostática, de manera tal a favorecer la agregación de partículas coloidales de materiales idénticos. La floculación usa compuestos puente, los cuales forman enlaces químicos entre las partículas coloidales y "enmallan" las partículas en masas relativamente grandes, llamadas redes de flóculos.⁵⁹

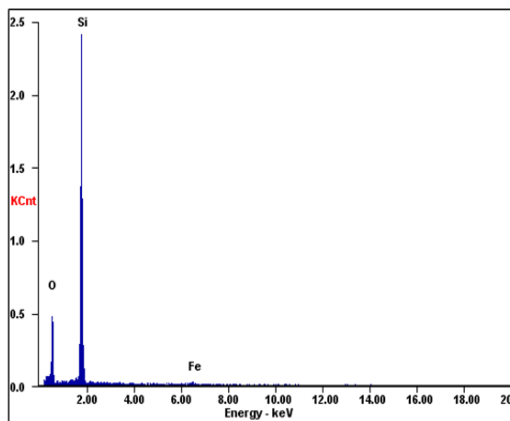
Los coloides hidrófobos (como la sílice coloidal con el que hemos trabajado) se coagulan con rapidez por la adición de pequeñas cantidades de sales que aportan iones a la disolución. Estos coloides se estabilizan por repulsión electrostática. Por consiguiente, una explicación simple de la coagulación por iones en disolución es que los iones disminuyen la repulsión electrostática entre las partículas lo suficiente como para que las partículas se agreguen.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un flóculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

De lo anterior, podemos decir que el proceso de gelificación en la celda conectada de manera invertida se debió a la adición de sales a la suspensión, esto originado por el sentido de la migración ya que al ser conectada la suspensión de nanosílice coloidal al polo negativo, los iones (calcio, aluminio, fierro, magnesio, etc) procedentes del interior del mortero migraron hacia esta suspensión. El producto fue la formación del gel mediante la coagulación de la suspensión coloidal, dicha coagulación se muestra en las figuras 6.5 y 6.5.2. Hay una serie de parámetros que afectan el proceso, incluyendo la variación del pH, temperatura, concentración de los reactivos, la relación molar H₂O/Si, entre otros.⁶¹

En el interior de los poros del mortero podría presentarse este fenómeno debido al cambio del pH del medio (en este caso el pH del mortero). El progreso de la reacción da lugar finalmente a la formación de un gel, que consiste en este caso en una red de enlaces Si-O-Si interconectada en tres dimensiones.

Los resultados del microanálisis realizado en el gel en estado seco determinaron que los principales elementos de la muestra son oxígeno y silicio de acuerdo a las figuras 5.4 a 5.9.



Element	Wt%	At%
OK	37.22	51.59
SiK	59.78	47.21
FeK	03.00	01.19

Figura no. 5.4 Espectro de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco.

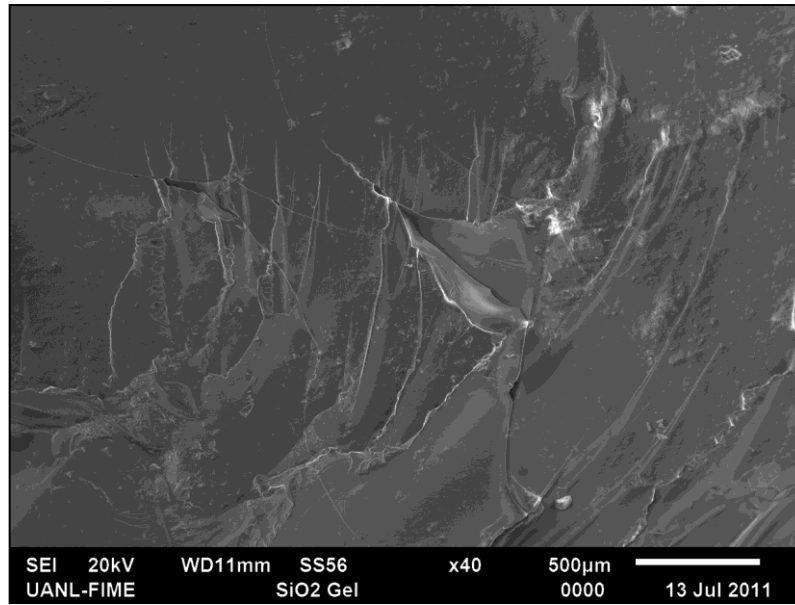


Figura 5.5 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido.

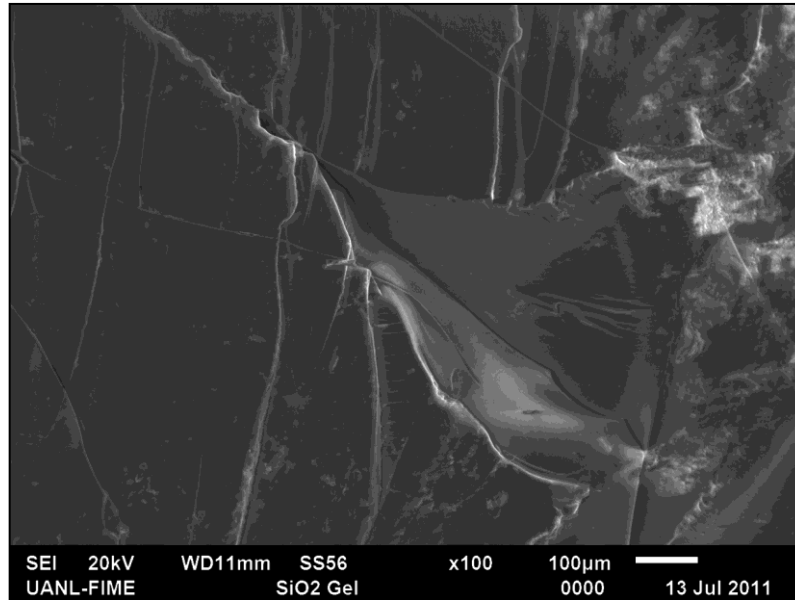


Figura 5.6 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 100x.

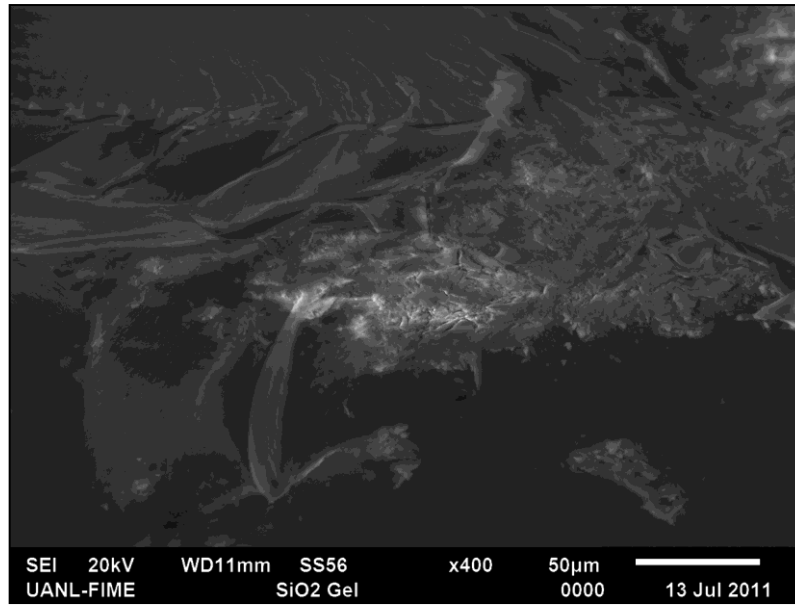


Figura 5.7 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 400x.

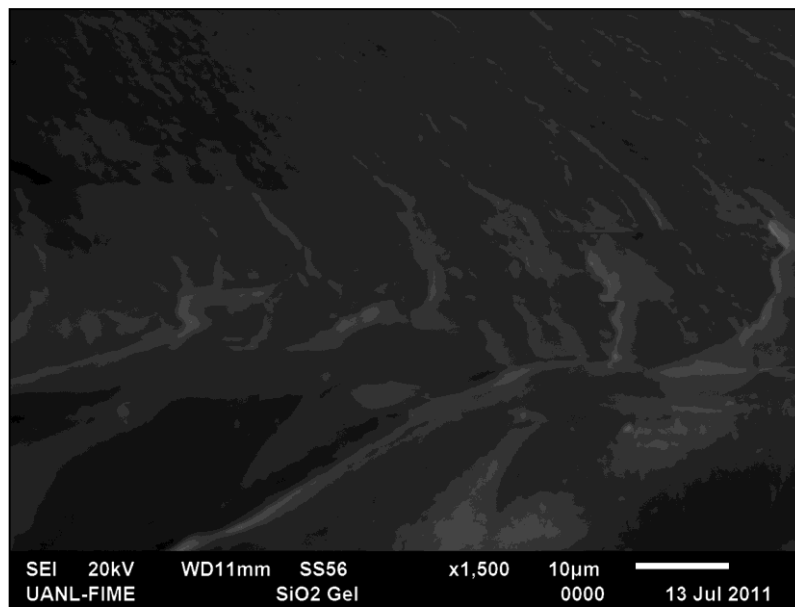


Figura 5.8 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 1500x.

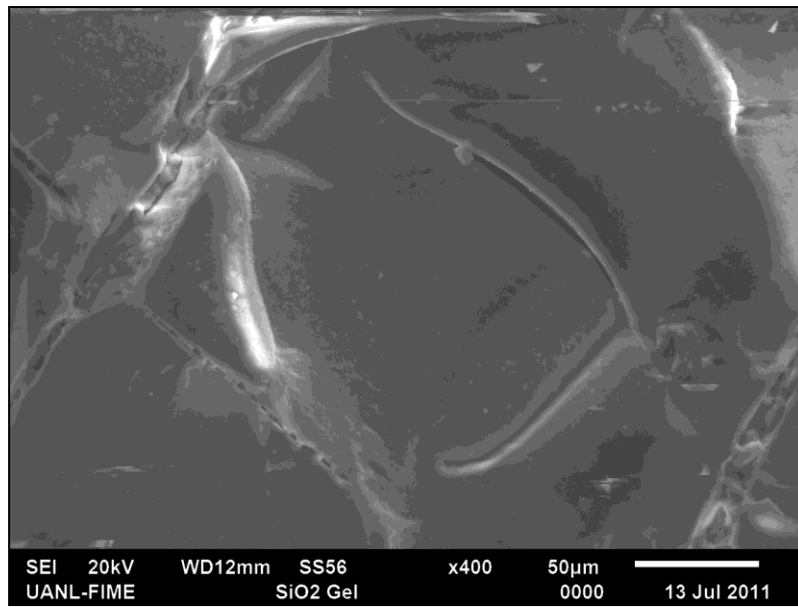


Figura 5.9 Imagen de la muestra de nanosílice gelificada en estado seco llevada al microscopio electrónico de barrido a 400x.

5.2 Análisis y resultados de la Solución

5.2.1 Diferencia de potencial eléctrico

Como se describió en el método experimental, se realizaron mediciones de la diferencia de potencial de las celdas durante la aplicación de los campos eléctricos, a continuación se muestran inicialmente las gráficas resultantes de las mediciones en las celdas de referencia, la primera con un voltaje aplicado de 6V, y la segunda con 12V.

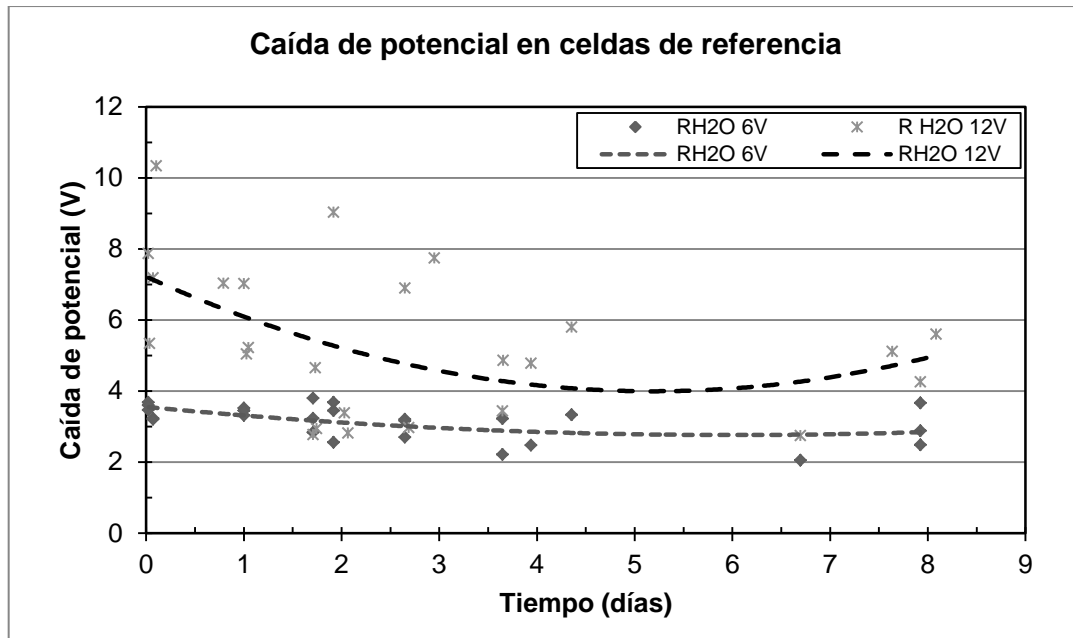


Figura 5.10 Comportamiento de la caída de potencial en muestras de referencia a 6 y 12 V.

Se observa que con base al voltaje aplicado a las celdas de ensayo se presentó una caída de voltaje en ambas condiciones (6V y 12V) siendo la más notoria la obtenida a 12V, los espesores mayores de la sección de prueba dieron como resultado un menor campo eléctrico. En la Figura 5.10 se muestra la comparación entre las dos muestras de referencia la primera con un voltaje aplicado de 6V y la segunda con un voltaje de 12V. En lo que respecta a la muestra con 6V, la caída máxima de potencial fue de 3.66 V/cm, el cual se calculó utilizando el valor de la diferencia de potencial entre el espesor de la muestra, dicho valor es debido a la caída de voltaje con respecto al valor suministrado, sin embargo; el comportamiento del campo eléctrico a lo largo del tiempo de aplicación de voltaje tiene una tendencia casi constante por lo cual, se puede suponer que el voltaje de 6V aplicado tiene un efecto mínimo sobre la microestructura de la muestra, cuestión que se tendrá que comprobar analizando la microestructura de la misma. Estas muestras presentaron una variación del campo eléctrico que oscila entre 3.70 y 3.19 V/cm. Por el contrario, la muestra tratada con un voltaje de 12V, presenta diferencia de potencial que



oscila entre 10.34 y 4.65 V/cm, que podría representar en una mayor interacción con la microestructura de la matriz cementante.

5.2.1.1 Conexión normal

Como se ha mencionado, en las muestras de prueba tratadas a 6V, al igual que en las de referencia, el campo eléctrico presentó un comportamiento más o menos uniforme entre los valores iniciales y finales cuando el sentido de migración se configura hacia el polo positivo, modo normal, véase figura 5.11.

Las muestras conectadas de manera normal (30% y 40% de concentración) y con un voltaje aplicado de 12V, presentaron un incremento en su diferencia de potencial eléctrico a partir del 5to día, siendo el valor final superior al inicial entre un 14 y 16%; véanse figuras 5.11 y 5.12. Ahora, con respecto a la referencia el campo eléctrico generado en la muestra del 30% de concentración se mantuvo sobre el valor de la referencia, y por el contrario la muestra al 40% presentó un campo eléctrico menor a la referencia sin embargo; en ambos casos la tendencia final fue el incremento de la magnitud del campo eléctrico durante el desarrollo de la prueba.

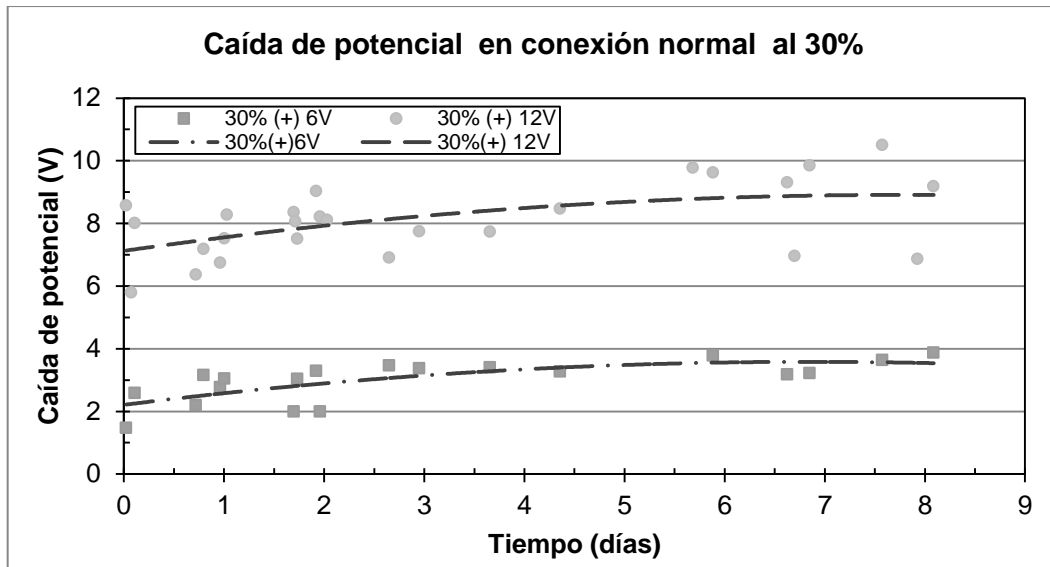


Figura 5.11 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión normal y concentración al 30%.

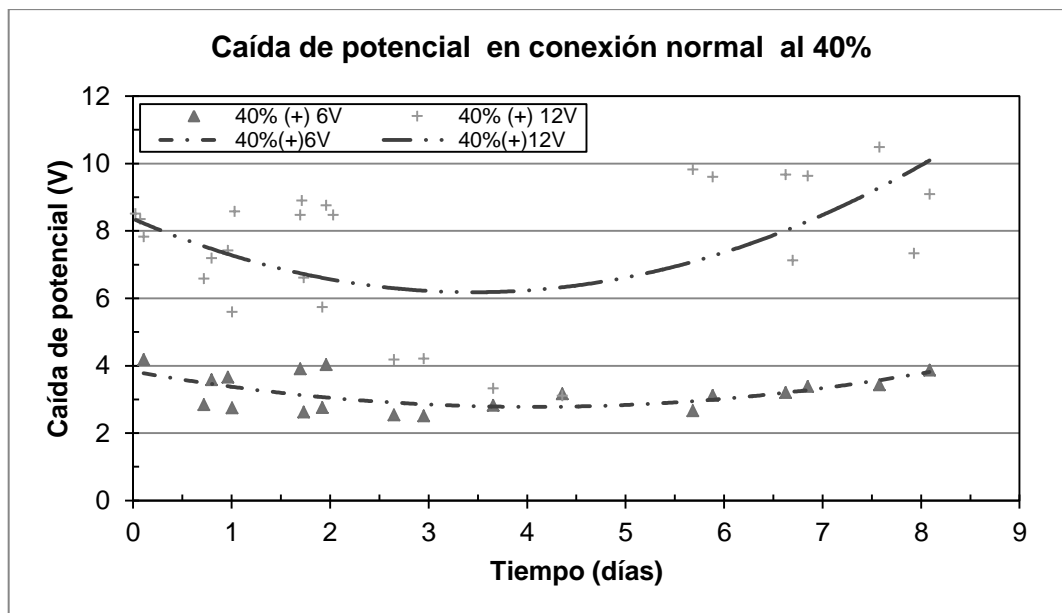


Figura 5.12 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión normal y concentración al 40%.



5.2.1.2 Conexión invertida

El comportamiento de las mediciones de la muestra tratada con 6V y conectada de manera invertida (40% de concentración) presentó una diferencia de potencial eléctrico similar a las muestras conectadas de forma normal (figuras 5.12 y 5.13). Por otro lado la muestra tratada con 12V (40% de concentración), mostró una tendencia similar a la de las muestras a 6V pero de mayor magnitud (superiores a 6 V) mostrando hacia el final de la prueba un decremento en la fuerza del campo eléctrico existente; véase figura 5.13.

Con los resultados obtenidos a 6 y 12V, no fue posible determinar el efecto asociado a los tamaños y/o concentraciones de partículas sobre el campo eléctrico; durante la realización de los ensayos no se utilizó una resistencia variable para ajustar el valor de voltaje aplicado al sistema por lo que las variaciones son mostradas en las gráficas anteriores.

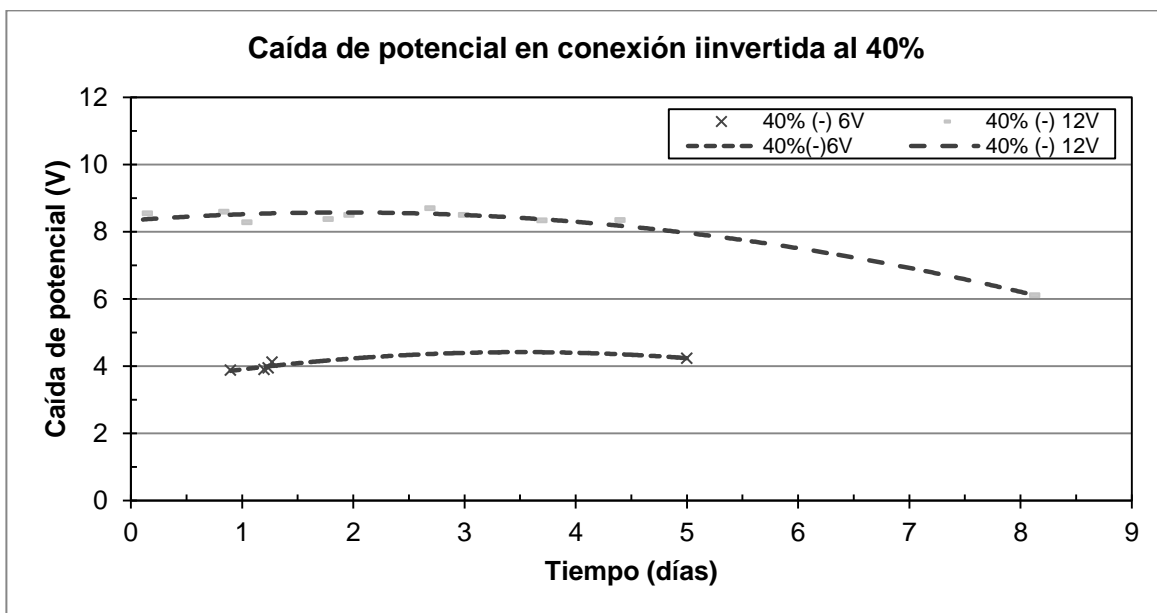


Figura 5.13 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión invertida y concentración al 40%.

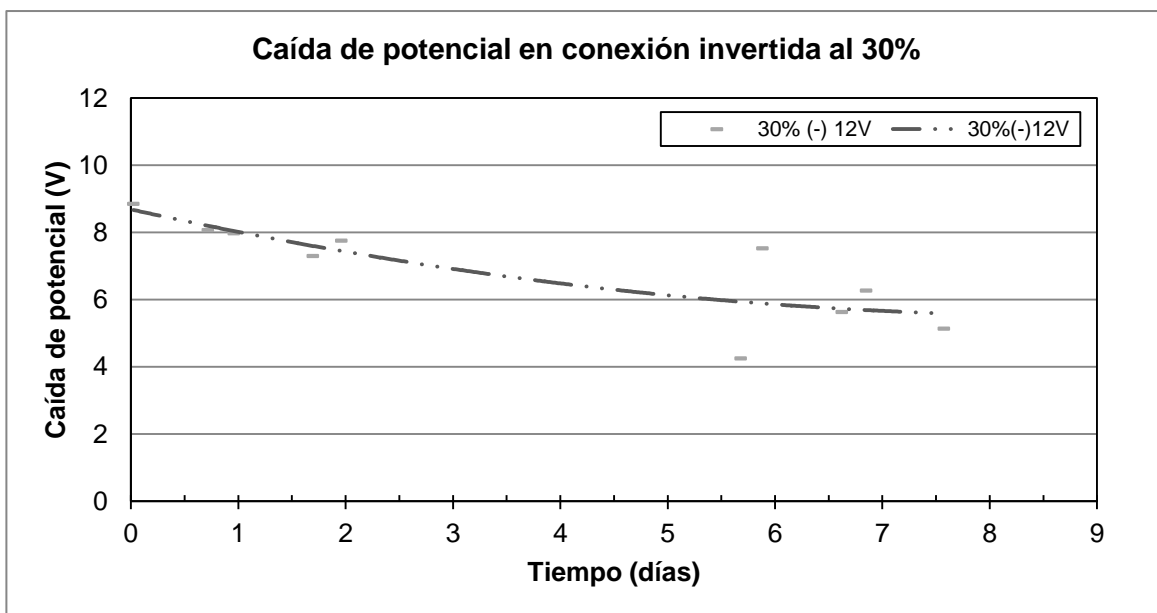


Figura 5.14 Comportamiento de la caída de potencial en muestras en conexión invertida y concentración al 30%.

Los resultados obtenidos de las mediciones de la diferencia de potencial eléctrico indican que se presentó una variación del campo eléctrico en el sistema de celda, lo cual indica que existe una fuerza conductora entre el ánodo y el cátodo, esto se traduce a que ha existido un movimiento de cargas producido de un lado de la celda hacia el otro dependiendo de la polaridad de cada una de ellas.

5.2.2 Intensidad de corriente

A partir de las mediciones de intensidad de corriente (mA), se realizaron cálculos para la obtención de la variación de la densidad del flujo eléctrico (ΔD) en las celdas de estudio. En el anexo A-1 se muestran las tablas de mediciones y cálculos con respecto a cada campo eléctrico aplicado.

5.2.2.1 Celdas de Referencia

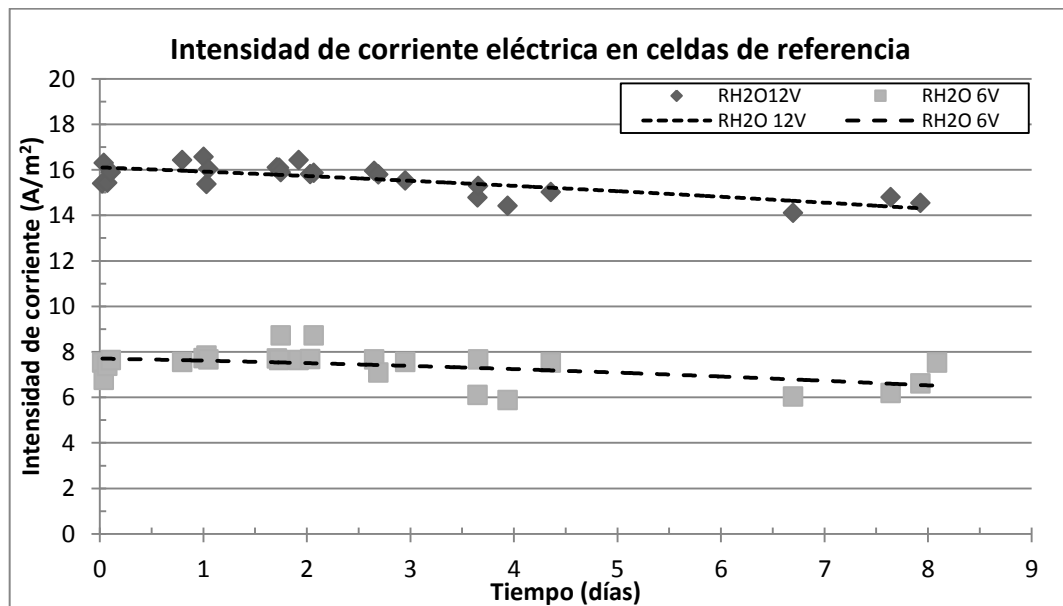


Figura 5.15 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras de referencia tratadas con campos eléctricos de 6 y 12 V respectivamente.

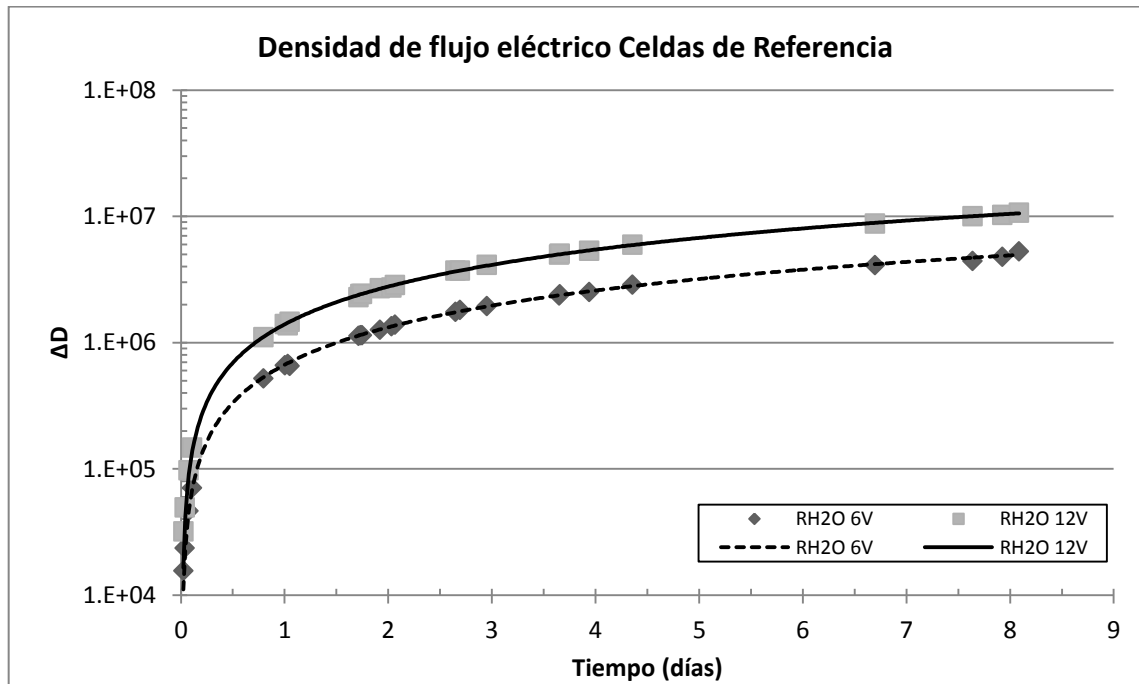


Figura 5.16 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras de referencia tratadas con campos eléctricos de 6 y 12 V respectivamente.

El parámetro de la intensidad de corriente resultó tener una tendencia constante y correspondiente (según la ley de Ohm) al voltaje aplicado. Para el caso de las muestras tratadas con 6V, la intensidad de corriente fluctuó entre 25 y 27 mA (véase anexo A-1) lo que representa una variación de 7.40% con respecto a las celdas de referencia y, para las muestras tratadas a 12V la intensidad de corriente fluctuó entre 51 y 57 mA (véase anexo A-1) para una variación de 10.50% respecto a su referencia durante el desarrollo de las pruebas. El doble de voltaje promueve el doble de intensidad de corriente debido a que las características de las muestras afectaron de una misma forma el flujo eléctrico, por lo tanto en principio debería ser más evidente el efecto de un campo eléctrico mayor.

5.2.2.2 Conexión normal

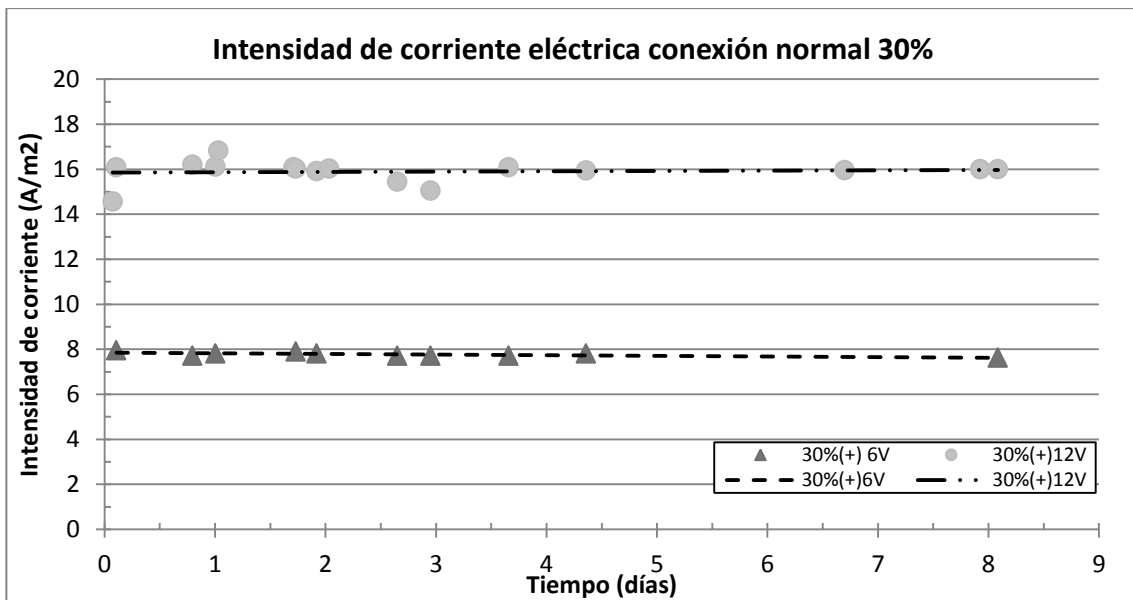


Figura 5.17 Comportamiento de la intensidad de corriente eléctrica en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 30% de concentración

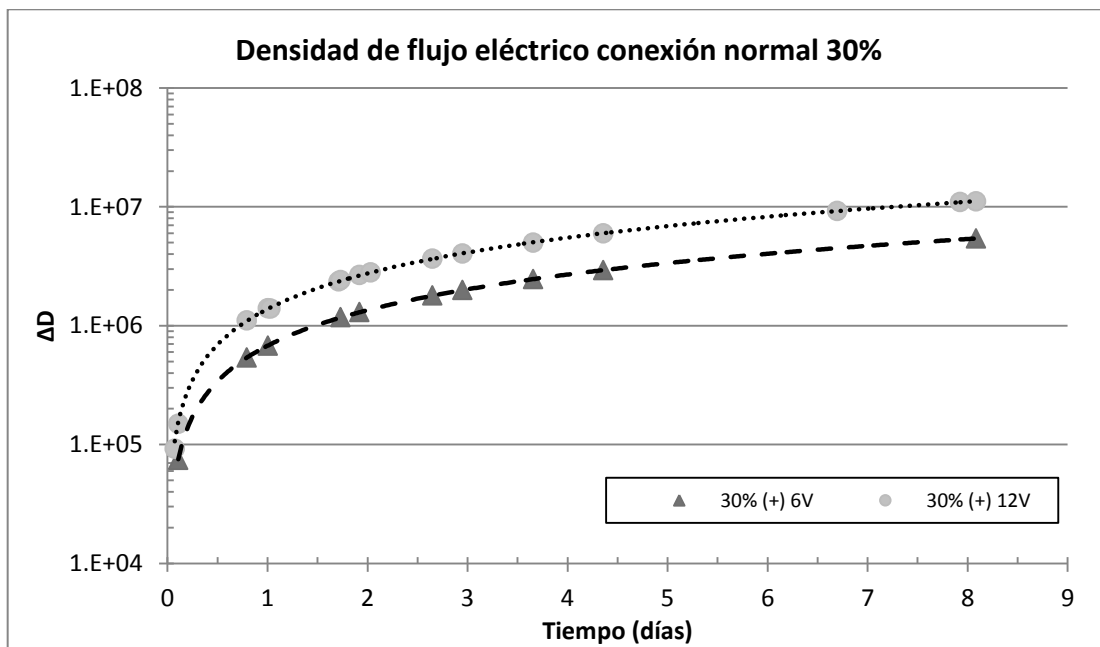


Figura 5.18 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 30% de concentración

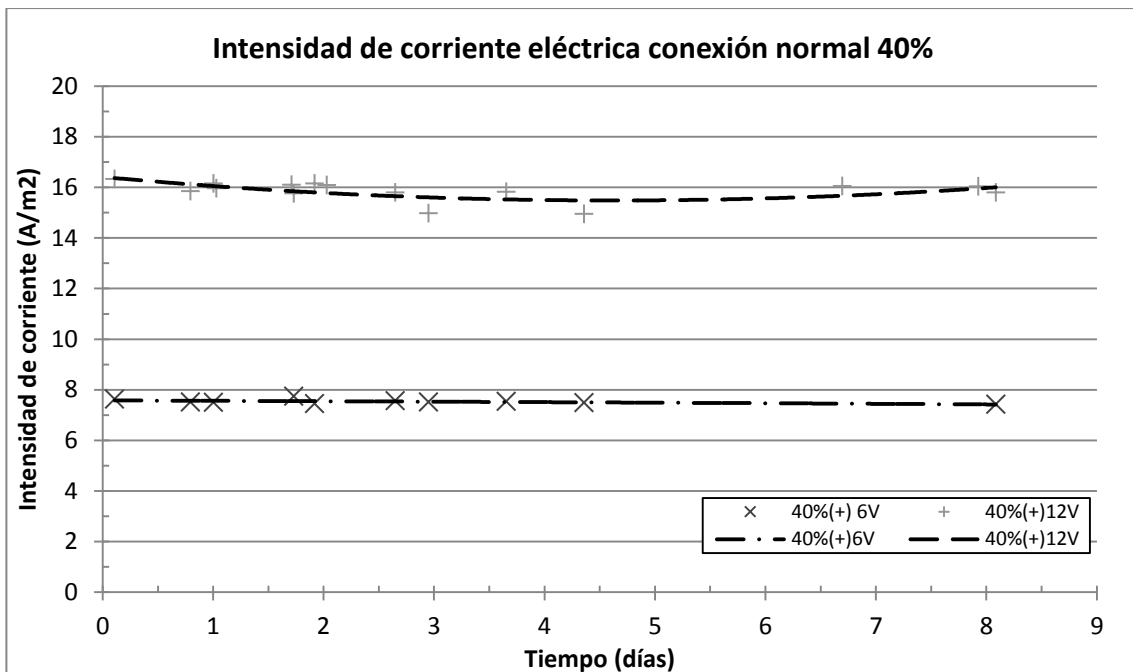


Figura 5.19 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 40% de concentración

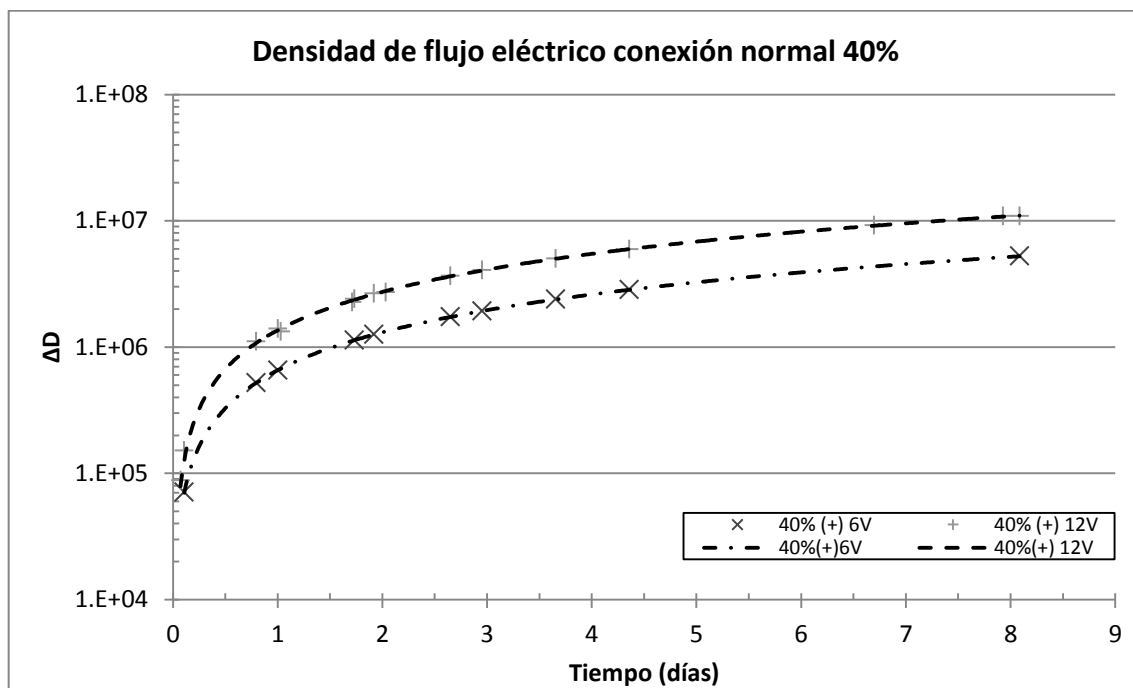


Figura 5.20 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera normal y al 40% de concentración

5.2.2.3 Conexión invertida

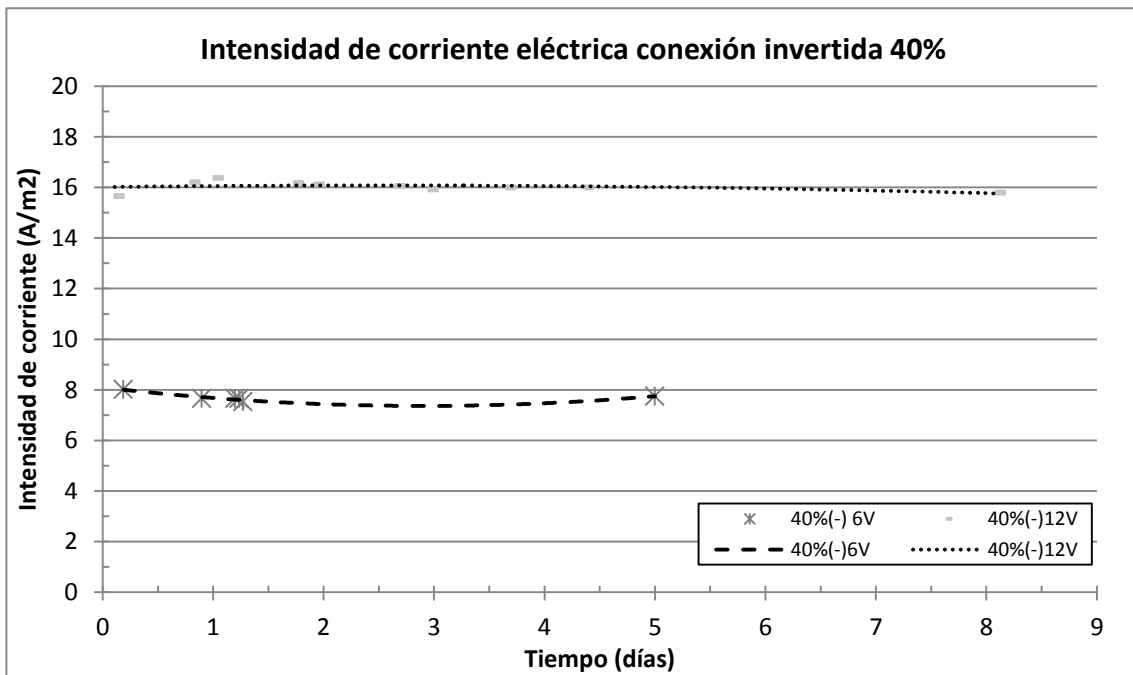


Figura 5.21 Comportamiento de la intensidad de corriente en muestras tratadas conectadas de manera invertida y al 40% de concentración

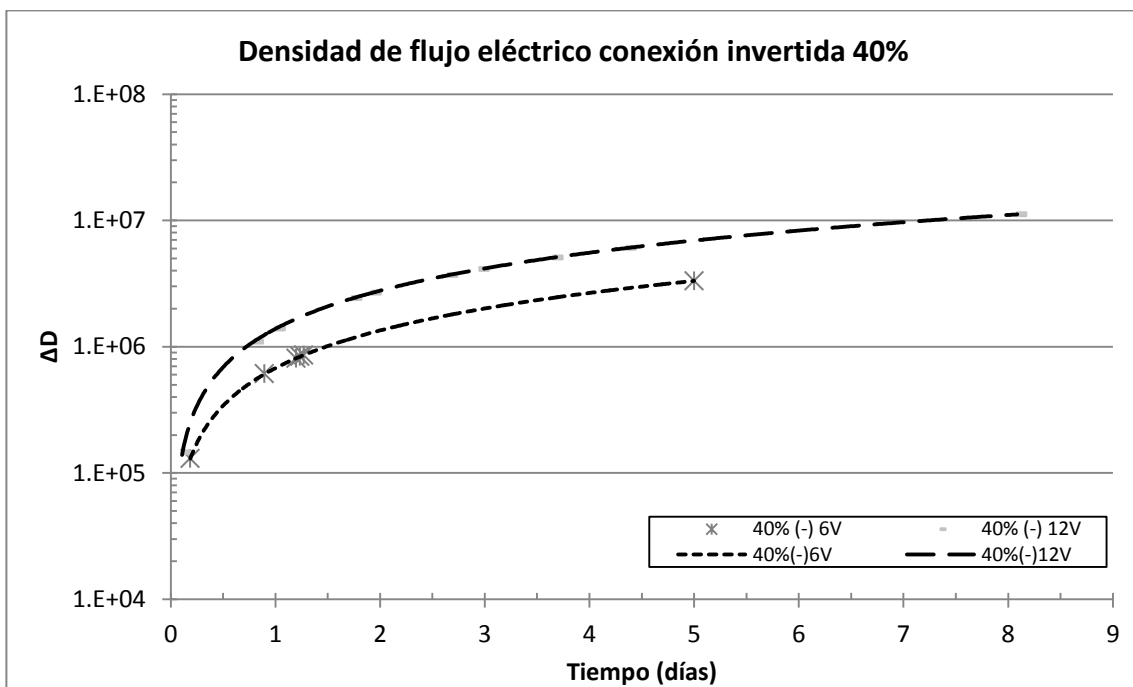


Figura 5.22 Variación de la densidad de flujo eléctrico en muestras tratadas conectadas de manera invertida y al 40% de concentración



La poca variación de la intensidad de corriente da como resultado que el incremento de la densidad de flujo eléctrico se presente de manera constante dentro del circuito electroquímico y la diferencia de la densidad de flujo eléctrico entre 6V y 12V también es invariable. La configuración de conexión no afecta la densidad de flujo eléctrico por lo que la carga aplicada es independiente del sentido de migración (véanse figuras 5.17 – 5.22)

5.2.3 Efecto del pH en el anolito y el catolito

El registro de las mediciones de pH, se realizaron hacia cada lado de la celda, diferenciando entre el polo positivo y el negativo. A continuación se mostrarán las gráficas obtenidas de las mediciones de las celdas, exponiendo los resultados en base al campo aplicado, polaridad y en comparación con sus respectivas referencias reportadas en el anexo A-2.

5.2.3.1 Celdas de Referencia

El registro de las mediciones de pH, se realizó en cada lado de celda, diferenciando entre el polo positivo (anolito) y el negativo (catolito) en función del campo aplicado, polaridad y comparando con sus respectivas referencias.

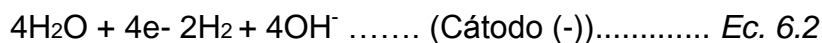
La movilidad de las partículas monodispersadas puede ser afectada debido a diferentes características propias del proceso de experimentación y/o al cambio de la naturaleza electroquímica de la solución. Los contaminantes micro o nanométricos difíciles de detectar mediante técnicas analíticas se pueden reflejar mediante las mediciones de pH, es importante recalcar la importancia del valor de pH en la suspensión debido a que esta reportado que la alteración del pH puede dar como resultado la gelificación de la suspensión o

la solubilidad de la nanosilice en el medio dispersante⁶¹. El pH de las suspensiones antes del inicio del ensayo es de 8 de acuerdo a la información del fabricante para ambas suspensiones y este fue medido antes de realizar los ensayos de acuerdo a la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Características electroquímicas de las suspensiones y el agua desionizada de prueba.

Líquido	pH	Conductividad (μS/cm)
Agua desionizada	7.69	18.5
Suspensión al 30%	8.07	764.0
Suspensión al 40%	7.38	1078.0

En las figuras reportadas el primer valor de pH corresponde al medido en las primeras tres horas de haber iniciado el ensayo. En el desarrollo de este trabajo se llevó el control de las mediciones de pH, sin embargo; no se controlaron los cambios en las soluciones asociados principalmente al desprendimiento de iones H⁺ y OH⁻ debido a la acción de los electrodos de trabajo.



En el anolito de las muestras de referencia se observa una variación del pH mostrando una tendencia de incremento (iniciando en valores entre 7 y 8, y

terminando con valores de 10 y 11) durante la aplicación de los campos eléctricos.

El comportamiento de una celda común es que en el anolito se presenta una disminución del pH, obteniéndose una acidificación del medio, sin embargo; en nuestro sistema el valor del pH en el anolito no disminuyó, la razón probable es debido a la migración de iones OH^- contenidos en la solución de los poros en el mortero hacia el ánodo por acción del campo eléctrico, así como también a la migración de especies aniónicas de sílice ($\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, H_3SiO_4^-), lo cual provoca que el anolito presente un aumento de sus valores de pH volviéndolo alcalino en lugar de volverse ácido.

Para el polo negativo la tendencia fue similar al polo positivo, sin embargo no se debe olvidar que se ha realizado un movimiento de iones (calcio, sodio, aluminio, magnesio, etc.) hacia el catolito de la celda, además de que en este lado de la celda existe la producción de iones oxhidrilos (OH^-), que dan como resultado el comportamiento obtenido. El efecto de la migración de iones alcalinos (calcio, sodio, magnesio, aluminio, entre otros) hacia el cátodo debería ser una característica observable cuando se analice la microestructura de estas muestras.

Por lo tanto, tenemos que bajo la acción del campo eléctrico en una celda con agua desionizada hacia ambos lados (anolito/catolito) los valores de pH mantienen una tendencia de aumento, lo cual implica en el ánodo la agregación de iones OH^- de la solución de poros y la migración de especies aniónicas de sílice como ($\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, H_3SiO_4^-); de otra forma en el catolito, tenemos un incremento de los valores de pH debido a la agregación de iones alcalinos (aluminio, calcio, magnesio, azufre, etc.) a la solución.

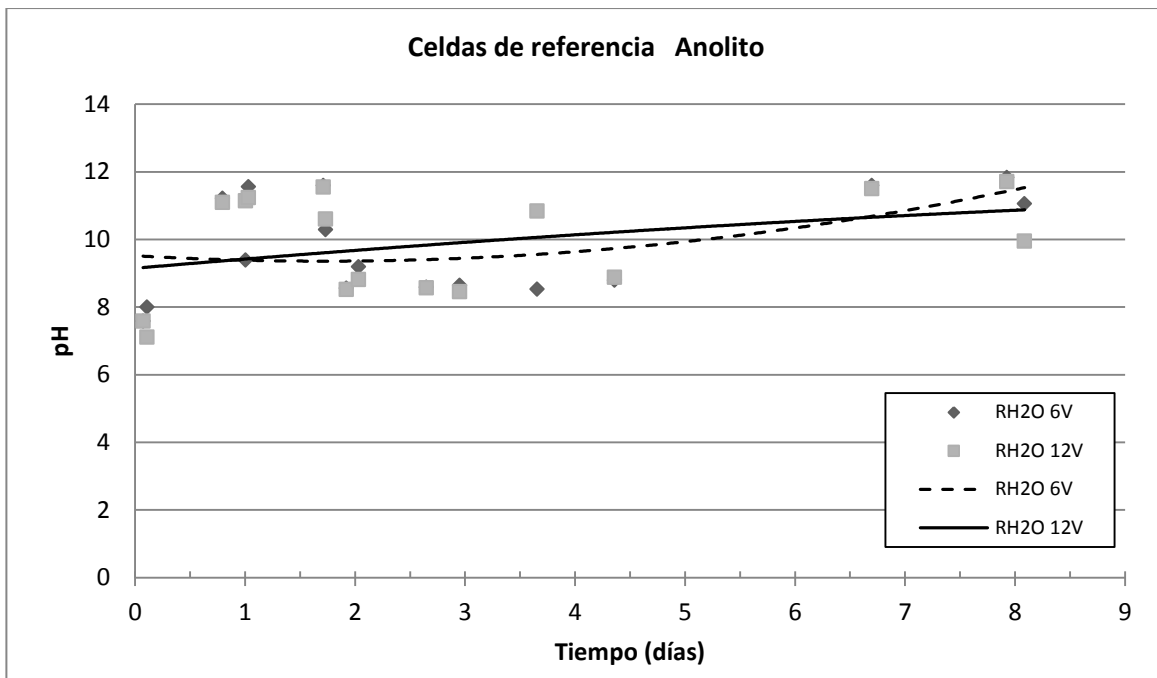


Figura 5.23 Tendencia del pH en el agua desionizada del polo positivo de las celdas de referencia.

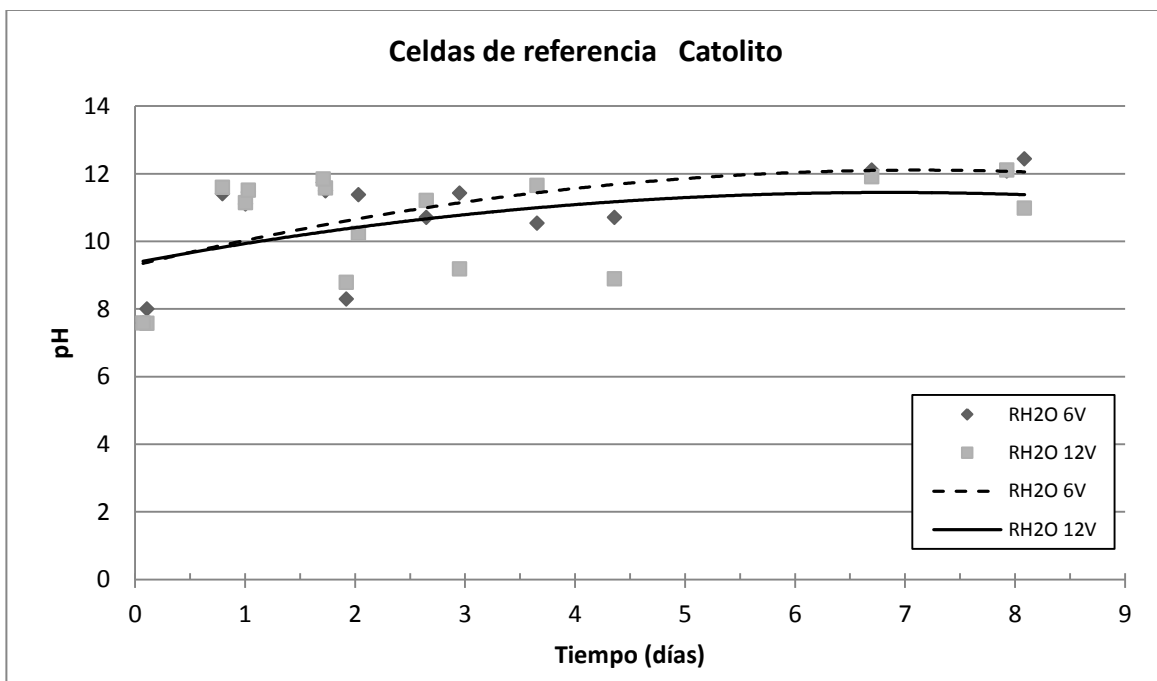


Figura 5.24 Tendencia del pH en al agua del polo negativo de las celdas de referencia.

5.2.3.2 Muestras en conexión normal

Muestras en conexión normal al 30% de concentración

En el anolito de las muestras en conexión normal al 30% de concentración y con tamaño de partícula de 7nm, se ha observado una tendencia a decrecer el pH conforme pasa el tiempo, en el caso de la muestra ensayada a 6V el decremento en la gráfica es mínimo y se muestra en las primeras 36 a 48 horas y manteniendo durante el tiempo de aplicación de los campos eléctricos, el pH por encima de 7.8, para finalmente terminar con un valor similar al inicial, véase figura 5.25; en otro sentido, la muestra ensayada a 12V muestra la pendiente decreciente de la gráfica mayormente pronunciada entre las 36 a 108 horas a partir del inicio del tratamiento y obteniendo un pH mínimo de 5, véase figura 5.25. En el caso del catolito en ambas celdas, se tiene un comportamiento similar, incrementando el pH conforme pasa el tiempo de aplicación del tratamiento, cuestión que es esperada debido a la producción de iones OH^- , véase figura. 5.26.

Se sabe que la concentración de iones de hidrógeno no es el único factor que influye los valores de pH de una solución. La concentración de otras sustancias químicas en la solución, o la fuerza iónica de la solución, es también una influencia importante en la medición de pH. El término "fuerza iónica" se utiliza para describir la cantidad de especies iónicas en una solución, así como la magnitud de la carga de las especies ⁶³. De esto podemos decir que la variación en el pH tanto en el anolito como en catolito de las celdas con aplicación de solución de nanopartículas, presentó variaciones las cuales suponen el movimiento de iones a través de la muestra de mortero, llevándolos a un sitio diferente de su lugar inicial.

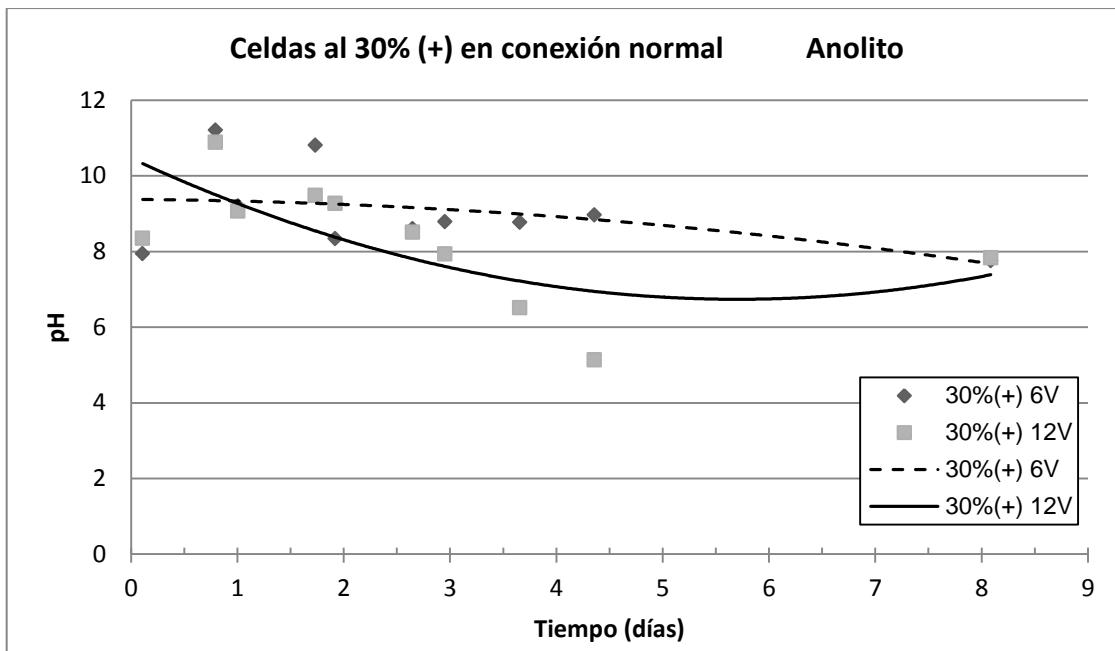


Figura 5.25 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 30% de concentración en conexión normal.

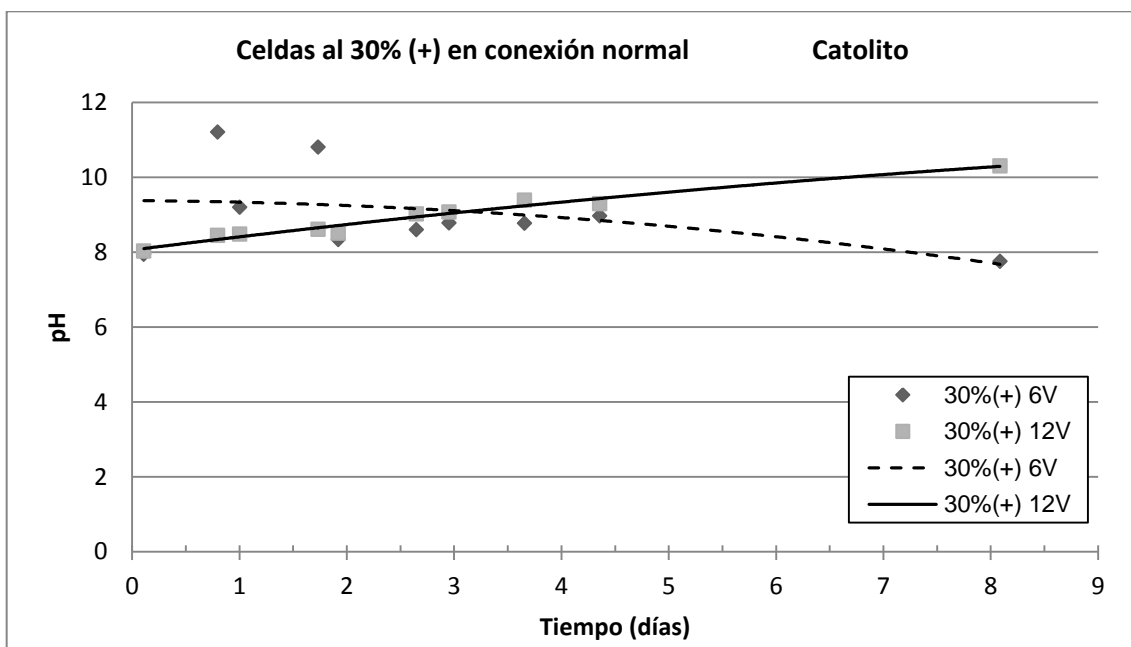


Figura 5.26 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 30% de concentración en conexión normal.

Muestras en conexión normal al 40% de concentración

Las celdas al 40% de concentración han mostrado un comportamiento típico tanto en el anolito como en el catolito, véanse figuras 5.27 y 5.28. De manera similar a lo sucedido en las muestras al 30%, podemos suponer un movimiento eficaz de iones, lo cual es el objeto de estudio de esta investigación. En cuanto a las soluciones anolíticas y catolíticas, no se observó ningún comportamiento diferente a lo esperado en estas, es decir; no se observaron cambios en la suspensión de nanosílice coloidal ni en el agua desionizada en la celda.

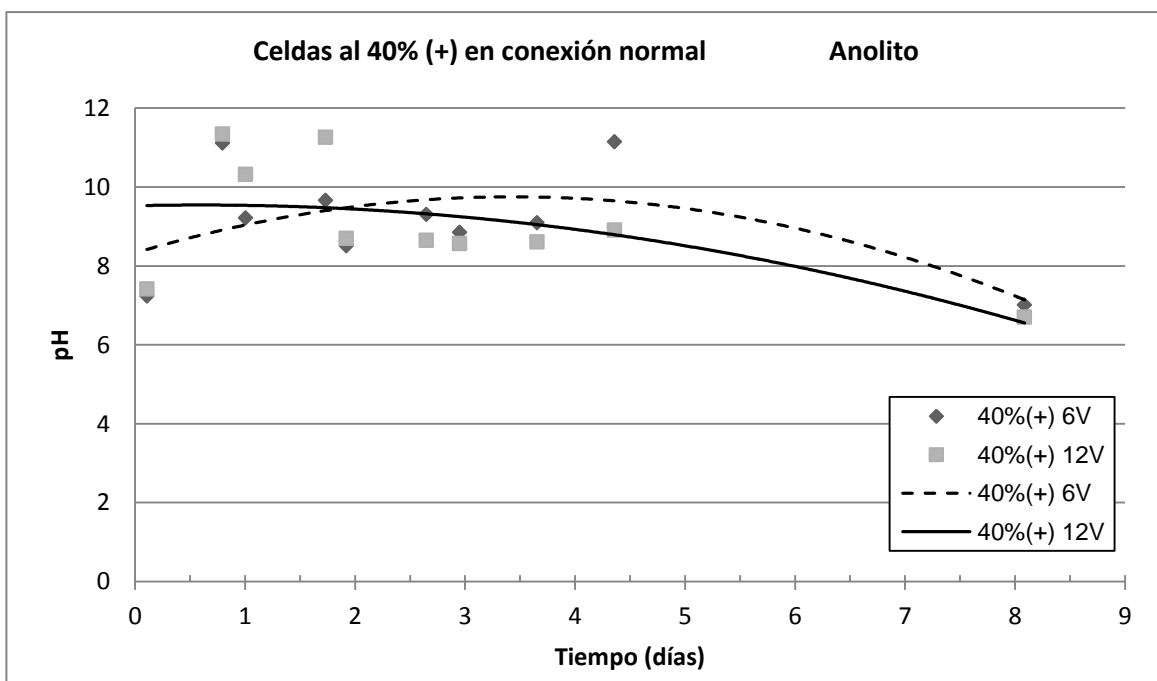


Figura 5.27 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión normal.

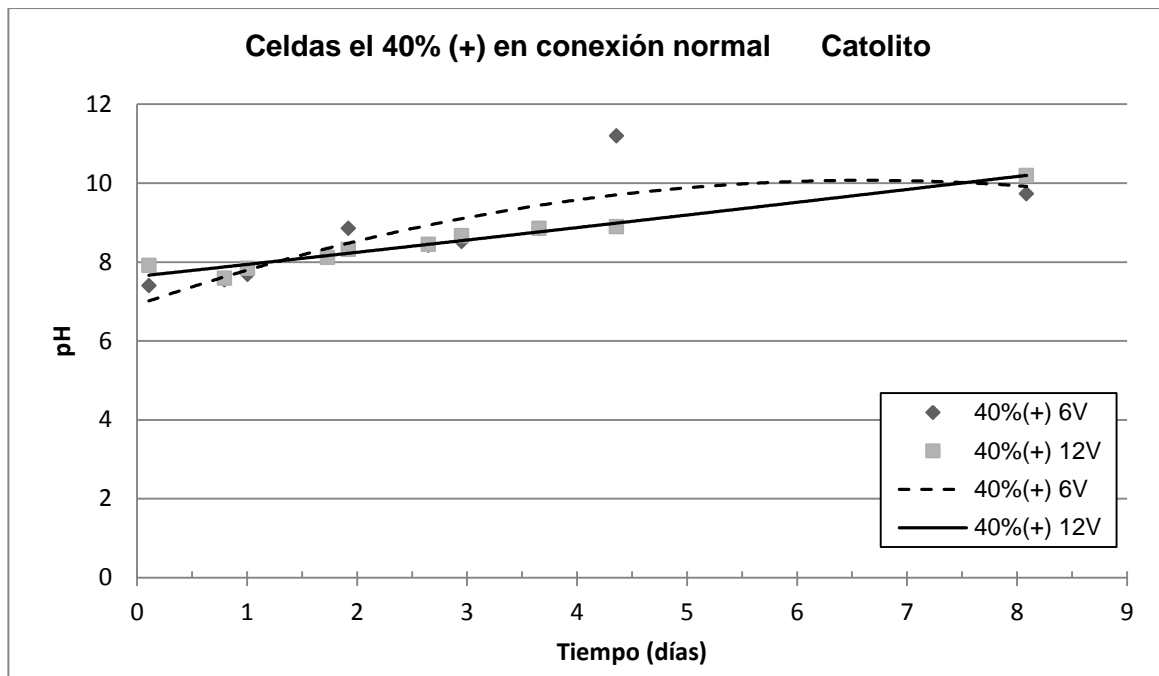


Figura 5.28 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión normal.

5.2.3.3 Muestras en conexión invertida

Muestras en conexión invertida al 40% de concentración

En cuanto a las celdas conectadas de manera invertida se tuvieron varias observaciones, hablaremos primeramente de la celda a 12V. En las celdas conectadas a 12V de manera invertida se observó lo siguiente:

El anolito presentó un comportamiento similar a la muestra de referencia con agua, ambas presenta la misma tendencia de aumento en los valores de pH; en cuanto al catolito de igual manera presento un comportamiento similar a la muestra de referencia, no se observaron grandes variaciones en los valores de pH ya que el rango medido varió de 10 a 12. Además que las observaciones mostradas en el apartado 5.2 se presentaron en esta celda, la formación del gel



se dio a partir del día 3, a partir del cual la solución comenzó a mostrar tendencias a alcalinizarse. Este comportamiento característico promovió el proceso de gelificación de la suspensión coloidal y esta se adhirió a la superficie del concreto impidiendo la migración de especies iónicas hacia el ánodo por lo contrario, en el lado del cátodo el incremento puede ser debido a la producción de iones OH^- y/o migración de iones hacia el lado negativo.

Por otra parte, en la celda a 6V el catolito como el anolito presentaron características típicas en cuanto a la variación de su pH, sin embargo; se presentó un leve gelificación y en comparación con la celda de 12V, la alcalinización se presentó de manera más pronunciada. Las variaciones registradas de estas celdas conectadas de manera invertida, muestran que también se tenían concentraciones de otras sustancias químicas en la solución, o la fuerza iónica de la solución, esto debido a la aplicación del campo eléctrico, y variando proporcionalmente con su magnitud.

Cabe señalar que dichas gelificaciones producidas, fuera de los morteros no es conveniente desde el punto que el objetivo de esta investigación es reducir la porosidad del medio.

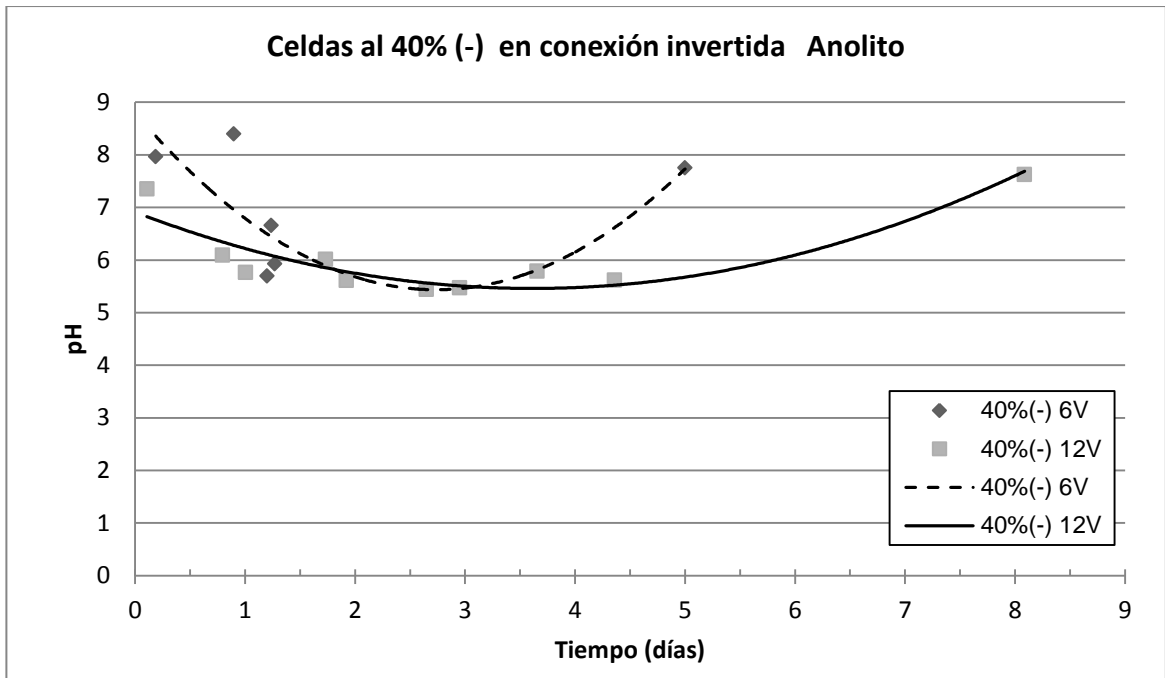


Figura 5.29 Tendencia del pH medido en anolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión invertida.

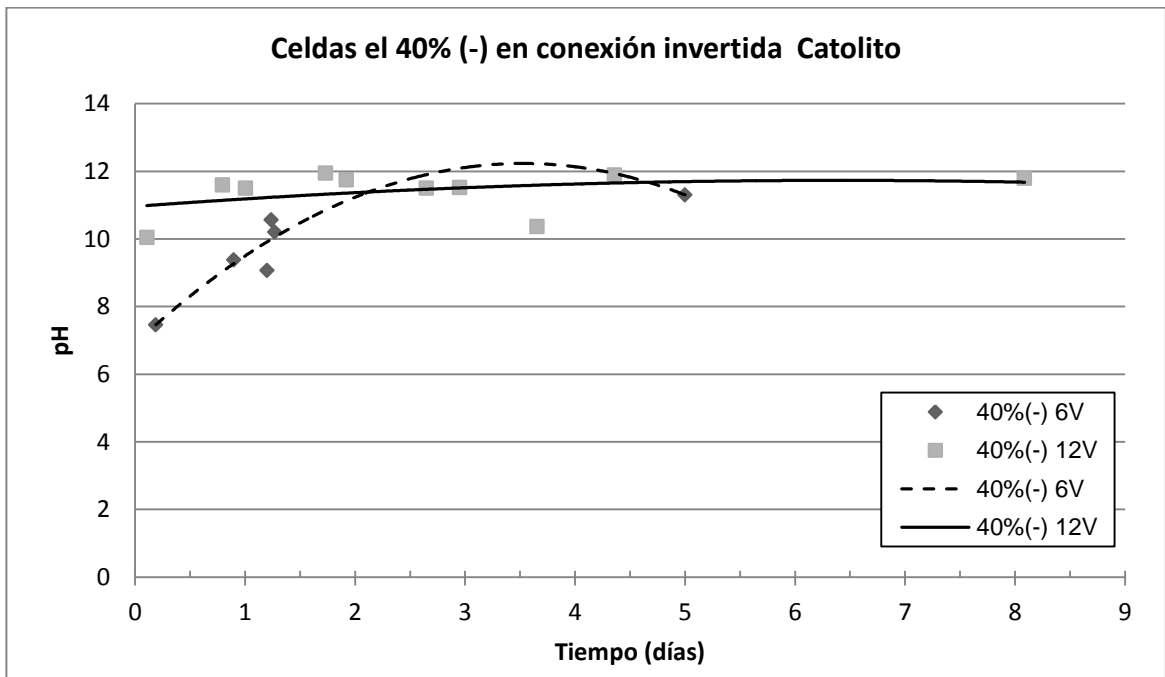


Figura 5.30 Tendencia del pH medido en catolito de las celdas tratadas al 40% de concentración en conexión invertida.

5.2.4 Comportamiento de la conductividad en la solución

Al igual que las mediciones de pH, la conductividad fue medida en una muestra de solución extraída de cada polo de la celda (anolito/ catolito), por lo cual se cuenta también con mediciones en el polo positivo y otras más en el negativo, las gráficas obtenidas se muestran a continuación, exponiendo los datos de medición en el anexo A-3.

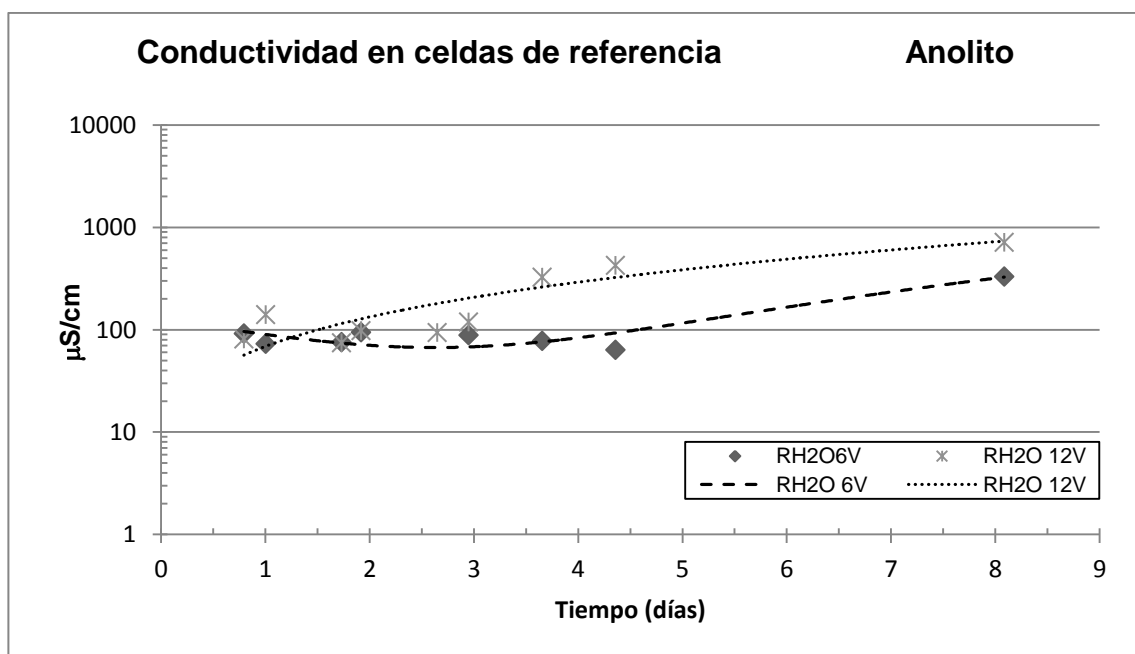


Figura 5.31 Variación de la conductividad en el anolito de las celdas de referencia

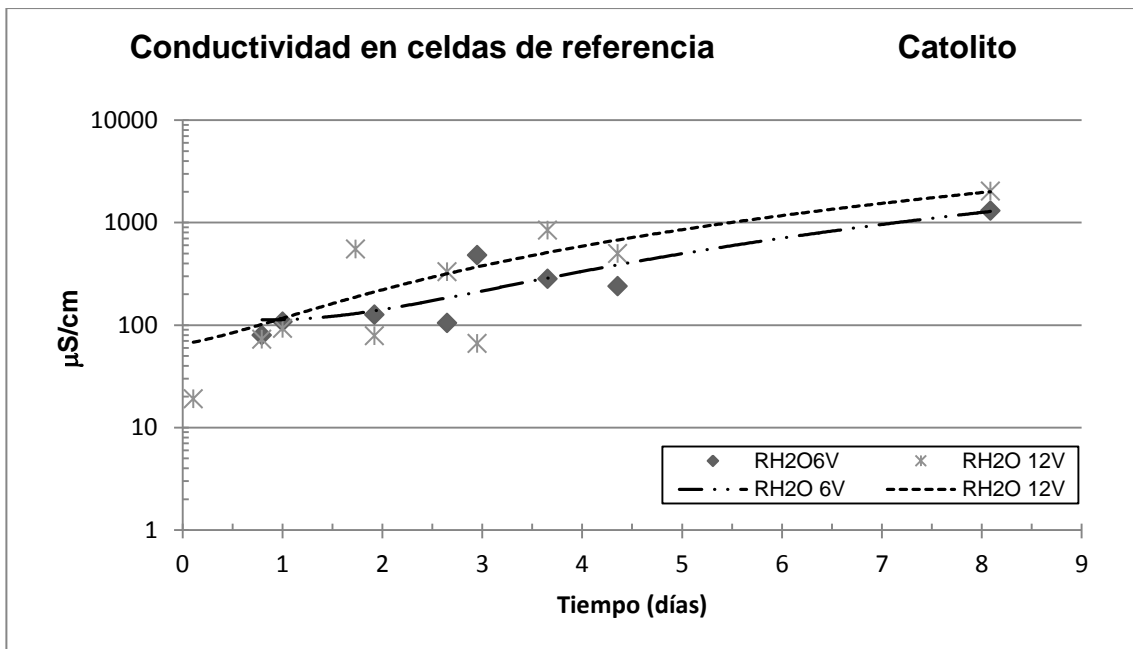


Figura 5.32 Variación de la conductividad en el catolito de las celdas de referencia

El comportamiento de la conductividad en las muestras de referencia se mantuvo una tendencia de aumento constante en ambas soluciones de la celda lo cual indica una migración de especies iónicas que se pueden lixiviar hacia ambos lados desde el interior del mortero véanse figuras 5.31 y 5.32.

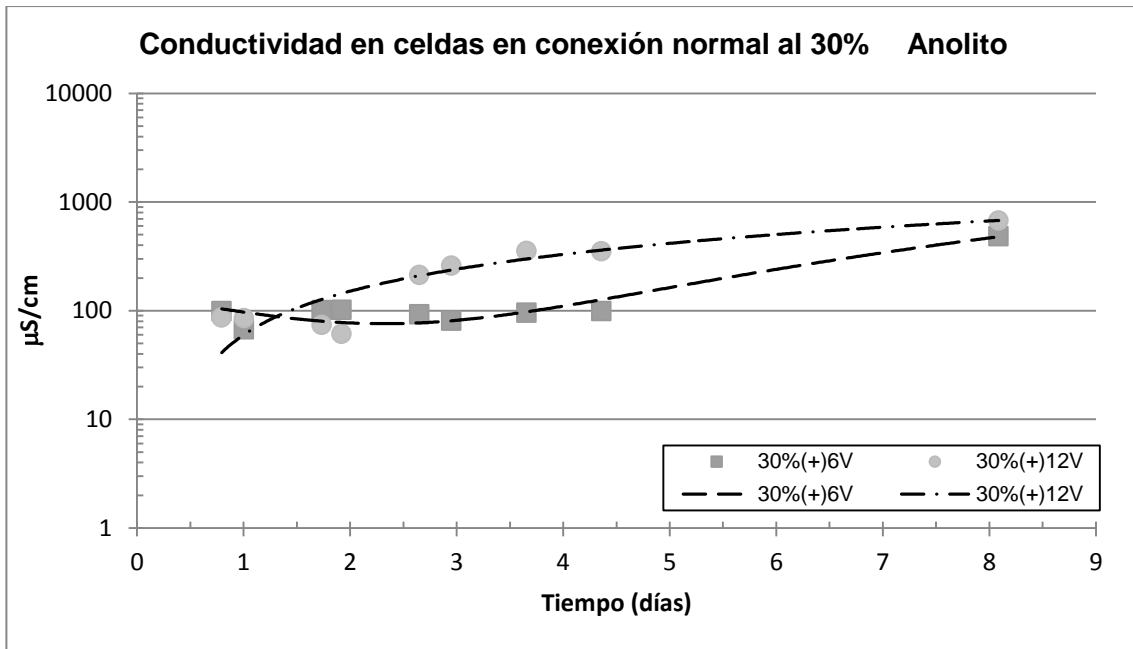


Figura 5.33 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 30%.

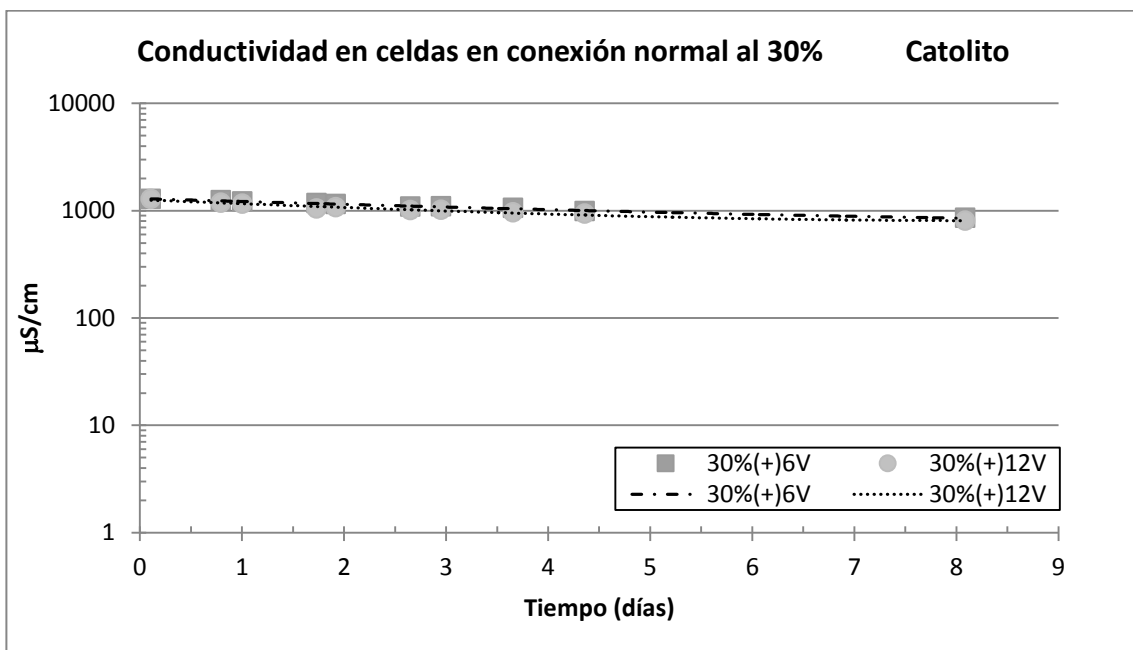


Figura 5.34 Variación de la conductividad en el catolito en celdas en conexión normal al 30%.

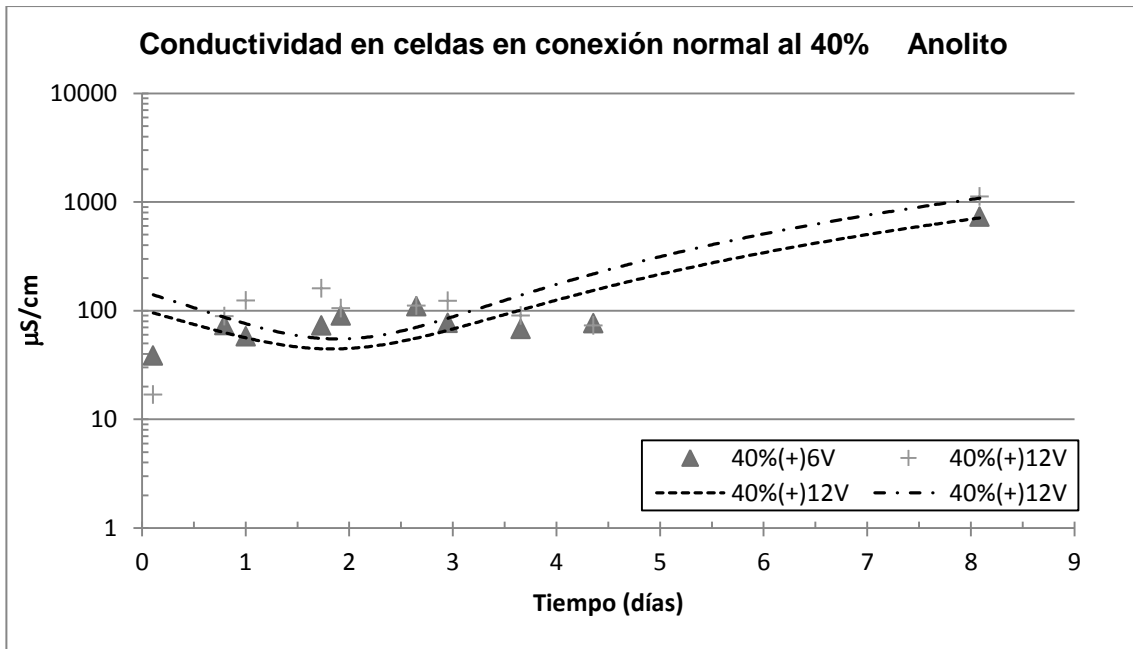


Figura 5.35 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 40%.

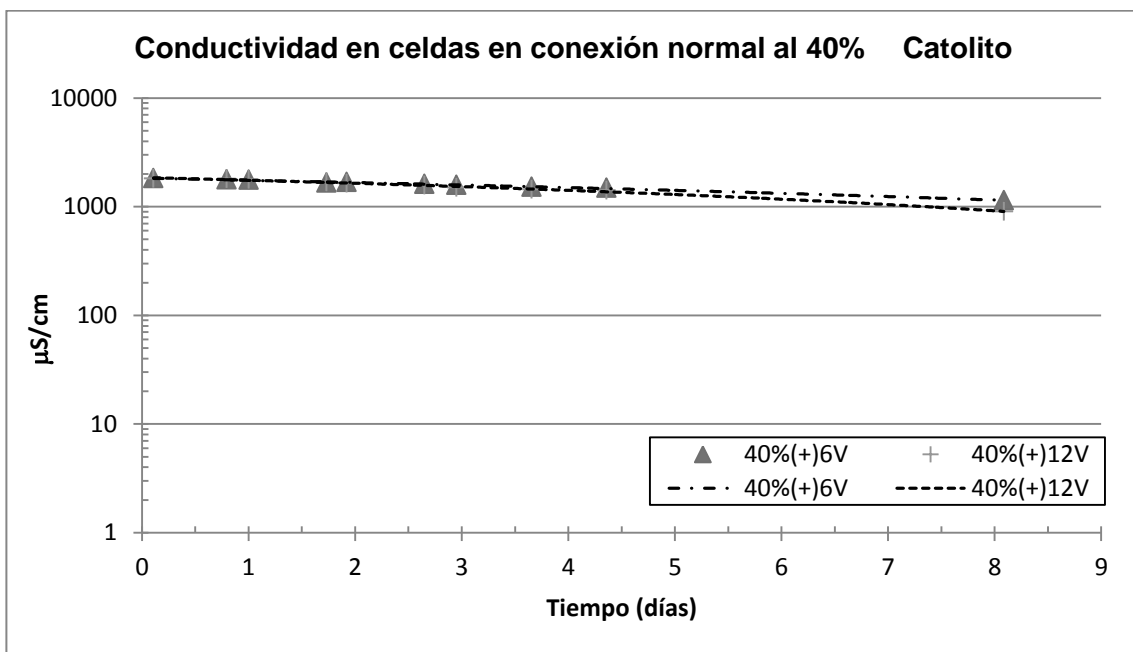


Figura 5.36 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión normal al 40%.

La conductividad en el anolito de las celdas con conexión normal presentó un comportamiento con tendencia a aumentar partiendo de valores entre 17 a 37 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y terminando en valores superiores entre 577 a 1118 $\mu\text{S}/\text{cm}$, observándose una pendiente con tendencia positiva conforme avanza la prueba para ambos casos de voltaje aplicado y en ambas concentraciones (30% y 40%), lo que indica que las características de concentración de la suspensión han sido afectadas ligeramente durante el desarrollo de las pruebas, se puede decir que la tendencia presentada en el anolito es atribuida a la migración de iones hacia este lado de la celda, es decir; conforme el periodo de prueba aumenta, el anolito adquiere más iones que lo hacen más conductor. De manera contraria, sucede en el catolito, el cual conforme avanza el tiempo, va perdiendo conductividad, esto determinado por los valores de conductividad medidos en las soluciones durante el periodo de prueba.

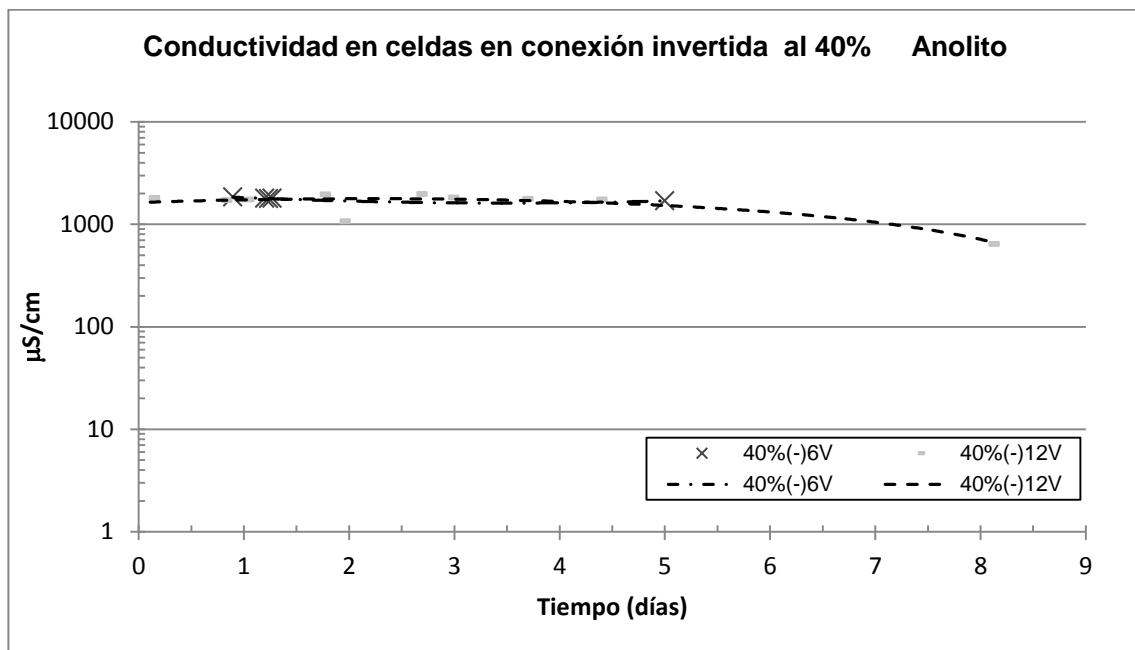


Figura 5.37 Variación de la conductividad en el anolito en celdas en conexión invertida al 40%.

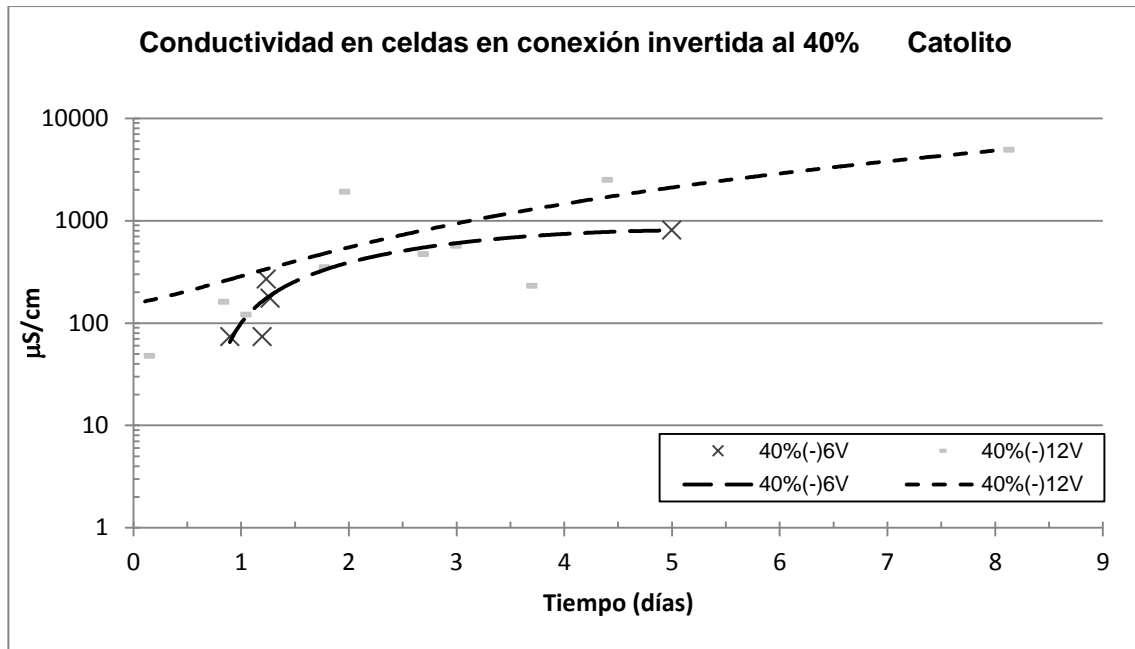


Figura 5.38 Variación de la conductividad en el catolito en celdas en conexión invertida al 40%.

En el caso de la conexión invertida, la conductividad del anolito fue similar al comportamiento de las suspensiones del catolito en conexión normal, lo cual quiere decir que hubo una tendencia a disminuir sus valores de conductividad; de otra manera, el catolito de las celdas en conexión invertida presenta una tendencia de aumento (similar al anolito de las celdas en conexión normal). En este caso, se podría aseverar que el aumento de la conductividad en el catolito puede ser debido a la lixiviación de iones del mortero.

5.3 Resultados en el mortero

5.3.1 Efecto sobre la resistividad eléctrica de los morteros

Los valores de resistividad en los morteros fueron calculados a partir de los valores de resistencia eléctrica (caída óhmica) tomados antes y después de la aplicación del campo eléctrico a los morteros de ensayo y con la aplicación de la ecuación 5.2.

$$\rho = \Omega \left(\frac{A}{e} \right) \dots \dots \dots \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

ρ = Resistividad del mortero (Ωm)

Ω = Resistencia medida por el equipo (Ω)

A = Área de medición de la muestra (m^2)

e = Espesor de la muestra (m)

Las muestras de referencia mostraron un incremento de la resistencia al paso de la corriente eléctrica y por lo tanto, su resistividad aumentó, dicho incremento en las muestras con un voltaje aplicado de 6V fue de 15.67% y en las muestras tratadas con un campo de 12V el incremento fue de 18.78%.

El grupo de muestras tratadas con 6V presentaron ligeros incrementos en la resistividad eléctrica de cada muestra, ver tabla 5.3.



Tabla 5.3 *Porcentaje de incremento de la resistividad eléctrica en muestras tratadas con 6V.*

Nombre	% incremento
R H ₂ O,6V	15.68
30%,(+),6V	30.66
40%,(+),6V	27.87
40%,(-),6V	5.11

Por otra parte, el grupo de muestras tratadas con 12V presentaron notorios incrementos en la resistividad eléctrica de cada muestra, ver tabla 5.4, sin embargo, en este grupo de muestras, se obtuvo que la muestra con conexión invertida, presentó una reducción de las medidas de resistividad después de la aplicación del tratamiento.

Tabla 5.4 *Porcentaje de incremento de la resistividad en muestras tratadas con 12V.*

Nombre	% incremento
RH ₂ O, 12V	18.78
30%,(+),12V	48.23
30%,(+),12V	51.67
40%,(+),12V	49.24
40%,(-),12V	-35.29

En general, el objetivo de la aplicación del tratamiento con suspensión de nanopartículas es producir un incremento de la resistividad eléctrica del mortero, lo cual podría estar asociado con la penetración de la partícula y la obturación de poros ya sea por reacción con el medio o entre la suspensión de nanopartículas. De igual manera, los cambios en la resistividad podrían

suceder por el sellado de poros superficiales sin haberse logrado la penetración de la nanopartícula al interior del mortero.

El aumento de la resistividad está asociado a la microestructura y a la red de poros contenidos en las muestras por lo que la migración de especies iónicas y/o nanopartículas podría afectar sensiblemente la porosidad y/o microestructura de los especímenes. A continuación se muestran las gráficas del aumento/ disminución de la resistividad eléctrica de los morteros de prueba antes y después de la aplicación del tratamiento con nanopartículas coloidales.

5.3.1.1 Mediciones en secciones de mortero tratadas a 6V.

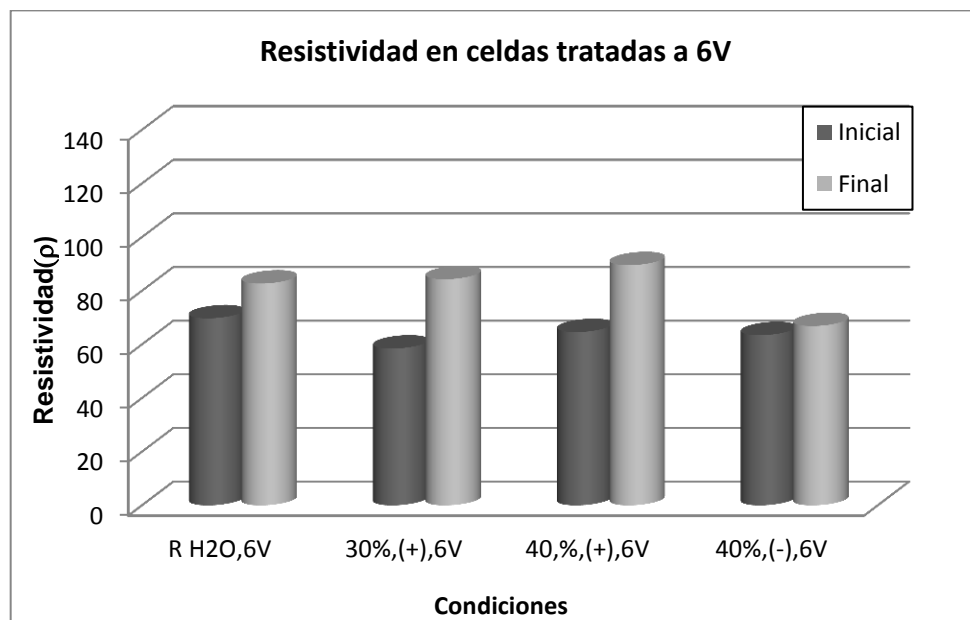


Figura 5.39 Valores de resistividad de las secciones de mortero tratadas a 6V, calculo mostrado en el anexo A-4.

5.3.1.2 Mediciones en secciones de mortero tratadas a 12V.

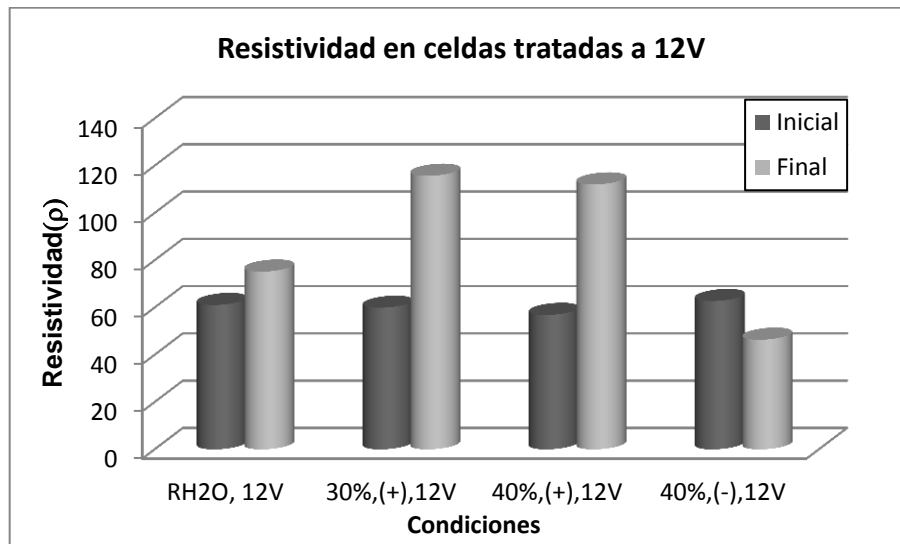


Figura 5.40 Valores de resistividad de las secciones de mortero tratadas a 12V, calculo mostrado en el anexo A-4.

5.3.2 Efecto de la electromigración en el tamaño de poro

Las mediciones de porosimetría por intrusión de mercurio (PIM) se realizaron con un equipo AutoPore IV 9500 V1.05 de la empresa Micromeritics Instrument Corporation, dichas mediciones fueron realizadas por personal técnico especializado en la realización de este tipo de pruebas en el Instituto en Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC).

En este apartado se mostrarán los resultados del diámetro promedio de poro en muestras de las secciones de mortero ensayadas, también la densidad y el porcentaje de porosidad principalmente. Los primeros resultados que se presentan a continuación, muestran el efecto de los campos eléctricos (6 y 12V respectivamente) en las muestras de referencia.

Inicialmente se sometieron a pruebas de PIM las muestras de referencia la primera sin aplicación de campo eléctrico (R0), la segunda con aplicación de campo de 6V (RH2O 6V) y la tercera con un campo eléctrico aplicado de 12V (RH2O 12V). Las muestras con aplicación de campo eléctrico analizadas fueron aquellas que en las que se utilizó solo agua desionizada con el fin de poder obtener los resultados de la aplicación del campo eléctrico sin nanopartículas migradas.

Las tablas de datos se muestran en el anexo A-5, a continuación se muestran las gráficas obtenidas:

5.3.2.1 Muestras de Referencia

Tabla 5.5 Porosidad total en muestras de referencia.

Muestra	% <0.1	%0.1 - 1	%1 - 10	%>10	% porosidad
R0	38.50	47.09	8.45	5.96	16.76
H2O 12V 28d	46.99	41.10	5.34	6.58	16.64
H2O 6V 28d	40.59	46.44	5.58	7.39	15.05

Con respecto a la muestra de referencia R0, la muestra RH2O 12V no presenta cambios significativos en la variación de la porosidad total, a diferencia de la muestra RH2O 6V, la cual muestra una disminución del 1.6% aproximadamente. Cuando se analiza la reducción de volumen de poros en diferentes intervalos para esta condición se ve que para 6V el mayor volumen de poros está en el intervalo de 0.1 a 1 μm y en el caso de las muestras sometidas a 12V el efecto fue en el intervalo de poros menores a 0.1 μm . La red de poros de ambas muestras parece haber sido modificada por la aplicación del campo eléctrico, sin embargo; las muestras a 12V presentan una reducción

mayor de porcentaje de poros en los intervalos de 0.1-1 y de 1-10 μm , los cuales según Mindess y Young²², son los diámetros de poro de principal influencia en la permeabilidad.

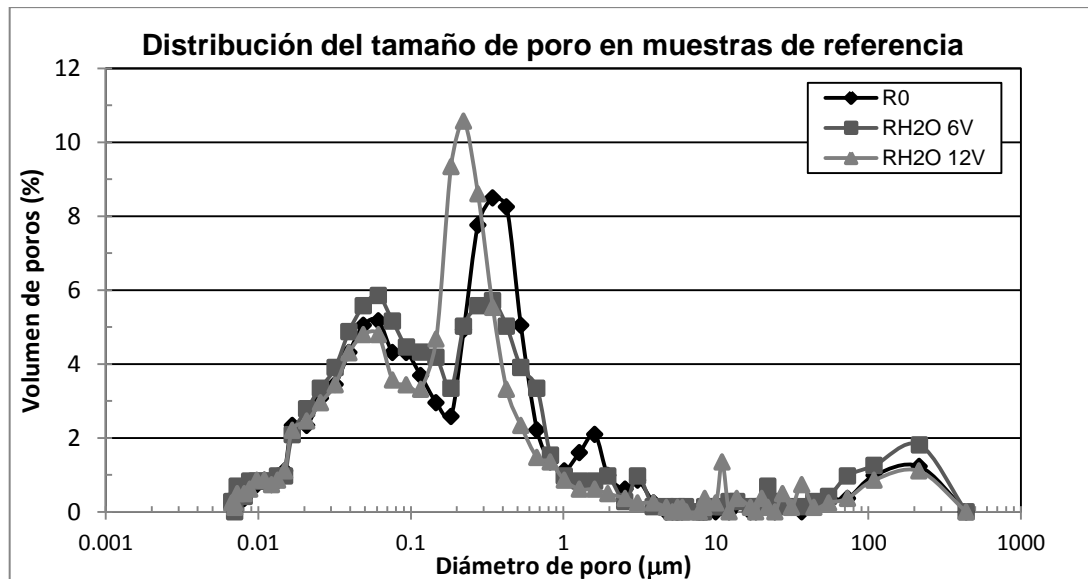


Figura 5.41 Distribución del tamaño de poro en muestras de referencia con y sin tratamiento eléctrico.

En la figura 5.41 se pueden observar las gráficas obtenidas de la PIM, en las cuales se ilustra la distribución del diámetro de poros, observándose un claro aumento la distribución de poros de 18.81% en el rango de diámetro de poros de 0.1-1 μm . El cambio en la red de poros debido a la aplicación del campo eléctrico en las muestras de referencia estará en función de la capacidad de movimiento de las especies iónicas dentro de la matriz cementante. Como se ha mencionado con anterioridad, es probable que el campo eléctrico aplicado de 12V tenga una mayor influencia en las muestras y su microestructura a diferencia del campo aplicado de 6V que presenta menores variaciones en las distintas mediciones realizadas.

En seguida se mostrarán los resultados de la PIM realizadas a muestras tratadas con 12V, los ensayos fueron realizados a 28 y 90 días después de la aplicación del tratamiento.

5.3.2.2. Resultados de las muestras tratadas con un campo eléctrico de 12V

Tabla 5.6 Comparación de la distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 30% en conexión normal.

Muestra	% <0.1	% cambio	%0.1 - 1	% cambio	%1 - 10	% cambio.	%>10	% cambio	Porosidad total
R0 28d	40.89		47.29		7.76		4.19		16.76
H2O 28d	38.62	-2.26	50.55	3.26	4.55	-3.21	6.40	2.21	16.64
30(+) 28d	47.90	7.01	33.82	-13.47	11.03	3.27	7.40	3.21	14.34
H2O 90d	37.70	-3.19	48.40	1.11	7.35	-0.41	6.95	2.76	15.88
30(+) 90d	36.99	-3.89	40.46	-6.83	14.88	7.13	8.82	4.63	14.95

En las muestras tratadas con un campo eléctrico de 12V, con el 30% de concentración se observó una disminución de aproximadamente el 2% de la porosidad total a 90 días después del tratamiento con respecto a las muestras de referencia, pero además se presentó una reducción del porcentaje de poros relativos a los tamaños entre 0.1 y 1µm, efecto que se clarifica en las pruebas realizadas a 90 días después de la aplicación del tratamiento, periodo en el cual aparece reducido también el rango de poros menores a 0.1 µm, además de los poros entre 0.1 y 1µm de diámetro, véase tabla 5.6. Debido a los resultados anteriores, podemos decir que a pesar de que la reducción de la porosidad total ha sido muy pequeña, se ha conseguido una reestructuración de la red de poros en los cuales se ven disminuidos los poros de tamaño menor a 1 µm en intervalos de 4 y 7 % respectivamente, como se puede observar en la figura 5.42.

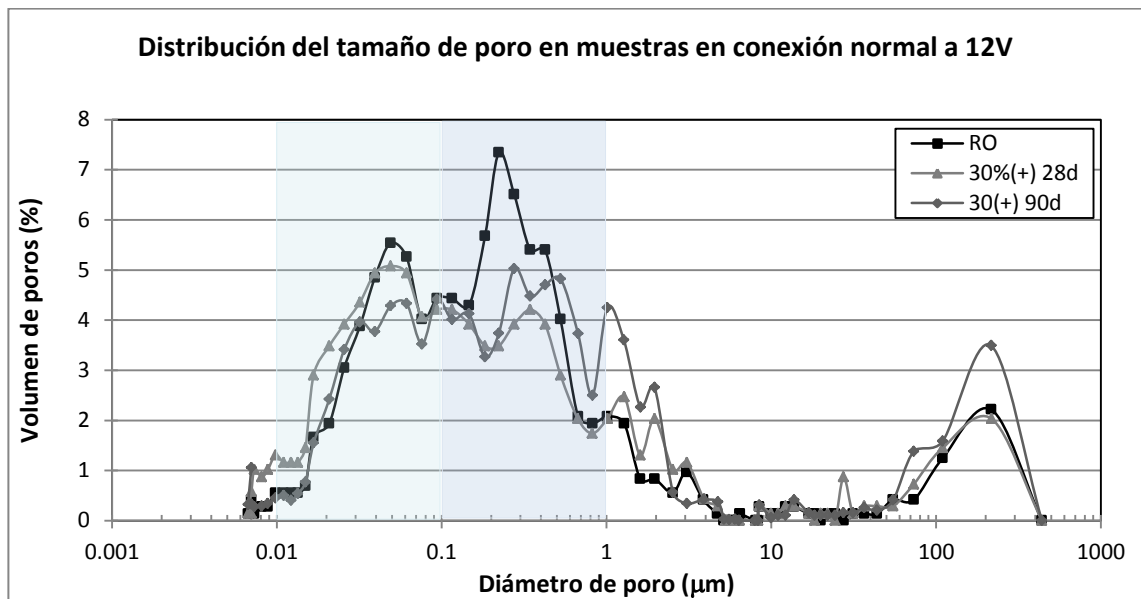


Figura 5.42 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 30% en conexión normal a 28 y 90 días.

Tabla 5.7 Comparación de la distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 40% en conexión normal.

Muestra	% <0.1	% cambio	% 0.1 - 1	% cambio	% 1 - 10	% cambio	% >10	% cambio	Porosidad total
R0 28d	40.89		47.29		7.76		4.19		16.76
H2O 28d	38.62	-2.26	50.55	3.26	4.55	-3.21	6.40	2.21	16.64
40(+) 28d	38.02	-2.86	43.59	-3.70	12.81	5.05	5.71	1.52	15.06
H2O 90d	37.70	-3.19	48.40	1.11	7.35	-0.41	6.95	2.76	15.88
40(+) 90d	37.85	-3.04	35.22	-12.07	18.92	11.16	8.01	3.82	14.24

Las muestras presentadas en la tabla 5.7, han presentado una disminución del porcentaje total de porosidad alrededor de un 2.5% con respecto a las muestras de referencia sin aplicación de campo eléctrico, con respecto a las muestras de referencia RH2O, se mantiene un 1.5% de

diferencia en la porosidad total, esto no implica una diferencia significativa en la porosidad de la matriz cementantes, sin embargo; los mismos intervalos de diámetro de poro han variado al igual que en las muestras tratadas al 30%, sin embargo; estas variaciones son mayores, modificando en mayoría al intervalo de 0.1-1 μ m, con una disminución de aproximadamente el 12% de este rango de poros, 90 días después de la aplicación del tratamiento, gráficamente este comportamiento se muestra en la figura 5.43.

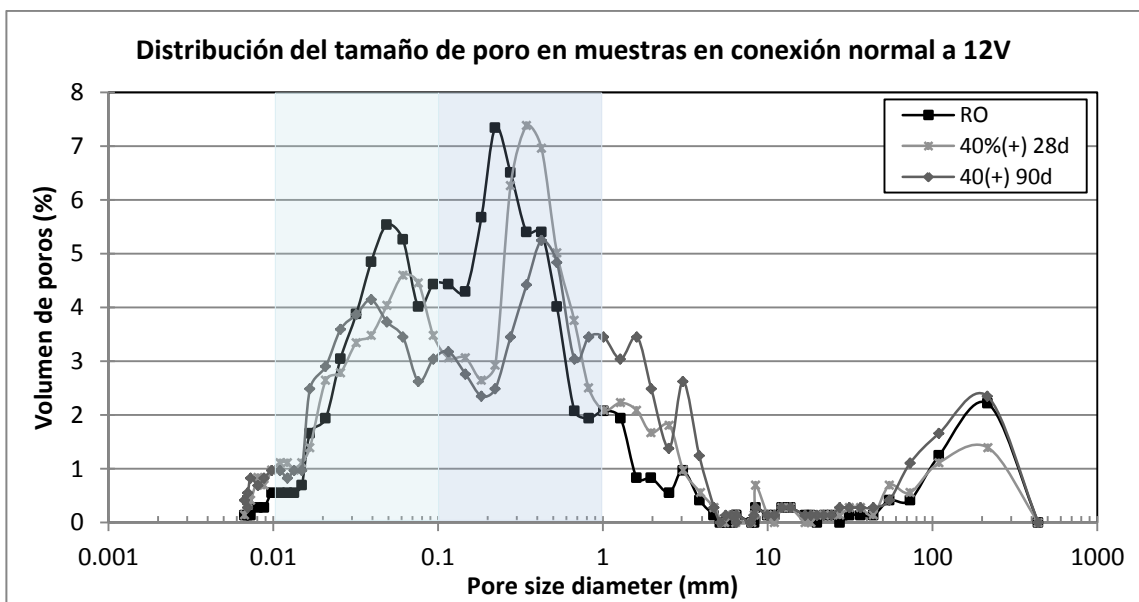


Figura 5.43 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 40% en conexión normal a 28 y 90 días.

Tabla 5.8 Comparación de la distribución del tamaño de poro y porosidad total en muestras tratadas a 12V con concentración al 30% en conexión invertida.

Muestra	% <0.1	% cambio.	% 0.1 - 1	% cambio	% 1 - 10	% cambio	% >10	% cambio	Porosidad total
R0 28d	40.89		47.29		7.76		4.19		16.76
H2O 28d	38.62	-2.26	50.55	3.26	4.55	-3.21	6.40	2.21	16.64
30(-) 28d	48.37	7.49	41.27	-6.02	5.03	-2.73	5.77	1.58	14.12
H2O 90d	37.70	-3.19	48.40	1.11	7.35	-0.41	6.95	2.76	15.88
30(-) 90d	41.26	0.37	44.54	-2.75	8.82	1.06	5.38	1.19	13.74

El resultado de las muestras tratadas a 12V con 30% de concentración pero en conexión invertida, presentaron también una reducción del porcentaje de porosidad total en un 3% aproximadamente, sin embargo al igual que las muestras en conexión normal la reducción en la porosidad total no es significativa. Por otro lado, los intervalos correspondientes a los diámetros de poros no fueron modificados significativamente, la figura 5.44 muestra el comportamiento de la distribución del tamaño de poros en muestras conectadas de manera invertida.

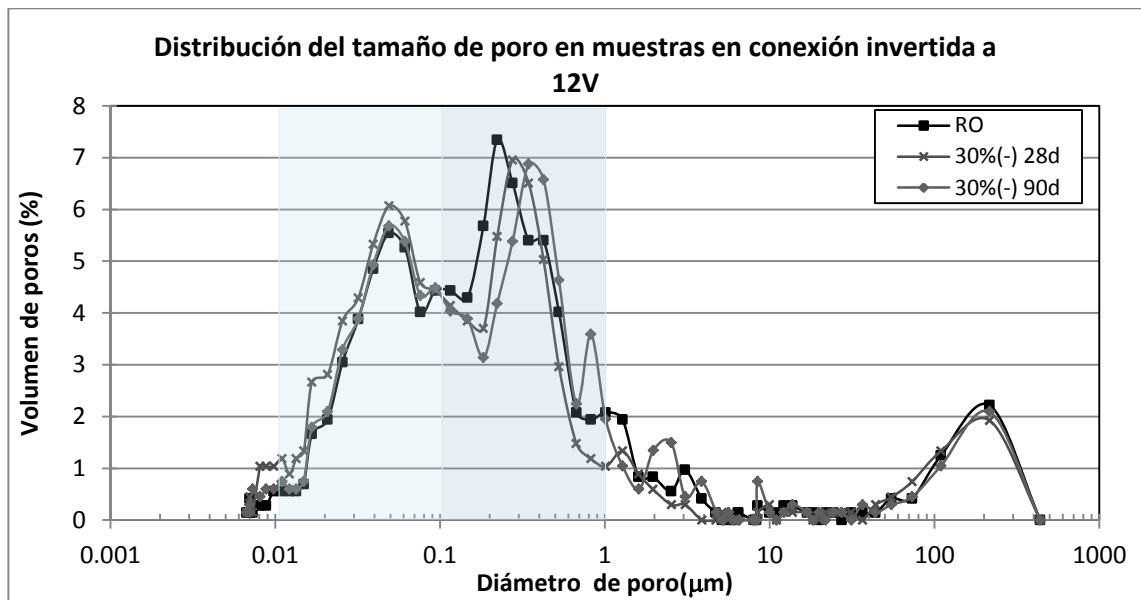


Figura 5.44 Comparación de la distribución del tamaño de poro de la muestra de referencia R0 con la muestra tratada con 12V al 30% en conexión invertida a 28 y 90 días.

Se puede decir que las muestras en estudio, presentan una modificación mínima de la porosidad total con respecto a la muestras de referencia, sin embargo; la muestra ensayada a 12V en conexión normal y concentración al 40% ha presentado una mayor reducción de su porosidad en los intervalos menores a 1μm, por lo que podemos decir que aun cuando el tratamiento aplicado no ha sido efectivo para reducir el porcentaje de porosidad total, si ha contribuido a modificar la estructura y distribución de la red de poros, disminuyendo una parte importante que influye en la permeabilidad como lo son



los poros de 0.1 a 1 μm , las muestras ensayadas a 12V con 30 y 40% de concentración, presentan una reducción de porosidad que corresponde a los poros capilares de menor tamaño de acuerdo a la clasificación dada por Mindess y Young²², estas observaciones tendrán que reflejarse en el análisis de la microestructura de las muestras ensayadas.

5.3.3 Observaciones bajo el microscopio electrónico de barrido

El tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de las fases presentes en un sólido constituye su microestructura. Los elementos brutos de la microestructura de un material fácilmente se pueden ver en una sección transversal de la materia, mientras que los elementos más esenciales habitualmente se resuelven con la ayuda de un microscopio. A continuación, se muestran las imágenes obtenidas del microscopio electrónico de barrido, las muestras analizadas por este medio fueron las siguientes:

R0: Muestra sin aplicación de campos eléctricos

R H₂O 12V: Muestra con un campo eléctrico de 12V en un medio de agua desionizada.

30%, (+), 12V: Muestra con un campo eléctrico de 12V, con migración de nanopartículas conectada hacia el polo positivo y concentración del 30% de nanopartículas, se realizaron observaciones a 0,7, 28 y 56 días después de la aplicación de los campos eléctricos.

40%, (+), 12V: Muestra con un campo eléctrico de 12V, con migración de nanopartículas conectada hacia el polo positivo, y concentración del 40% de nanopartículas, se realizaron observaciones a 0,7, 28 y 56 días después de la aplicación de los campos eléctricos.

40%, (-), 12V: Muestra con un campo eléctrico de 12V, con migración de nanopartículas conectada hacia el polo negativo, y concentración del 40% de nanopartículas, se realizaron observaciones a 0,7, 28 y 56 días después de la aplicación de los campos eléctricos.

5.3.3.1 Muestras de Referencia sin tratamiento (R0)

Se llevó al microscopio electrónico de barrido una muestra de 2.5 cm² de superficie aproximadamente y tomada mediante fractura, en ésta muestra de referencia (R0) se observa que presenta una microestructura típica para un mortero de calidad estándar, sin ninguna característica, tal como microagrietamientos de retracción de la pasta que puedan afectar el proceso de migración véase figura 5.45.

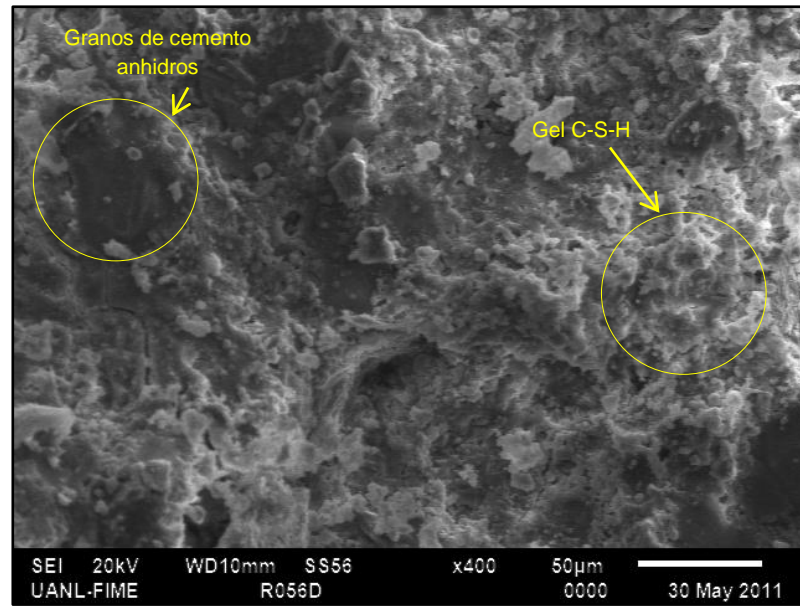


Figura 5.45 Imagen obtenida del SEM de una muestra R0, a 40 magnificaciones.

En la figura 5.46, podemos observar una comparación del modelo de la hidratación de la pasta de cemento portland y una imagen obtenida de la muestra R0. En esta imagen podemos ver que se cuenta con los elementos típicos de un mortero bien hidratado, de otra manera en la figura 5.47 podemos observar que los resultados del análisis semicuantitativo confirman su constitución.

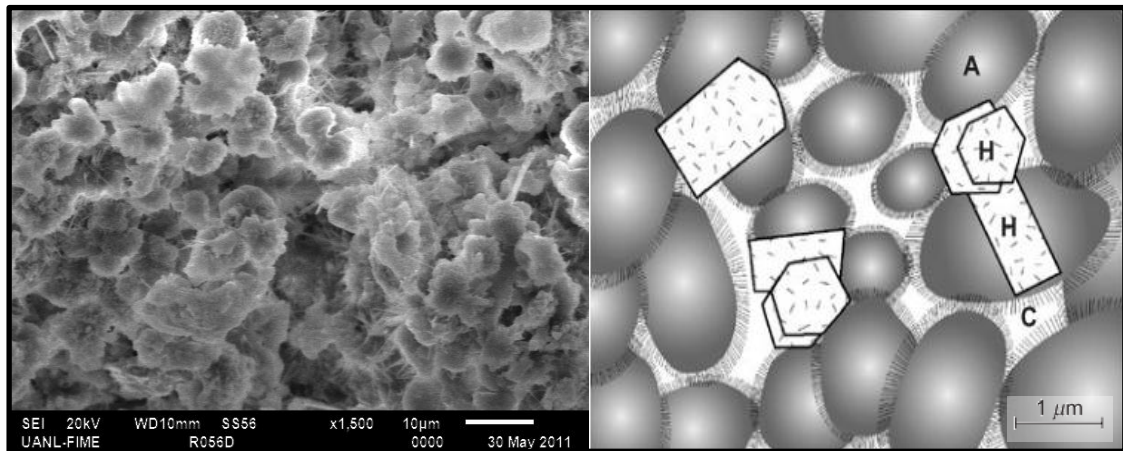


Figura 5.46 Comparación de una imagen del muestra R0 contra un modelo de una pasta de cemento portland hidratada. "A" representa a las partículas CSH (dimensiones de 1-100nm). "H" representa a los productos hexagonales cristalinos como el hidróxido de calcio y "C" representa a los poros capilares que existe en los espacios originalmente ocupados por el agua.

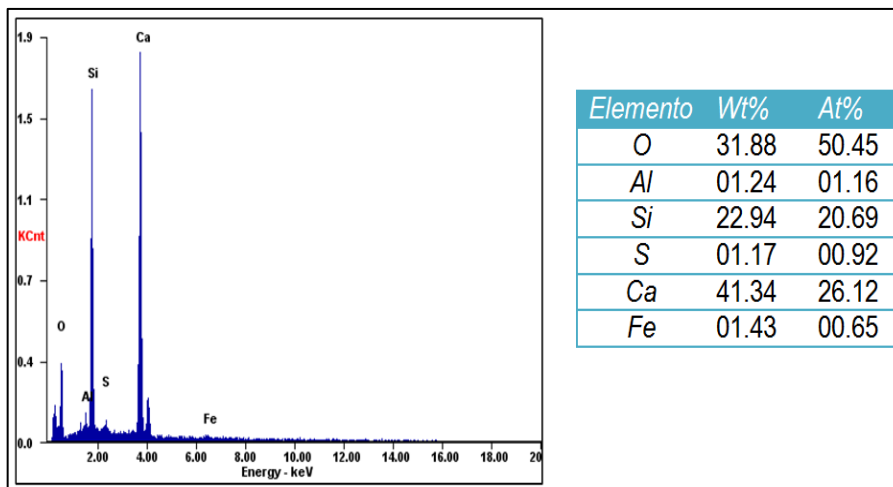


Figura 5.47 Análisis semicuantitativo de la muestra R0

De otro modo en la figura 5.48 tenemos la distribución de silicio y calcio en una sección de la muestra de referencia R0, en la cual podemos ver que, ambos elementos están distribuidos aparentemente de manera uniforme en la muestra; el resto de los elementos contenidos en la muestra según los análisis en EDX se encuentran en el anexo A-7.

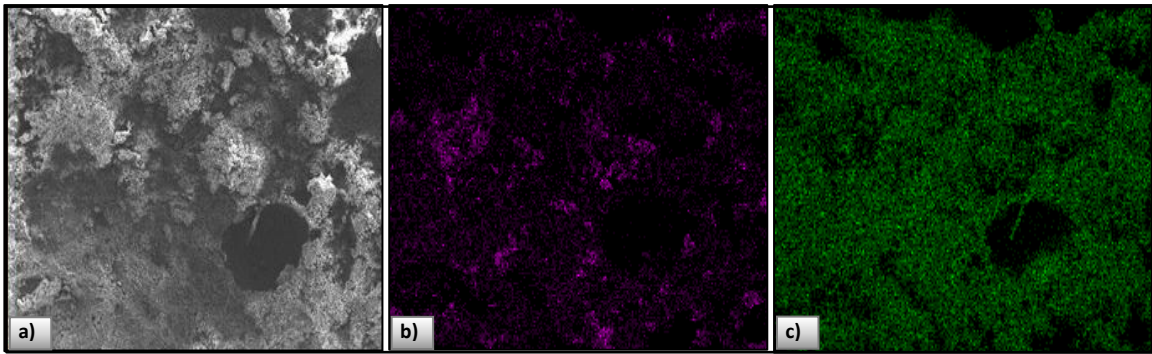


Figura 5.48 Análisis por EDX de la muestra R0, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

5.3.3.2 Muestras de Referencia con campo eléctrico de 12V (RH2O 12V)

Las muestras de referencia sometidas a tratamiento electroquímico utilizando solamente agua desionizada, fueron observadas a los 7 y 56 días después de la aplicación del tratamiento con 12V. Como se puede observar en la figura 5.34, la muestra se observa erosionada decreciendo en dirección al sentido de la migración (de positivo a negativo), mostrando ya en el lado negativo una apariencia similar a la muestra R0, véanse figuras 5.49 y 5.50.

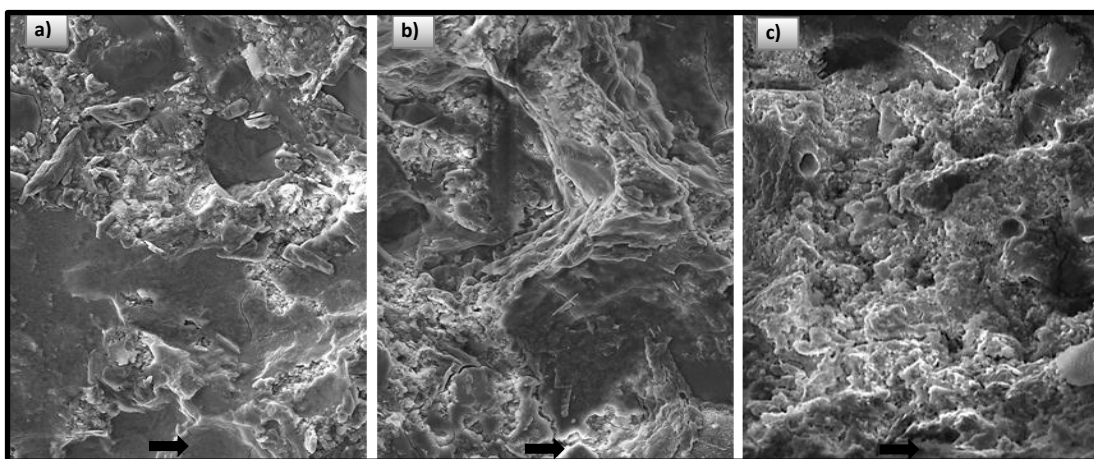


Figura 5.49 Imágenes del SEM de la muestra RH2O 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

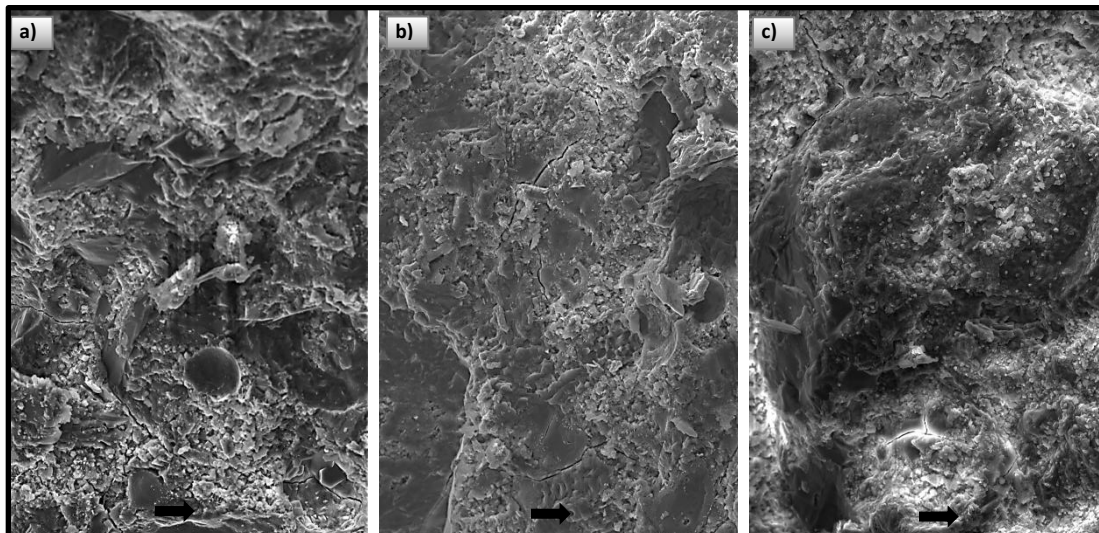


Figura 5.50 Imágenes del SEM de la muestra RH2O 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

En ambos casos los análisis semicuantitativos revelan que hay una variación en el contenido de silicio, véanse figuras 5.51 y 5.52; disminuyendo bruscamente en casi un 10% en el polo negativo de la muestra; por otro lado, en cuanto a la microestructura y la distribución de especies químicas analizadas mediante EDX muestran uniforme del calcio y el silicio, de manera similar a como se encuentra distribuida en la muestra de referencia R0, véanse figuras 5.53 y 5.54.

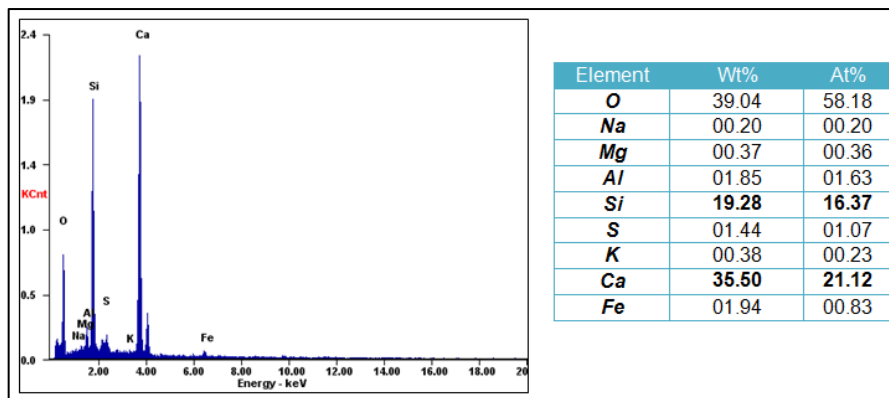


Figura 5.51 *Análisis semicuantitativo de la muestra RH2O 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo.*

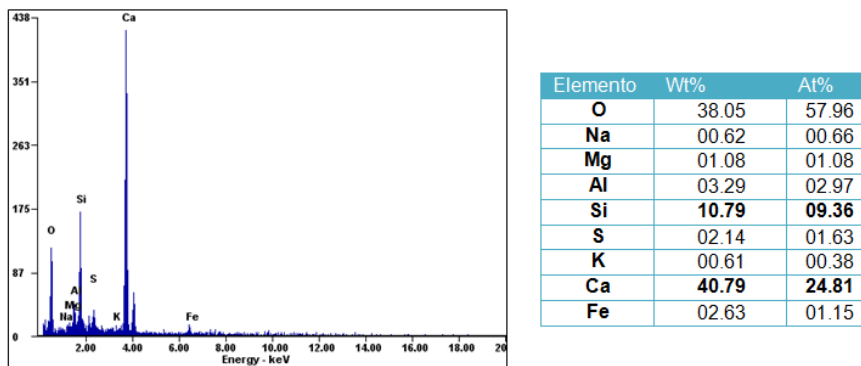


Figura 5.52 *Análisis semicuantitativo de la muestra RH2O 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo.*

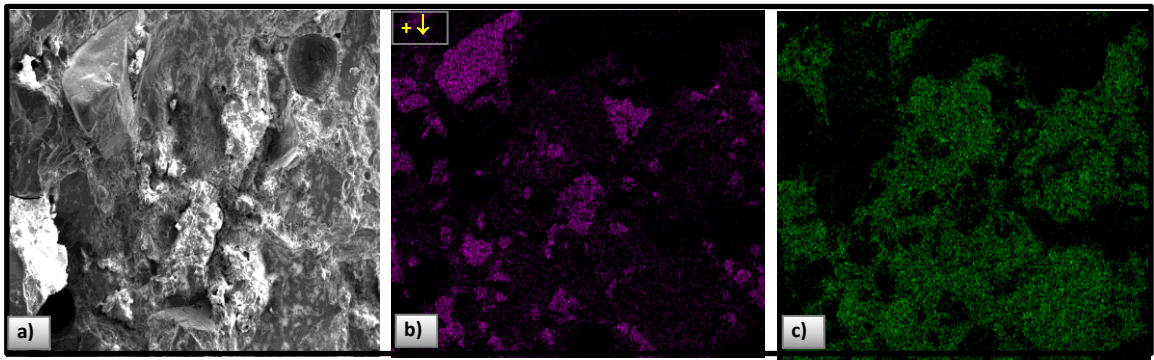


Figura 5.53 Análisis por EDX de la muestra RH2O 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, polo positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

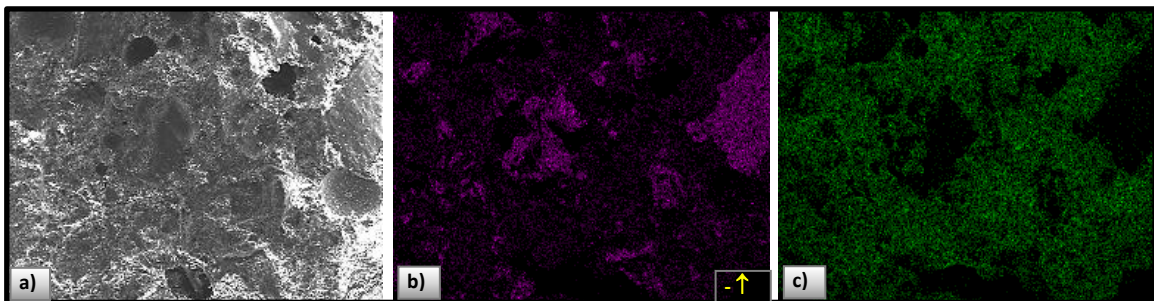


Figura 5.54 Análisis por EDX de la muestra RH2O 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, polo negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

De manera general y de acuerdo a las evidencias presentes se puede decir que la aplicación del campo eléctrico trajo como consecuencia en la muestra, la movilidad de elementos como el silicio hacia el polo positivo, resultando una variación en la relación Ca/Si hacia el polo negativo, lo cual quiere decir que se han movido iones de silicio hacia el polo positivo, véase tabla 5.9. En otro sentido, las imágenes obtenidas en el SEM muestran una variación de la microestructura superficial de la muestra, resultando una superficie más erosionada hacia el polo positivo y de manera invertida hacia el negativo.

Tabla 5.9 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V.

Muestra	Polo	W%
R0		1.80
RH2O 12V	+	1.84
	-	3.78

5.3.3.3 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V)

Las muestras 30%(+) 12V observadas a los 7 y 56 días después de la aplicación del tratamiento con 12V, muestran en su microestructura una apariencia de mayor densidad con respecto a las muestras de referencia en sus edades correspondientes, véanse las figuras 5.49-5.50 y 5.55-5.56 respectivamente.

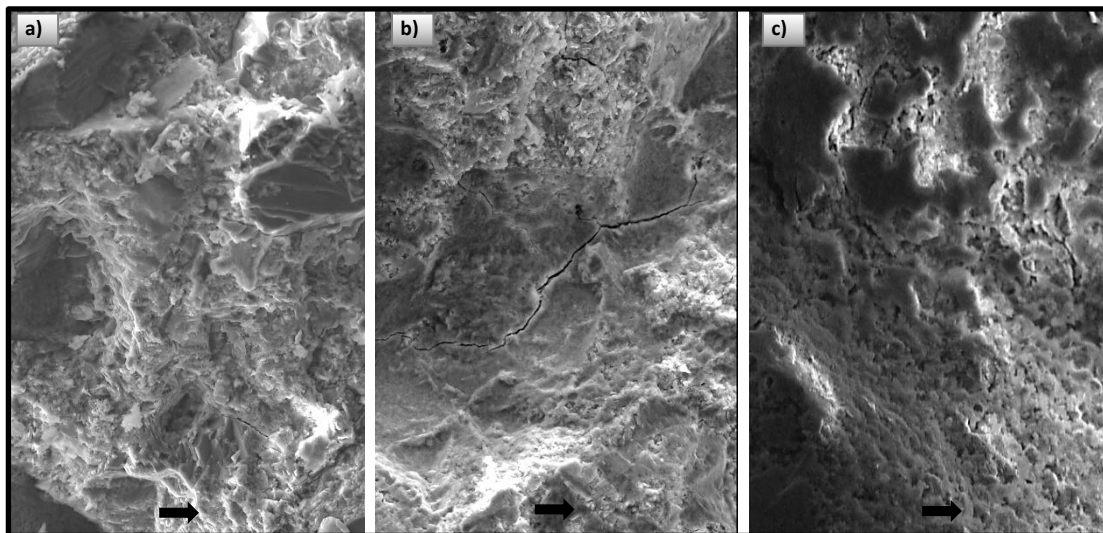


Figura 5.55 Imágenes del SEM de la muestra 30%(+) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

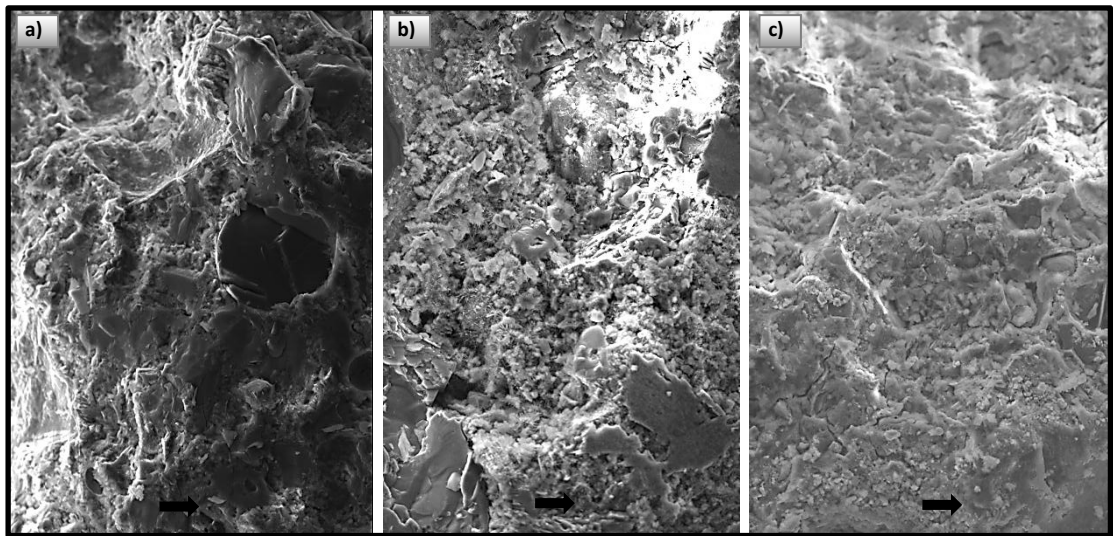


Figura 5.56 Imágenes del SEM de la muestra 30%(+) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

En cuanto al análisis semicuantitativo, el contenido de silicio se cuantifico de mayor a menor en los polos de positivo a negativo, véanse figuras 5.57 y 5.58, es decir; la relación Ca/Si aumenta en cuanto más se acerca al polo negativo, lo cual supone un mayor contenido de iones calcio en cuanto más se aproxima al polo negativo, véase tabla 5.10.

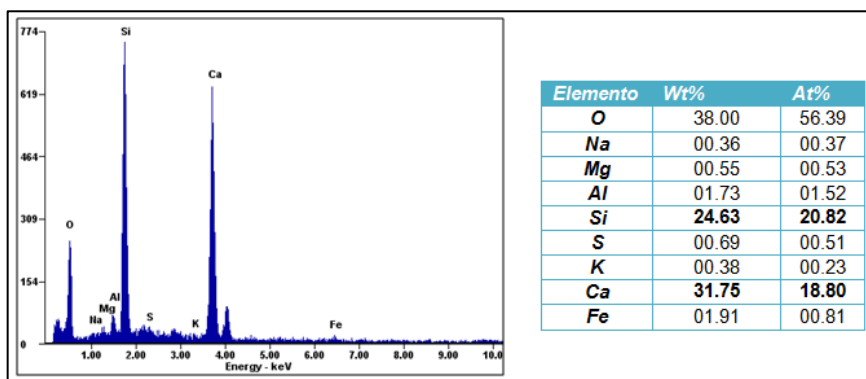


Figura 5.57 Análisis semicuantitativo de la muestra 30%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo.

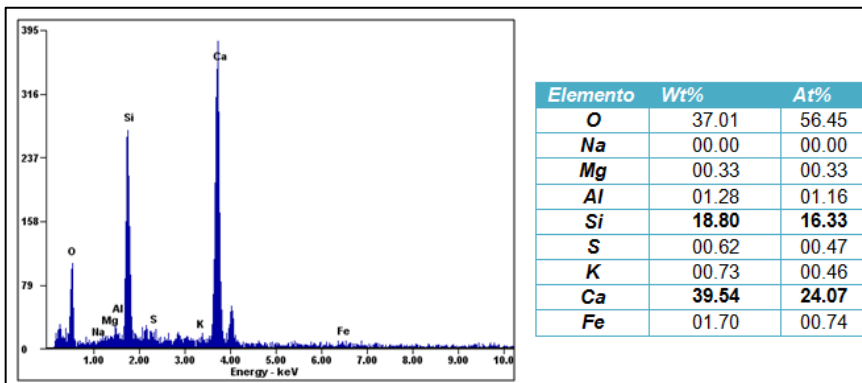


Figura 5.58 Análisis semicuantitativo de la muestra 30%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo.

Tabla 5.10 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V.

Muestra	Polo	W%
R0		1.80
RH20 12V	+	1.84
	-	3.78
30%(+) 12V	+	1.41
	-	2.10

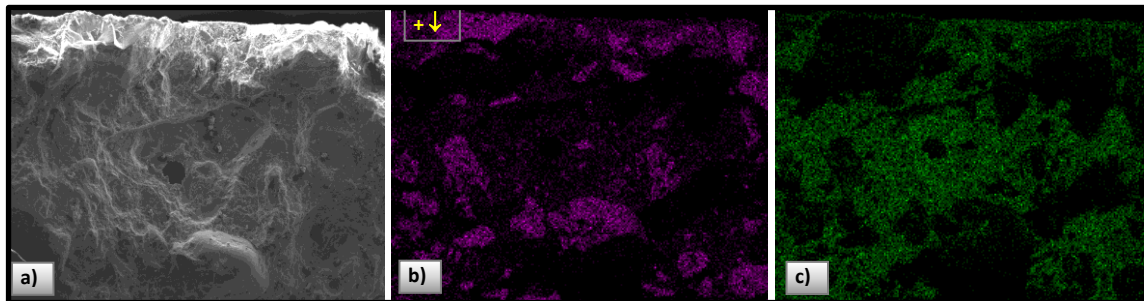


Figura 5.59 Análisis por EDX de la muestra 30%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

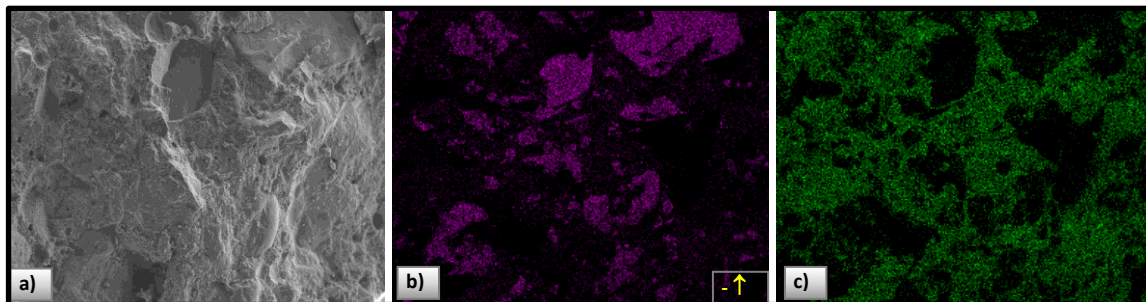


Figura 5. 60 *Análisis por EDX de la muestra 30%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.*

La distribución del silicio en la muestra 30%(+) 12V, se encuentra de mayor a menor del polo positivo hacia el negativo, afirmación que se comprueba con la variación de la relación Ca/Si; de manera invertida se encuentra distribuido el calcio, ya que varía de menor a mayor proporción del polo positivo al negativo.

5.3.3.4 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V)

Siguiendo el mismo orden de análisis, en las figuras 5.61 y 5.62 se muestra la microestructura de las muestras 40%(+) 12V observadas a los 7 y 56 días después de la aplicación del tratamiento con 12V, se observa su microestructura aún más densa que la muestra 30%(+)12V en las sección positiva y media, sin embargo; en la sección negativa presenta una erosión aún más agresiva que en las muestras de referencia durante los primeros días, ya que a 56 días se observa una densificación de toda la matriz, sin embargo; se logra diferenciar entre ambos polos la mayor densificación. Este efecto posiblemente se deba a la influencia del tamaño de la nanopartícula, recordemos que la solución utilizada no solo tiene una mayor concentración

sino que también el tamaño de la partícula es mayor (12nm) por lo cual puede suponerse una mayor trabazón entre los poros del mortero en estudio.

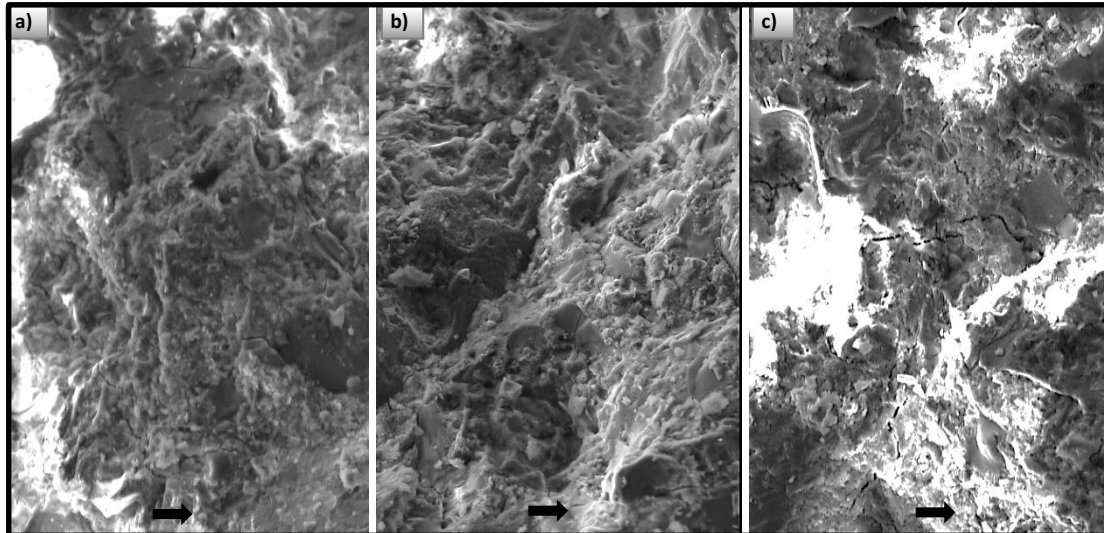


Figura 5.61 Imágenes del SEM de la muestra 40%(+) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

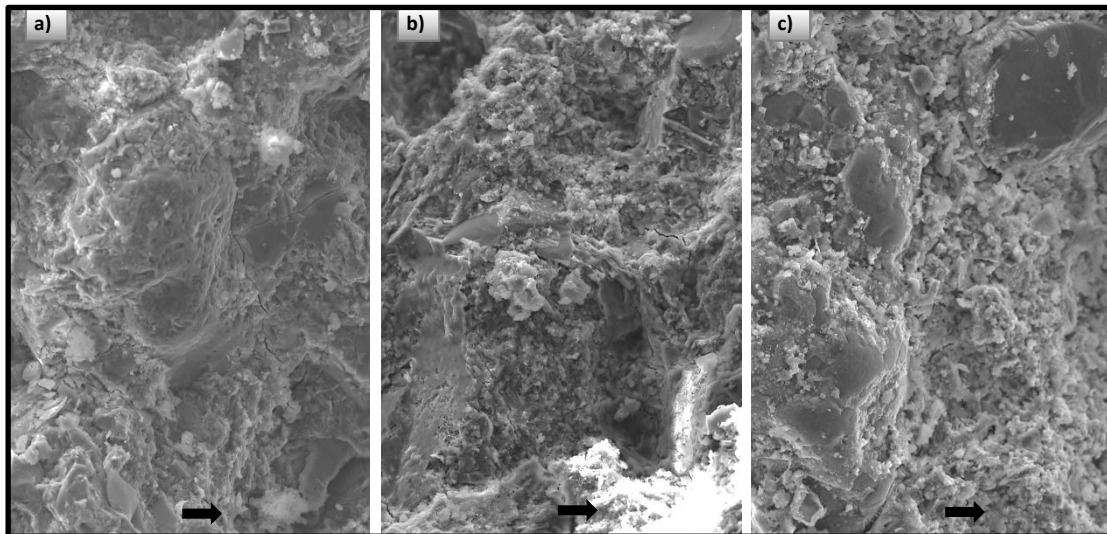


Figura 5.62 Imágenes del SEM de la muestra 40%(+) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.



De acuerdo al análisis semicuantitativo, véanse figuras 5.63 y 5.64, el contenido de silicio cuantificado en ambos polos se mantuvo relativamente uniforme, es decir; la relación Ca/Si no tuvo variaciones significantes en ambos polos, véase tabla 5.11.

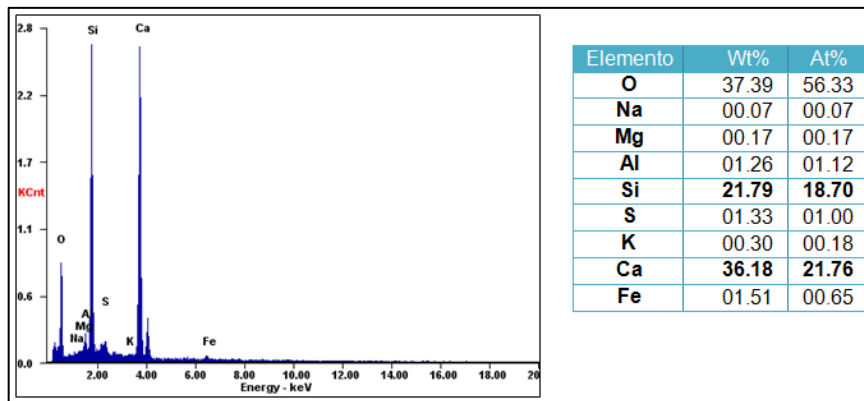


Figura 5.63 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo.

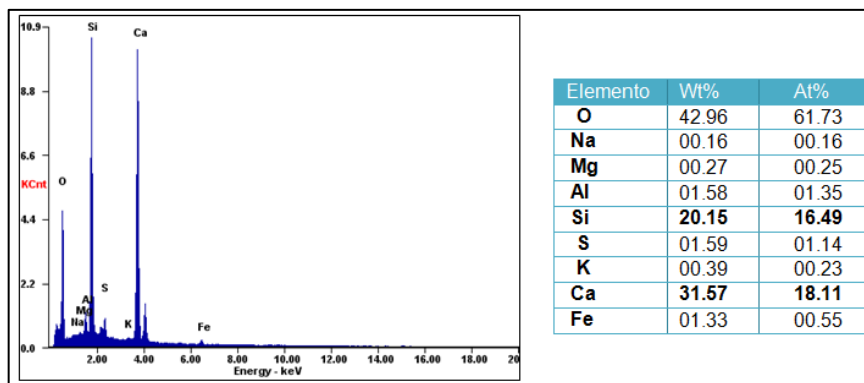


Figura 5.64 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(+) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo.

Tabla 5.11 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V.

Muestra	Polo	W%
R0		1.80
RH2O 12V	+	1.84
	-	3.78
40%(+) 12V	+	1.66
	-	1.57

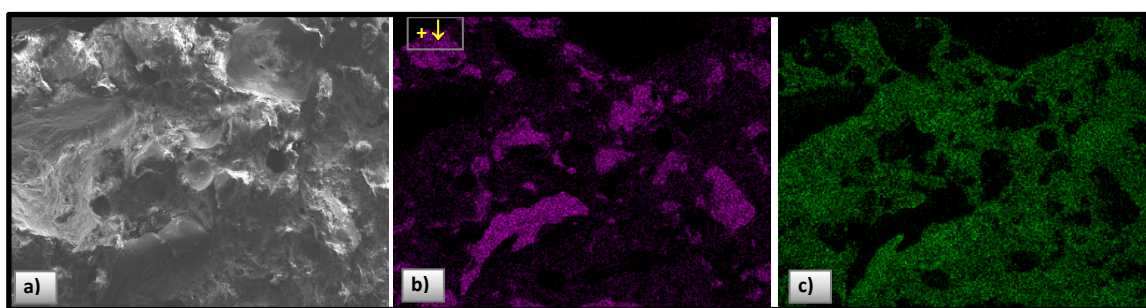


Figura 5.65 Análisis por EDX de la muestra 40%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

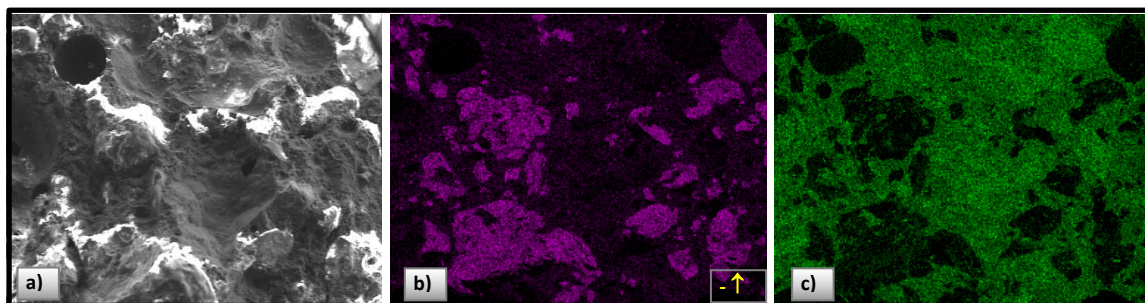


Figura 5.66 Análisis por EDX de la muestra 40%(+) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

Evidentemente según las figuras 5.65 y 5.66, la distribución del silicio sigue siendo de mayor a menor en los polos del positivo al negativo, y análogamente se encuentra la distribución del calcio.

5.3.2.4 Muestras con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (-) 12V)

En el caso de las muestras 40%(-) 12V, las imágenes obtenidas a 7 días después del tratamiento, muestran un aparente incremento en la densidad a partir del polo positivo y disminuyendo hacia el negativo, véase figura 5.67. Sin embargo; con el avance del tiempo, las muestras de 56 días post-tratamiento (figura 5.68) muestran una uniformidad aparente en la densidad de la matriz cementante.

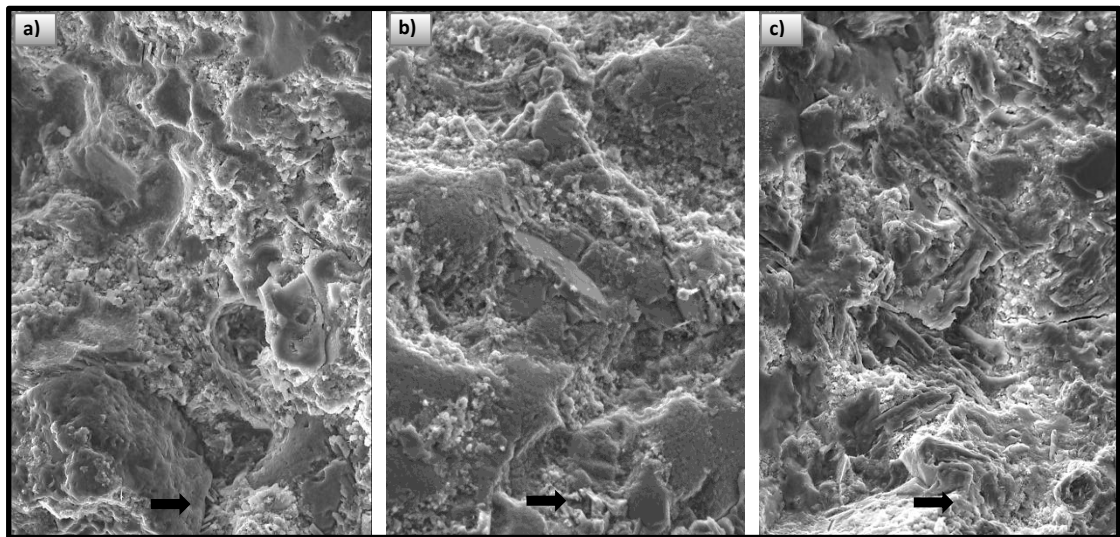


Figura 5.67 Imágenes del SEM de la muestra 40%(-) 12V a 400X, 7 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

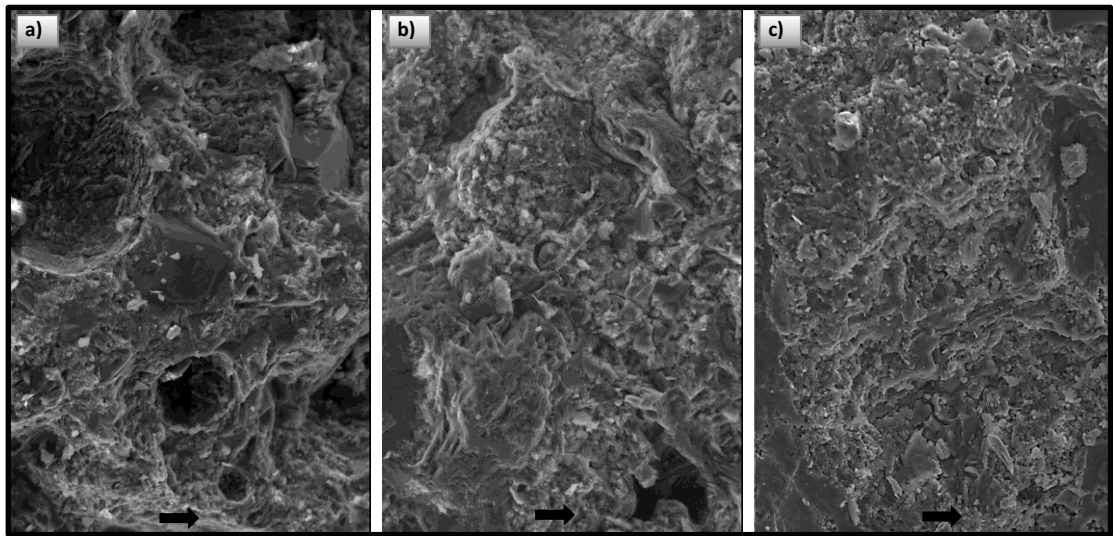


Figura 5.68 Imágenes del SEM de la muestra 40%(-) 12V a 400X, 56 días después de la aplicación del campo eléctrico. a) Sección del borde positivo, b) Sección media; c) Sección negativa.

Con respecto al análisis semicuantitativo realizado a la muestra, véanse figuras 5.69 y 5.70, la relación Ca/Si mantuvo la misma tendencia que en las muestras conectadas de manera normal, o sea, en el polo positivo fue mayor y decreciendo hacia el polo negativo, véase tabla 5.12.

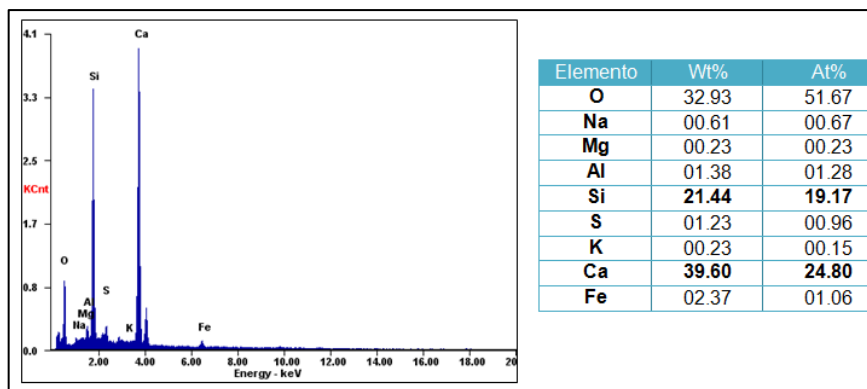


Figura 5.69 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(-) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde positivo.

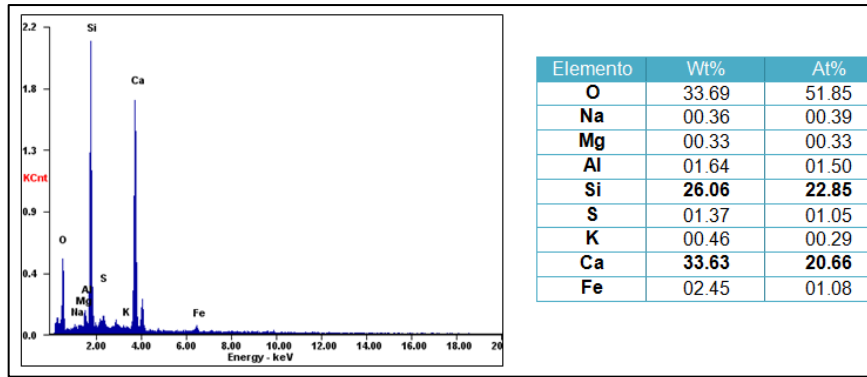


Figura 5.70 Análisis semicuantitativo de la muestra 40%(-) 12V a 7 días de la aplicación del campo eléctrico de 12V, borde negativo.

En cuanto a la distribución de calcio en las muestras, se puede observar que se encuentra uniformemente distribuido en el polo positivo y negativo; por otra parte, el silicio aparentemente se encuentra distribuido uniformemente en las secciones de prueba, véanse figuras 5.71 y 5.72.

Tabla 5.12 Variación de la relación Ca/Si en las muestras de referencia con y sin aplicación de campo eléctrico de 12V.

Muestra	Polo	W%
R0		1.80
RH2O 12V	+	1.84
	-	3.78
40%(-) 12V	+	1.85
	-	1.29

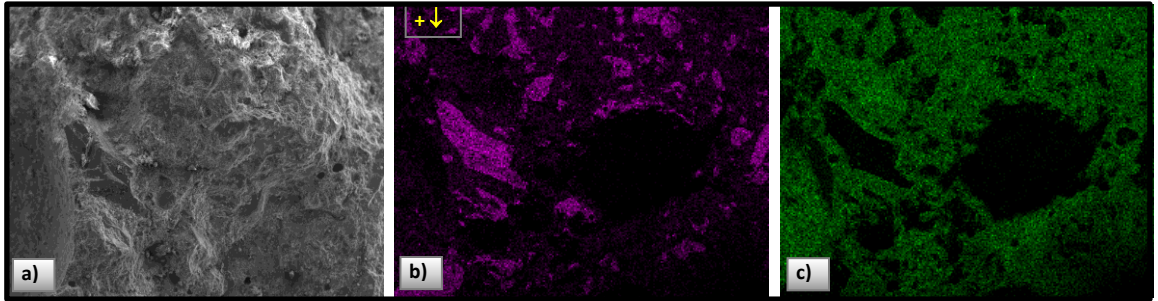


Figura 5.71 Análisis por EDX de la muestra 40%(-) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde positivo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

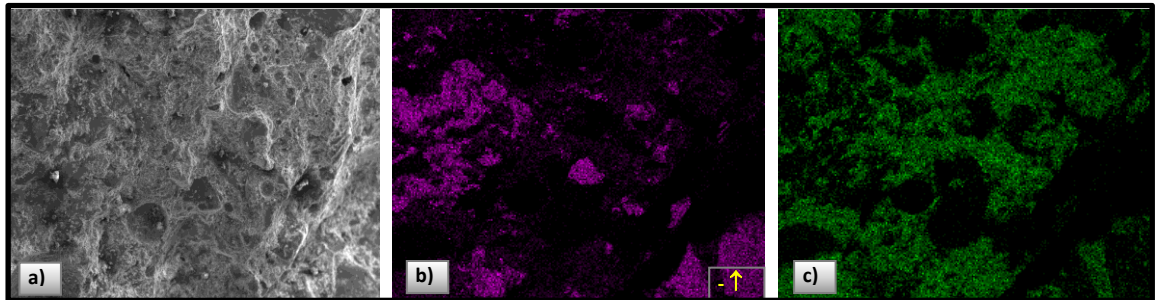


Figura 5.72 Análisis por EDX de la muestra 40%(-) 12V 7 días después de la aplicación del tratamiento, borde negativo, a) Superficie de la muestra, b) Distribución de silicio; y c) Distribución de calcio.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusión general.

La migración o movimiento iónico fue logrado a partir de la aplicación de campos eléctricos a través del cuerpo de los morteros, evidenciándose esto con los cambios en el pH y la conductividad de las soluciones acuosas presentes a cada lado de las celdas en estudio. De una manera similar, la electromigración de nanopartículas de sílice coloidal al interior de un mortero con relación agua-cemento de 0.5, mediante la acción de un campo eléctrico (2.3-87,3 V/cm) ha sido posible, no obstante, el control de la movilidad y la reactividad de las partículas es un objeto de estudio más complejo el cuál no se puede caracterizar completamente mediante las técnicas electroquímicas utilizadas en este trabajo.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la PIM, se ha deducido que la distribución de los tamaños de poros ha sido afectada favorablemente, es decir, se ha obtenido una reducción de dichos tamaños principalmente aquellos poros reportados como responsables del proceso de la permeabilidad. El porcentaje de porosidad total presente en las muestras de mortero endurecido es reducido con la migración de nanosílice coloidal, siendo el de mayor efectividad el producido con la conexión a 12V, así mismo lo confirman los datos obtenidos de las resistividades de los morteros antes y después del tratamiento, los cuales aumentan en magnitud después de la aplicación del campo eléctrico, es decir; podríamos hablar de una matriz cementante resultante más densa que la original que no tiene ningún tratamiento electroquímico.

En cuanto al sentido de migración se refiere, la conexión invertida presentó una mayor reducción del porcentaje de porosidad total. De otro modo las celdas conectadas de manera normal presentaron una variación de la distribución de la red de poros relacionada con los agentes promotores del deterioro en el mortero fue reducida y mayoritariamente modificada, siendo la más afectada la muestra tratada al 40% de concentración en peso y con tamaño de partícula de 12nm. Dicha conclusión se ha obtenido a partir de la comparación con su muestra de referencia, es decir, el mismo mortero bajo las mismas condiciones solo que sin la aplicación de campos eléctricos.

Cuando se analizan bajo el microscopio las muestras con superficie fracturada se observa una aglomeración de partículas de silicio y oxígeno localizadas hacia el extremo positivo, éste compuesto tiene una apariencia similar al gel precipitado cuando se cambia el sentido de conexión por lo que, se podría aseverar que la migración se verifica dentro de la matriz cementante cuando la nanosílice se precipita y aglomera. De otra manera no se pudo obtener evidencia alguna de una reacción sílico- cálcica en el interior del



mortero, ya que los datos de los mapeos y los microanálisis realizados muestran partes de un compuesto de estructura muy densa a base de sílice y oxígeno (y minoritariamente de otros elementos). Cabe señalar que debido a que se utilizó arena estándar para la elaboración de los morteros solo se han mencionado los cambios observados que se le atribuyen a la migración, ya que mediante las técnicas utilizadas es incierto hacer una descripción a detalle del avance de las nanopartículas de sílice al interior de los morteros.

6.2 Conclusiones particulares.

Los aspectos más relevantes que podemos concluir para las muestras de morteros estudiadas en esta investigación son los siguientes:

- La migración de especies iónicas en el mortero endurecido sucede a partir de la aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V.
- Se comprobó la factibilidad de hacer migrar nanopartículas de sílice coloidal (7-12 nm en tamaño) al interior de morteros endurecidos de edad temprana, siendo factible a partir de campos eléctricos generados desde 3.22 V/cm.
- Se determinó que el sentido de migración de las nanopartículas de sílice es del polo negativo hacia el positivo. Esto pudo observarse con ayuda del MEB donde en las muestras en conexión normal se identificaron pequeñas bandas aglomeradas hacia el polo positivo a base de oxígenos y sílice; además que, cuando la conexión se realizó de manera invertida la nanosílice precipitó del mismo lado de la celda que la contenía, esto debido al rápido cambio del pH lo cual impidió su penetración en el mortero.



- Las técnicas de caracterización electroquímica tal y como son la medición de la diferencia de potencial, la intensidad de corriente, el pH y la conductividad son factibles para caracterizar en primera instancia los fenómenos producidos mediante la electromigración sin embargo; para el estudio de la eficiencia del tratamiento resultan limitadas ya que nos ha hecho falta medir la cantidad de partículas que han penetrado, así como las que han resultado del otro lado de la solución de celda, la primera con ayuda del DRX y la segunda con un conteo iónico en la solución, así podríamos hacer un aproximado del porcentaje de partículas penetradas y habidas en el interior del mortero.
- La variación del campo eléctrico fue mayor cuando el voltaje aplicado fue de 12V, esto puede ser debido a que existe mayor diferencia de potencial que permite la migración de iones y por consecuencia las variaciones del campo eléctrico.
- La variación del flujo eléctrico fue constante durante el tiempo de aplicación de la corriente eléctrica y directamente proporcional a la diferencia de potencial medida.
- El pH de las suspensiones y del agua de prueba es muy sensible a cambios debido a los procesos de hidrólisis que ocurren en los electrodos, el cambio del pH puede estar asociado a la lixiviación de especies iónicas de la matriz cementante o al proceso de hidrólisis. Cuando la conexión es opuesta la hidrólisis es el principal mecanismo que gobierna el cambio del pH reduciéndose en el ánodo e incrementándose cátodo, esto es debido a la precipitación y posterior adherencia de la nanosílice a la superficie del mortero.
- El comportamiento de la conductividad en las muestras de referencia se mantuvo una tendencia de aumento constante en ambas soluciones de la



celda lo cual indica una migración de especies iónicas que se pueden lixiviar hacia ambos lados desde el interior del mortero, sin embargo; la conductividad en el anolito de las celdas con nanopartículas se presentó un comportamiento con tendencia a aumentar, observándose una pendiente con tendencia positiva conforme avanza la prueba, por lo que se puede decir que la tendencia presentada en el anolito es atribuida a la migración de iones hacia este lado de la celda, es decir; conforme el periodo de prueba aumenta, el anolito adquiere más iones que lo hacen más conductor. De manera contraria, sucede en el catolito, el cual conforme avanza el tiempo, va perdiendo conductividad.

- Mediante los resultados de porosimetría utilizando PIM, se comprobó la reducción del porcentaje de porosidad en muestras tratadas con la suspensión de nanopartículas, sin embargo; se ha tomado de mayor importancia la reducción de los rangos de tamaño de poro, ya que antes que la porosidad, los poros interconectados (en este caso se han clasificado los tipos de poro de acuerdo a su diámetro según la referencia 22) son los de mayor importancia en el transporte de agentes agresivos hacia el interior de la matriz cementante.
- En cuanto a la microestructura se refiere, ya hemos mencionado la reducción de la porosidad total, sin embargo; se obtuvieron también cambios favorables en las resistividades de los morteros tratados, resultando ser superiores a las registradas por los morteros de referencia (tanto sin aplicación de campos eléctricos, como las referencias con agua desionizada), lo cuál podría ser un indicio de una mayor densidad en los morteros.
-



- Con relación a las imágenes obtenidas en el SEM, podemos decir que la microestructura de las muestras con aplicación del tratamiento con nanopartículas de sílice resultaron ser de mayor densidad aparente en comparación con las muestras de referencia.

▪

6.3 Recomendaciones.

- Realizar la experimentación con agregado calizo para poder obtener muestras verídicas en el DRX.
- Realizar cuantificación iónica de la suspensión y agua de prueba como una forma de correlacionar los electrolitos con la microestructura.
- Estudiar el efecto del tiempo de prueba y el espesor de la sección para determinar el mecanismo de movilidad y/o reactividad de las nanopartículas.
- Realizar la combinación de nanopartículas y electrolitos tipo inhibidores como suspensión de migración en secciones reforzadas.
- Ver la factibilidad y eficacia de los tratamientos sobre secciones envejecidas y deterioradas.

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Arena Cabello F. (2007), Nanociencia et Moletrónica, internet electronics journal, Noviembre, Vol. 5, pgs. 1101-1111, Madrid España.
- 2 Instituto de Nanotecnología (2006), Nanotecnología y construcción, octubre, Ed. Surinder Mann, Unión Europea.
- 3 Tritthart Jose (1993), Electrochemical removal of chloride from hardened cement paste , Septiembre, pgs.1095-1104 .
- 4 Orellan J.C. (2004), Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects , Cement and Concrete Research, pgs. 227-234
- 5 Fajardo G.J, (2005), Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by “artificial” sea-water ; Corrosión Science, Vol.48, pgs. 110-125.
- 6 Sánchez M. y Alonso M. (2011), "Enhancement of electrochemical chloride removal using corrosion inhibitors", Construction and Building Materials 25, pgs. 873-878.
- 7 Gomá F.(1979), El cemento pórtland y otros aglomerantes, Editores Técnicos Asociados s.a, Barcelona, España; págs. 3,13,14,20.
- 8 Gutiérrez Lòpez L. (2003), El concreto y otros materiales de construcción, Editorial Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 1era edición, Colombia.
- 9 Kosmatka, Steven H.; et al. (2004), Diseño y Control de Mezclasde Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A; págs.25,45,10.



- 10 CEAC (ed) (2007), Nueva Enciclopedia del Encargado de Obras, Materiales de Construcción, Editorial CEAC. Barcelona, España; pg. 37.
- 11 Ramachandran V.S. y Beaudoin James J. (2001), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.; págs. 3,4,8-10,13.
- 12 Aïtcin Pierre Claude(2005), Ingeniería de los Cementantes Hidráulicos, Editado por “Cuerpo Académico de Tecnología del Concreto”, FIC-UANL, Monterrey N.L., México; págs.83,86.
- 13 Mehta K. y Monteiro P. (2006), Concrete (Microstructure, properties and Materials), Mc Graw Hill, USA; pg.31.
- 14 Comisión permanente del cemento, Recepción del Cemento (RC) 08, ed. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, España.
- 15 Neville A. M y Brooks J.J. (1998), Tecnología del concreto, 1° edición. Ed. Trillas, México, D.F. ; pg.202.
- 16 Ramachandran V.S. y Beaudoin James J. (2001), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A; 658,659,662.
- 17 Claisse P.A. (1988), Properties and Performance of High Strength Silica Fume Concrete, tesis The University of Leeds, Plymouth, Reino Unido.
- 18 Solís-Carcaño R. Y Moreno E., (2006), Análisis de la Porosidad del Concreto con Agregado Calizo, Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Mexico.



- 19** López Orozco J.O., (2004), Porosidad del Concreto, trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- 20** IUPAC (1972), Manual of Symbol and Terminology, Pure Appl. Chemistry, apéndice 2, parte 1, pg.31.
- 21** Mehta K. y Monteiro P. (2006), Concrete (Microstructure, properties and Materials), Mc Graw Hill, USA; pg.212.
- 22** Mindess, S., Young, J. F. (1981), Concrete. Ed. Prentice Hall Inc., Englewood. Cliffs. New Jersey.
- 23** Powers, T. C., Brownyard, T. L. (1948), Studies of the physical properties of hardened cement paste. Portland Cement Association: Chicago, pg. 2.
- 24** Bear , J.; Braester, C. (1972), Fundamentals of Transport Phenomena in porous media, Elsevier, pg.764.
- 25** Zega, C.J, Taus, V.L y Di Maio, A.A. (2006), Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. IMME, vol.44, .no.3, p.17-26. ISSN 0376-723X. Caracras, Venezuela.
- 26** Neuman J. y Ban Seng C. (2003), Advanced Concrete Technology., Concrete properties, Editorial Elsevier, Gran Bretaña.
- 27** Jiménez Molero M.C., Soto Camino J. (2006). Química Física para Ingenieros Químicos., Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- 28** Valenzuela Calahorro C. (1995)., Química General, Introducción a la Química Teórica., Ediciones Universidad Salamanca, España, pg. 335.



- 29 John C. Kotz, Paul M. Treichel, Gabriela C. Weaver (2006), Química y reactividad química, ed. Thomson, 7a Edición, México.
- 30 Martínez Marquez Eduardo J. (2006), Química 2, Ed. Thomson, México, pp.104.
- 31 Taylor H.F. (2003) Cement Chemistry. Academic Press, New York.
- 32 Bersen J. y Barnes P. (2002), Structure and Performance of Cements. Spon Press..
- 33 Lin D.F. , Lin K.L., Chang W.C. (2008), Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar., Waste Management 28, pp.1081–1087.
- 34 Chandra S., in: V.M. Malhotra (Ed.), Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete – Supplementary papers, Bangkok, 1998, p. 323.
- 35 Bjornstrom J., Martinelli A., et al (2004), Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement, Chemical Physics Letters 392, pp.242–248
- 36 R.S.Chen, Q.Ye (2002) Research on Comparison of Properties of Hardened Cement Paste Between Nano sio₂ and Silica Fume add. Concrete research 1, 7-10.
- 37 Tao Ji (2005) Preliminary Study on Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano- sio₂. Cement and Concrete Research 35, 1943-194.



- 38** Li Hui, Xiao Hui-gang, Yuan Jie, Ou Jinping (2004), Microstructure of cement mortar with nano-particles, Composites part B; pp. 185-189.
- 39** Aguilar Mundaca R.P. (2007), determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta a su durabilidad, tesis Universidad Austral de Chile.
- 40** Masliyah Jacob H. y Bhattacharjee Subir (2006), Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena, ed. John Wiley & Sons, Inc.
- 41** Wilches Zuñiga M., et al. (2007), Bioingeniería VI (Fundamentos de instrumentación para la química clínica y las radiaciones ionizantes), Editorial Universidad de Antioquia, Colombia, págs. 41.
- 42** Kohlrausch F., Ann. Phys., p.62, 209 (1897).
- 43** Tiselius A. (1930), The moving boundary method of studying the electrophoresis of proteins, Ph. D. Thesi, , Ed.Almqvist&Wiksell, Uppsala, Suecia
- 44** Hjerten S.(1967),Free zone electrophoresis "Chromatogr", Rev. 9, pag.122.
- 45** Jorgenson J.W., Lukacs K.D. (1981), "Analytic Chemistry", p.53.
- 46** Jorgenson J.W., Lukacs K.D.(1981), "J. Chromatogr", p. 218.
- 47** Jorgenson J.W., Lukacs K.D.(1983), "Science", p.222.
- 36** Wehler T., Shu M., (1993) "Capillary Electrophoresis", Boca Raton, FL: CRC Press, chapter 1.

- 49 WestermeierReiner et al.(2005),, "Electrophoresis in practice"., Ed. Wiley-Vch., Alemania , pp. 385.
- 50 Sierra Alonso Isabel, et al. (2010), "Análisis Instrumental", ed. NETBIBLO,México, pp.172
- 51 Jae-Suk, Ryua; Nobuaki , Otsuki (2001), "Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique", Cement and Concrete Research, pgs. 159-163.
- 52 Cardenas H. y Struble LJ.,(2006), "Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability", Journal Materials in Civil Engineering, ASCE
- 53 Cardenas, Henry E; Struble, Leslie J. (2008), "Modeling electrokinetic nanoparticle penetration for permeability reduction of hardened cement paste", Journal of Materials in Civil Engineering, pgs.683-691.
- 54 Kupwade- Patil, Kunal ; Cardenas, H. (2008), "Corrosion Mitigation in concrete using electrokinetic injection of reactive composite nanoparticles ", SAMPE 2008, Long Beach, CA.
- 55 Morefield, S.; Hock , Vincent F. (2008), "Application of electrokinetic nanoparticle migration in the production of novel concrete- based composites", Orlando, Florida, USA.
- 56 Cardenas, Henry; Kupwade-Patil , Kunal; Eklund, Sven (2010), "Corrosion mitigation in mature reinforced concrete using nanoscale pozzolan deposition", Journal of Materials in Civil Engineering.



- 57** Kupwade-Patil, Kunal; Cardenas, Henry; Eklund, Sven (2010), "Recovery from sulfate attack in concrete via electrokinetic nanoparticle treatment", Journal of Materials in Civil Engineering.
- 58** Cardenas, Henry ; Alexander , Joshua ; Kupwade-Pa, Kunal ; Calle, Luz Marina (2010), "Field testing of electrokinetic nanoparticle treatment for corrosion mitigation in reinforced concrete".
- 59** Manahan Stanley E. (2007), Introducción a la química ambiental, ed. Reverté UNAM, México, pp. 82.
- 60** Castellote, Andrade , & Alonso (1999), Changes in Concrete Pore Size Distribution Due to Electrochemical Chloride Migration Trials, ACI Material Journal, pp. 314-320. Electrochemical Chloride Migration Trials
- 61** Arrard , G.S. (1995), "Nature", pgs. 365-368
- 62** Matijevic´, E. (2002), "A critical review of the electrokinetics of monodispersed inorganic colloids in interfacial electrokinetics and electrophoresis", Ed., Marcel Dekker, New York, pgs.199-218.
- 63** Kohlmann F. (2003), "What is ph, and how is it measured?", Technical Handbook for Industry, pp.7.

ANEXO A-1

INTENSIDAD DE CORRIENTE

Cálculos y resultados

ANEXO A-1

Mediciones de intensidad de corriente en celdas de prueba

Celdas de Referencia

Tabla A-1.1 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en muestras de referencia con un campo eléctrico aplicado de 6V

RH2O 6V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
25.90	6.625	34.47	7.53	2073.60	2073.60	15608.07	15608.07
23.28			6.77	3196.80	1123.20	8026.75	23634.82
26.38			7.67	90633.60	87436.80	630950.54	654585.36
30.00			8.72	150940.80	60307.20	494070.11	1148655.47
30.00			8.72	178502.40	27561.60	240297.93	1388953.39
24.40			7.09	232502.40	54000.00	426861.52	1815814.91
21.00			6.10	315273.60	82771.20	546046.28	2361861.19
20.24			5.88	340502.40	25228.80	151185.31	2513046.50
21.33			6.20	660009.60	319507.20	1929989.82	4443036.32
25.48			6.63	34.47	7.39	6307.20	6307.20
27.00	7.83	89078.40			82771.20	630057.84	676677.96
26.60	7.72	147916.80			58838.40	457438.79	1134116.74
26.50	7.69	175478.40			27561.60	212278.64	1346395.38
20.83	6.04	578707.20			403228.80	2768186.78	4114582.16
22.78	6.61	684892.80			106185.60	671674.80	4786256.96

mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
26.30	6.62	34.41	7.64	9288.00	9288.00	70990.84	70990.84
26.00			7.56	68688.00	59400.00	451421.75	522412.59
26.60			7.73	86685.12	17997.12	137557.13	659969.71
26.30			7.64	149688.00	63002.88	484295.48	1144265.20
26.30			7.64	165888.00	16200.00	123821.23	1268086.43
26.40			7.67	228882.24	62994.24	482398.34	1750484.76
26.00			7.56	254988.00	26105.76	198775.10	1949259.86
26.40			7.67	315878.40	60890.40	463633.13	2412892.99
25.90			7.53	376488.00	60609.60	460614.34	2873507.32
25.90			7.53	698682.24	322194.24	2425168.27	5298675.59

Tabla A-1.2 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en muestras de referencia con un campo eléctrico aplicado de 12V

RH2O 12V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
53.10	6.63	34.47	15.40	2073.60	2073.60	31941.61	31941.61
56.20			16.30	3196.80	1123.20	17806.75	49748.36
55.30			16.04	90633.60	87436.80	1414088.09	1463836.45
54.80			15.90	150940.80	60307.20	963083.24	2426919.69
54.69			15.87	178502.40	27561.60	437709.75	2864629.45
54.48			15.80	232502.40	54000.00	855075.40	3719704.85
50.99			14.79	315273.60	82771.20	1266238.57	4985943.42
49.70			14.42	340502.40	25228.80	368459.94	5354403.36
51.00			14.79	660009.60	319507.20	4666781.44	10021184.80
53.20			6.63	34.47	15.43	6307.20	6307.20
53.00	15.37	89078.40			82771.20	1275002.72	1372341.42
55.50	16.10	147916.80			58838.40	925972.17	2298313.60
54.50	15.81	175478.40			27561.60	439748.59	2738062.18
48.66	14.12	578707.20			403228.80	6033512.53	8771574.71
50.16	14.55	684892.80			106185.60	1522011.09	10293585.80

mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
53.20	6.53	33.48	15.89	9288.00	9288.00	147587.51	147587.51
55.00			16.43	68688.00	59400.00	959841.40	1107428.91
55.50			16.58	86685.12	17997.12	296996.31	1404425.22
53.90			16.10	149688.00	63002.88	1029351.01	2433776.23
55.00			16.43	165888.00	16200.00	263468.48	2697244.71
53.40			15.95	228882.24	62994.24	1019802.08	3717046.79
52.00			15.53	254988.00	26105.76	410925.15	4127971.94
51.20			15.29	315878.40	60890.40	938456.82	5066428.76
50.30			15.02	376488.00	60609.60	918741.28	5985170.04
48.00			14.34	698682.24	322194.24	4729955.56	10715125.59

Celdas en conexión normal

Tabla A.1-3 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 30% en conexión normal y con 6V aplicados.

30% (+) 6V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
26.80	6.55	33.69	7.96	9288.00	9288.00	73895.18	73895.18
26.00			7.72	68688.00	59400.00	465531.95	539427.13
26.30			7.81	86685.12	17997.12	139712.04	679139.17
26.60			7.90	149688.00	63002.88	494703.75	1173842.92
26.30			7.81	165888.00	16200.00	127203.72	1301046.64
26.00			7.72	228882.24	62994.24	489025.67	1790072.31
26.00			7.72	254988.00	26105.76	201497.11	1991569.41
26.00			7.72	315878.40	60890.40	469982.08	2461551.49
26.30			7.81	376488.00	60609.60	470513.66	2932065.15
25.70			7.63	698682.24	322194.24	2486853.73	5418918.88

Tabla A.1.4 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 30% en conexión normal y con 12V aplicados.

30%(+) 12V							
mA	ϕ_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
50.22	6.63	34.47	14.57	6307.20	6307.20	91886.28	91886.28
58.00			16.83	89078.40	82771.20	1299254.18	1391140.46
55.47			16.09	147916.80	58838.40	968387.67	2359528.13
55.24			16.02	175478.40	27561.60	442586.96	2802115.09
55.01			15.96	578707.20	403228.80	6448184.92	9250300.01
55.15			16.00	684892.80	106185.60	1696668.10	10946968.11
55.60	6.63	34.57	16.09	9288.00	9288.00	149401.57	149401.57
56.00			16.20	68688.00	59400.00	958912.13	1108313.70
55.70			16.11	86685.12	17997.12	290793.27	1399106.98
55.40			16.03	149688.00	63002.88	1012517.72	2411624.70
55.00			15.91	165888.00	16200.00	258709.43	2670334.13
53.40			15.45	228882.24	62994.24	987775.60	3658109.74
52.00			15.04	254988.00	26105.76	398020.21	4056129.95
55.60			16.09	315878.40	60890.40	947740.13	5003870.08
55.10			15.94	376488.00	60609.60	970548.43	5974418.51
55.30			16.00	698682.24	322194.24	5145351.14	11119769.66

Tabla A.1.5 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión normal y con 6V aplicados

40%(+) 6V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
26.40	6.64	34.64	7.62	9288.00	9288.00	70789.41	70789.41
26.00			7.51	68688.00	59400.00	449293.23	520082.64
25.95			7.49	86685.12	17997.12	134958.65	655041.29
26.80			7.74	149688.00	63002.88	479727.94	1134769.23
25.80			7.45	165888.00	16200.00	123002.21	1257771.44
26.20			7.56	228882.24	62994.24	472842.31	1730613.75
26.00			7.51	254988.00	26105.76	196706.63	1927320.37
26.10			7.53	315878.40	60890.40	457929.58	2385249.95
25.90			7.48	376488.00	60609.60	454942.92	2840192.87
25.70			7.42	698682.24	322194.24	2399825.26	5240018.13

Tabla A-1.6 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión normal y con 12V aplicados

40%(+) 12V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
48.10	6.63	34.47	13.95	6307.20	6307.20	88007.36	88007.36
55.00			15.96	89078.40	82771.20	1237785.12	1325792.49
55.50			16.10	147916.80	58838.40	943040.78	2268833.27
55.45			16.09	175478.40	27561.60	443546.42	2712379.69
55.33			16.05	578707.20	403228.80	6479183.00	9191562.69
55.28			16.04	684892.80	106185.60	1703598.93	10895161.62

mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
55.60	6.59	34.07	16.32	9288.00	9288.00	151587.24	151587.24
54.00			15.85	68688.00	59400.00	955504.32	1107091.56
55.00			16.14	86685.12	17997.12	287915.58	1395007.14
53.70			15.76	149688.00	63002.88	1005137.79	2400144.93
55.00			16.14	165888.00	16200.00	258452.19	2658597.12
53.80			15.79	228882.24	62994.24	1005924.51	3664521.63
51.00			14.97	254988.00	26105.76	401544.13	4066065.75
53.90			15.82	315878.40	60890.40	937475.59	5003541.35
50.90			14.94	376488.00	60609.60	932262.80	5935804.15
53.80			15.79	698682.24	322194.24	4951081.88	10886886.02

Tabla A-1.7 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión inversa y con 6V aplicados

40%(-) 6V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
26.90	6.54	33.56	8.02	16200.00	16200.00	129843.27	129843.27
25.70			7.66	77400.00	61200.00	479578.06	609421.32
25.70			7.66	103500.00	26100.00	199859.95	809281.27
25.70			7.66	106776.00	3276.00	25085.87	834367.14
25.30			7.54	109764.00	2988.00	22702.46	857069.60
26.00			7.75	431974.80	322210.80	2462519.03	3319588.63

Tabla A-1.8 Cálculo de la variación del flujo eléctrico en la muestra con concentración del 40% en conexión inversa y con 12V aplicados

40%(-) 12V							
mA	\varnothing_{efec} (cm)	A_{efec} (cm ²)	(A/m ²)	t (s)	Δt (s)	$(i_1+i_2)/2 \times \Delta t$	ΔD (C/m ²)
54.10	6.63	34.55	15.66	9288.00	9288.00	145414.79	145414.79
56.00			16.21	68688.00	59400.00	946308.80	1091723.59
56.60			16.38	86685.12	17997.12	293224.68	1384948.26
55.90			16.18	149688.00	63002.88	1025585.89	2410534.15
55.70			16.12	165888.00	16200.00	261600.35	2672134.50
55.50			16.06	228882.24	62994.24	1013595.66	3685730.16
55.00			15.92	254988.00	26105.76	417405.08	4103135.24
55.30			16.00	315878.40	60890.40	971814.67	5074949.92
55.30			16.00	376488.00	60609.60	969964.09	6044914.01
54.60			15.80	698682.24	322194.24	5123592.45	11168506.46

ANEXO A-2

MEDICIONES DE pH

ANEXO A-2

Mediciones de pH

Tablas A-2.1 y A-2.2 *Mediciones del pH en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12 V.*

R H ₂ O, 6V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	8	8
0.795	11.22	11.41
1.003	9.39	11.1
1.733	10.29	11.49
1.920	8.554	8.296
2.649	8.582	10.705
2.951	8.646	11.421
3.656	8.528	10.533
4.358	8.798	10.702
8.087	11.057	12.437

R H ₂ O, 12V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	7.109	7.572
0.795	11.094	11.598
1.003	11.14	11.14
1.733	10.6	11.58
1.920	8.522	8.788
2.649	8.563	11.204
2.951	8.456	9.182
3.656	-	11.648
4.358	8.875	8.885
8.087	9.95	10.978

Tablas A-2.3 y A-2.4 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión normal al 30%..

30%, (+), 6V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	7.94	8.01
0.795	11.208	8.197
1.003	9.2	8.2
1.733	10.81	8.57
1.920	8.341	8.517
2.649	8.602	8.692
2.951	8.786	8.798
3.656	8.774	8.982
4.358	8.969	9.035
8.087	7.756	9.648

30%, (+), 12V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.107	8.35	7.99
0.795	10.891	8.521
1.003	9.07	8.51
1.732	9.48	8.97
1.920	9.272	8.911
2.649	8.512	9.145
2.9512	7.938	9.238
3.65	6.514	9.405
4.357	5.132	9.434
8.086	7.835	10.17

Tablas A-2.5 y A-2.6 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión normal al 40%..

40%, (+), 6V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	7.24	7.4
0.795	11.118	7.544
1.003	9.22	7.68
1.733	9.66	8.16
1.920	8.514	8.851
2.649	9.307	8.426
2.951	8.856	8.522
3.656	9.098	8.845
4.358	11.15	11.197
8.087	7.01	9.726

40%, (+), 12V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.107	7.42	7.91
0.795	11.346	7.588
1.003	10.32	7.84
1.732	11.26	8.11
1.92	8.698	8.316
2.649	8.652	8.448
2.951	8.572	8.667
3.656	8.606	8.85
4.357	8.912	8.889
8.086	6.7	10.194

Tablas A-2.7 y A-2.8 Mediciones del pH en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión inversa al 40%..

40%, (-), 6V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.188	7.968	7.456
0.896	8.398	9.385
1.198	5.699	9.071
1.236	6.655	10.565
1.270	5.926	10.206
5.000	7.752	11.303

40%, (-), 12V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	7.35	10.04
0.795	6.09	11.6
1.003	5.76	11.5
1.733	6.01	11.95
1.920	5.612	11.749
2.649	5.442	11.497
2.951	5.472	11.524
3.656	5.789	10.361
4.358	5.615	11.885
8.087	7.623	11.799

ANEXO A-3

MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD

ANEXO A-3

Mediciones de Conductividad

Tablas A-3.1 y A-3.2 *Mediciones de la conductividad en celdas de referencia con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V.*

RH ₂ O, 6V			RH ₂ O, 12V		
Tiempo (días)	Conductividad (μS/cm)		Tiempo (días)	Conductividad (μS/cm)	
	(+)	(-)		(+)	(-)
0.108	20.8	19.05	0.108	53.4	19.05
0.795	91.8	79.6	0.795	81.2	72.6
1.003	72.7	107.7	1.003	140.2	92.4
1.733	75.3	584	1.733	74.4	550
1.920	94.6	125.7	1.920	98.1	78.6
2.649	-	104.5	2.649	94	330
2.951	88.5	478	2.951	118.5	65.7
3.656	77.9	282	3.656	326	838
4.358	63.4	238	4.358	424	499
8.087	331	1304	8.087	95.7	2020

Tablas A-3.3 y A-3.4 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión normal al 30%..

30%, (+), 6V

Tiempo (días)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	(+)	(-)

0.108	17.57	1279
0.795	99	1248
1.003	67.2	1215
1.733	100.8	1168
1.920	101.5	1149
2.649	92.1	1090
2.951	80.8	1096
3.656	95.4	1056
4.358	98.5	985
8.087	484	852

30%, (+), 12V

Tiempo (días)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	(+)	(-)

0.108	18.6	1283
0.795	86.1	1183
1.003	85	1156
1.733	73.7	1041
1.920	61.2	1071
2.649	213	1011
2.951	259	1013
3.656	354	961
4.358	351	932
8.087	671	801

Tablas A-3.5 y A-3.6 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión normal al 40%..

40%, (+), 6V

Tiempo (días)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	
	(+)	(-)

0.108	38.5	1820
0.795	73.5	1771
1.003	57.8	1766
1.733	72.8	1658
1.920	89.6	1681
2.649	109.1	1610
2.951	76.8	1586
3.656	67.6	1517
4.358	76.6	1487
8.087	732	1141

40%, (+), 12V

Tiempo (días)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	
	(+)	(-)

0.108	16.83	1812
0.795	88.9	1802
1.003	123.4	1778
1.733	159.7	1680
1.920	105	1640
2.649	111	1568
2.951	123	1498
3.656	90	1435
4.358	73	1406
8.087	1118	903

Tablas A-3.7 y A-3.8 Mediciones de la conductividad en celdas con aplicación de campos eléctricos de 6 y 12V en conexión inversa al 40%..

40%, (-), 6V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.188	48.7	1789
0.896	1840	73.3
1.198	1786	73.5
1.236	1780	269
1.270	1784	173.7
5.000	1693	804

40%, (-), 12V		
Tiempo (días)	Polo	
	(+)	(-)
0.108	1805	47.5
0.795	1719	161
1.003	1735	121
1.733	1944	350
1.920	1064	1908
2.649	1966	469
2.951	1820	566
3.656	1764	231
4.358	1743	2500
8.087	641	4290

ANEXO A-4

RESISTIVIDAD

Cálculos y Resultados

ANEXO A-4

Mediciones en las secciones de mortero

Mediciones de la Resistencia eléctrica en las secciones de mortero.

Se realizaron mediciones de resistencia eléctrica en las secciones de morteros; con éstos resultados y con la aplicación de la ecuación A.1 se calculó la resistividad eléctrica en cada sección.

$$\Delta\rho = \frac{\Omega(A)}{l} \dots\dots\dots Ec. A.1$$

Donde:

$\Delta\rho$ = Resistividad del mortero ($\Omega \cdot m$)

Ω = Resistencia del mortero medida (Ω)

A= Área de la sección (m^2)

l= Espesor de la muestra (m)

A continuación, se muestran las tablas de valores obtenidos y calculados:

Tablas A-4.1 *Medición de la resistencia eléctrica y cálculo de la resistividad eléctrica en celdas tratadas a 6V*

Sección	Ω_0	Ω_f	ρ_0	ρ_f	Δ_p
R H ₂ O,6V	156	185	69.736	82.700	12.964
30%,(+),6V	147	212	58.464	84.316	25.851
40%,(+),6V	176	244	64.595	89.553	24.957
40%,(-),6V	167	176	63.451	66.871	3.420

Tabla A-4.2 *Medición de la resistencia eléctrica y cálculo de la resistividad eléctrica en celdas tratadas a 12V.*

Sección	Ω_0	Ω_f	ρ_0	ρ_f	Δ_p
RH ₂ O, 12V	160	197	61.089	75.216	14.127
30%,(+),12V	161	311	59.919	115.744	55.825
30%,(+),12V	159	329	68.448	141.632	73.184
40%,(+),12V	167	329	56.901	112.098	55.197
40%,(-),12V	184	136	62.774	46.398	-16.376

ANEXO A-5

POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO

Cálculos y Resultados

ANEXO A-5

Porosimetria por intrusión de Mercurio (PIM)

A continuación se muestran los datos generales obtenidos de las muestras sometidas a pruebas de PIM.

Muestra de referencia sin aplicación de campo eléctrico (R₀)

Tabla A-5.1 *Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero sin aplicación de campos eléctricos.*

Porosidad =	16.7605	%
Volumen total de intrusión =	0.0812	mL/g
Área total de poros =	5.006	m²/g
Diámetro de poro promedio =	0.0649	µm
Densidad aparente a 0.50 psia =	2.0638	g/mL
Densidad aparente =	2.4794	g/mL

Muestra de referencia con un campo eléctrico aplicado de 6V (R H₂O 6V)

Tabla A.-5.2 Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero de referencia con un campo eléctrico aplicado de 6V.

Porosidad =	15.0465	%
Volumen total de intrusión =	0.0717	mL/g
Área total de poros =	4.806	m ² /g
Diámetro de poro promedio =	0.0597	µm

Densidad aparente a 0.50 psia =	2.098	g/mL
Densidad aparente =	2.4695	g/mL

Muestra de sección de mortero con un campo eléctrico aplicado de 12V (R H₂O 12V)

Tabla A-5.3 Datos obtenidos de la aplicación de la técnica de PIM en muestra de sección de mortero de referencia con un campo eléctrico aplicado de 12V.

Porosidad =	16.6446	%
Volumen total de intrusión =	0.0813	mL/g
Área total de poros =	5.088	m ² /g
Diámetro de poro promedio =	0.0639	µm

Densidad aparente a 0.50 psia =	2.0466	g/mL
Densidad aparente =	2.4553	g/mL

Muestras de secciones de mortero al 30% en conexión normal con un campo eléctrico aplicado de 6V y 12V

Tabla A-5.4 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 30% en conexión normal

Muestra	Porosidad	Volumen total de intrusión	Área total de poros	Diámetro de poro promedio	Densidad aparente a 0.50 psia	Densidad aparente
30%,(+),6V	15.4077	0.0741	5.395	0.0549	2.0797	2.4585
30%,(+),12V	14.338	0.0689	5.547	0.0497	2.0796	2.4277

Muestras de secciones de mortero al 40% en conexión normal con un campo eléctrico aplicado de 6V y 12V

Tabla A-5.5 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 40% en conexión normal

Muestra	Porosidad	Volumen total de intrusión	Área total de poros	Diámetro de poro promedio	Densidad aparente a 0.50 psia	Densidad aparente
40%,(+),6V	14.3577	0.0687	4.766	0.0576	2.0912	2.4418
40%,(+),12V	15.0588	0.0718	5.178	0.0555	2.0965	2.4682

Muestras de secciones de mortero al 40% en conexión invertida con un campo eléctrico aplicado de 6V.

Tabla A-5.6 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 40% en conexión invertida

Muestra	Porosidad	Volumen total de intrusión	Área total de poros	Diámetro de poro promedio	Densidad aparente a 0.50 psia	Densidad aparente
40%,(-),6V	16.2398	0.0794	5.301	0.0599	2.0457	2.4423

Muestras de secciones de mortero al 30% en conexión invertida con un campo eléctrico aplicado de 12V.

Tabla A-5.7 Resultados de la prueba de PIM en muestras al 30% en conexión invertida

Muestra	Porosidad	Volumen total de intrusión	Área total de poros	Diámetro de poro promedio	Densidad aparente a 0.50 psia	Densidad aparente
30%, (-)12V	14.1188	0.0676	4.95	0.0547	2.0872	2.4303

ANEXO A-6

SEM Y MICROANÁLISIS

ANEXO A-6

SEM y Microanálisis

Se realizaron múltiples observaciones a las muestras de mortero bajo el microscopio, a partir de éstas se han escogido algunas imágenes que han generado discusión en cuanto al tipo y presentación de elementos que se encuentran presentes en las muestras.

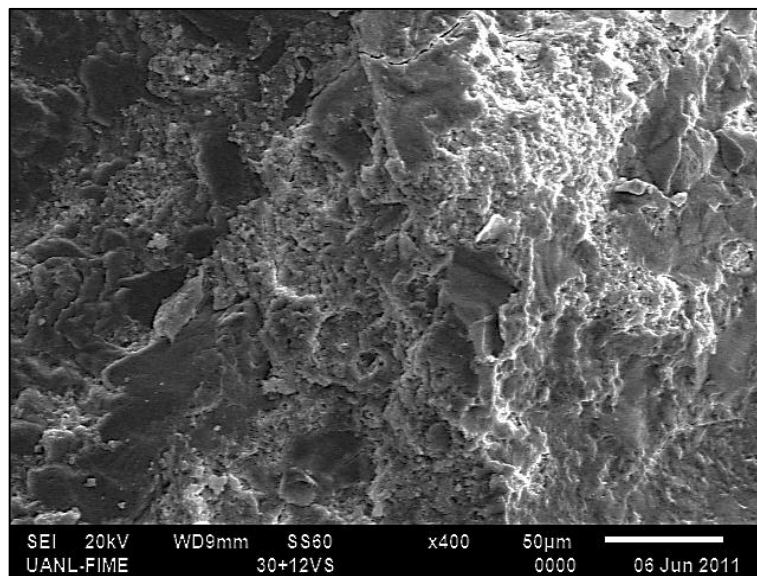
Muestra 30% (+) 12V***Cero días***

Figura A-6.1 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo)

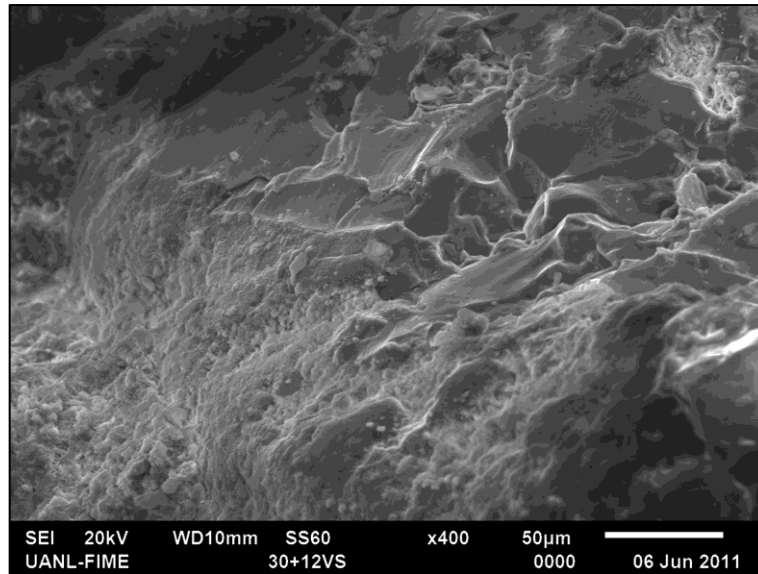


Figura A-6.2 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado negativo)

56 días

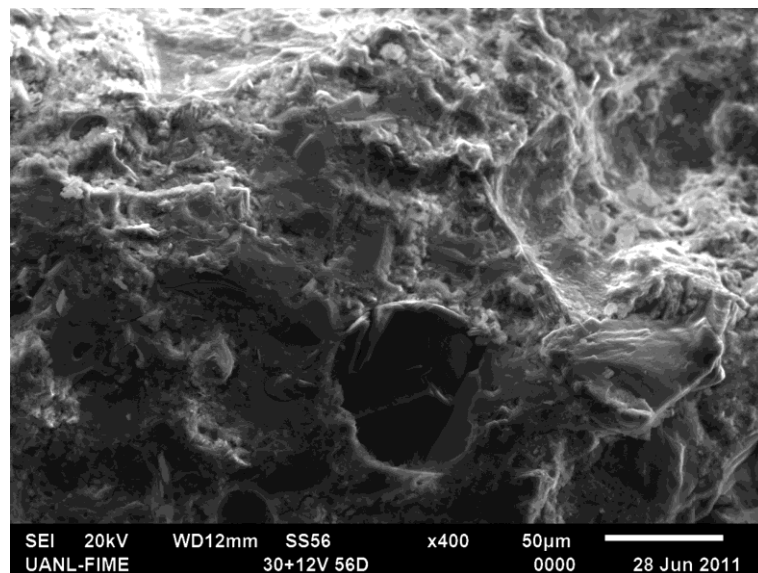


Figura A-6.3 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo)

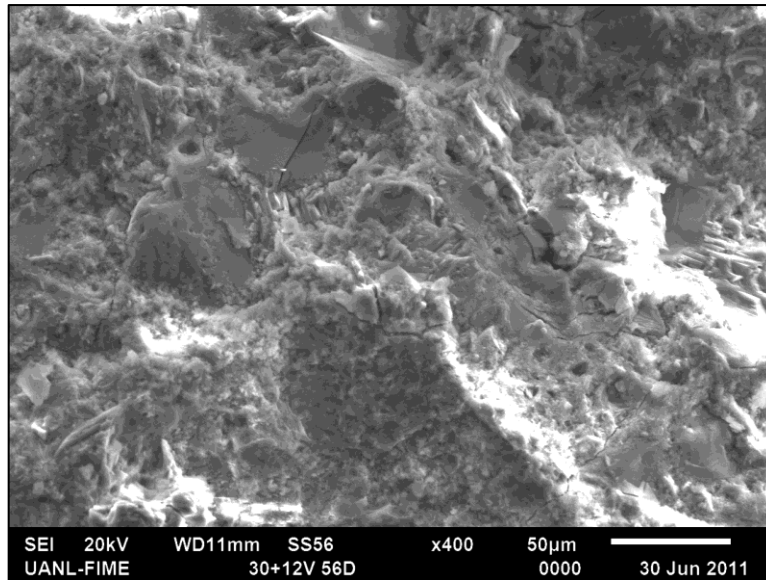
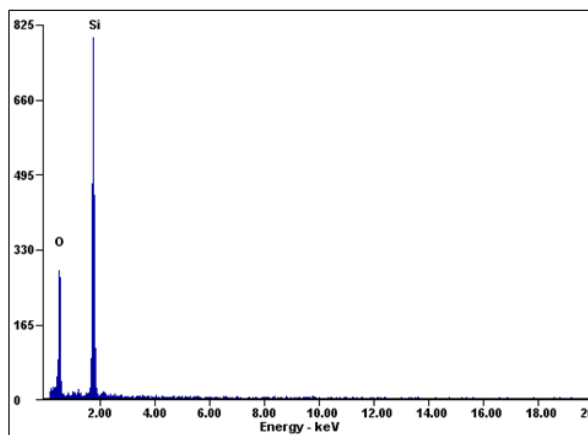


Figura A-6.4 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado negativo)

Debido a algunas observaciones bajo el microscopio algunas características en las muestras de mortero, los microanálisis de lo observado se muestran a continuación:

Muestra 30% (+) 12V a Cero días



Elemento	Wt%	At%
O	50.60	64.26
Si	49.40	35.74

Figura A-6.5 Microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V, análisis puntual

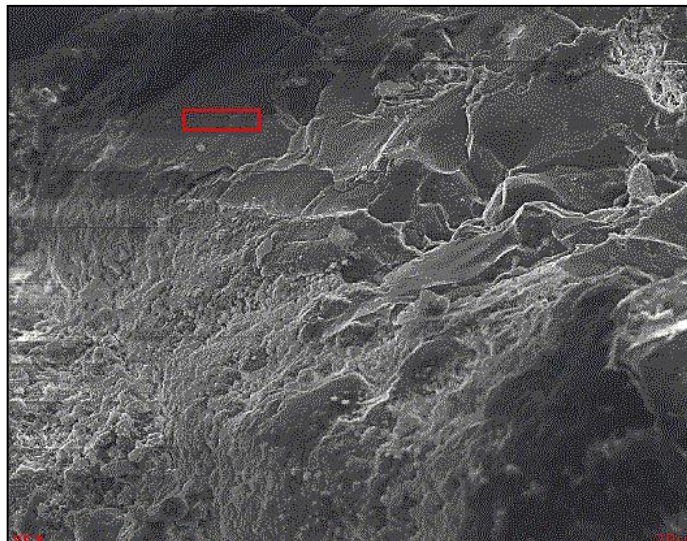
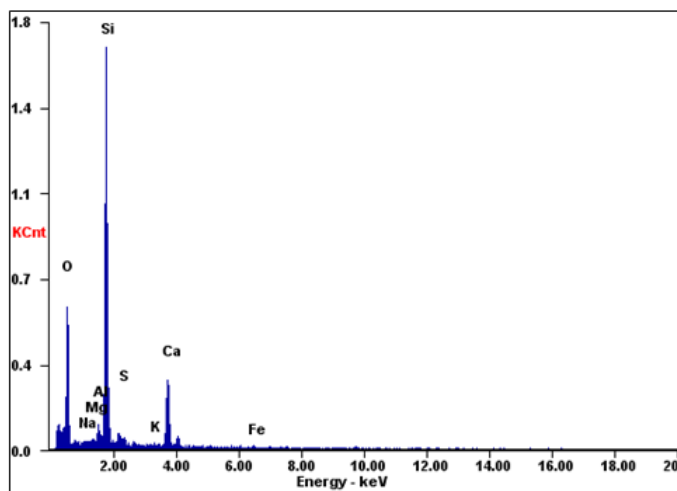


Figura A-6.6 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V

En la imagen anterior, no se observa la interfase pasta- agregado, por lo cual se realizaron más microanálisis a la zona, los cuales se muestran a continuación:



Element	Wt%	At%
O	46.09	61.85
Na	00.37	00.34
Mg	00.34	00.30
Al	01.78	01.41
Si	37.27	28.49
S	01.12	00.75
K	00.54	00.30
Ca	11.58	06.20
Fe	00.93	00.36

Figura A-6.7 *Microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V, análisis de área*

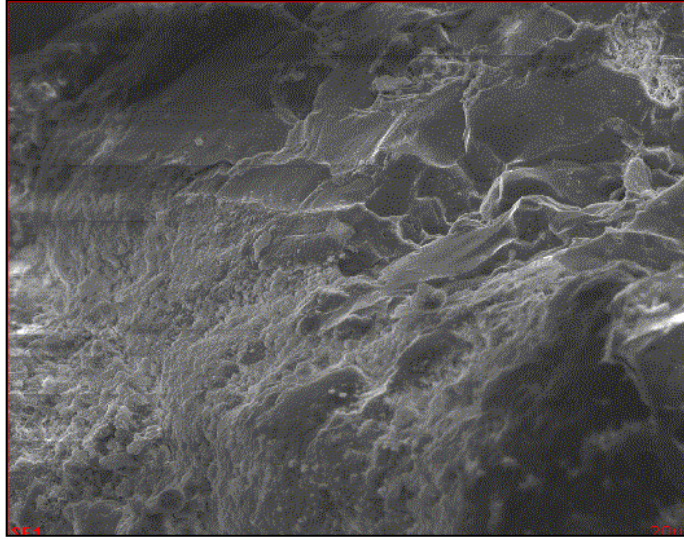


Figura A-6.8 *Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo negativo de la muestra 30%(+)12V*

Muestra 40% (+) 12V a Cero días

Cero días

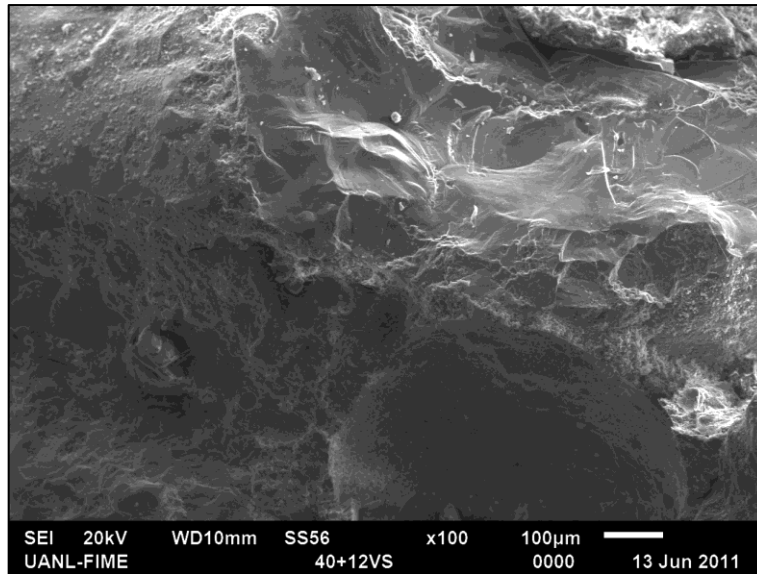


Figura A-6.9 Superficie de fractura a 100X en muestra tratada a 12V (lado positivo)

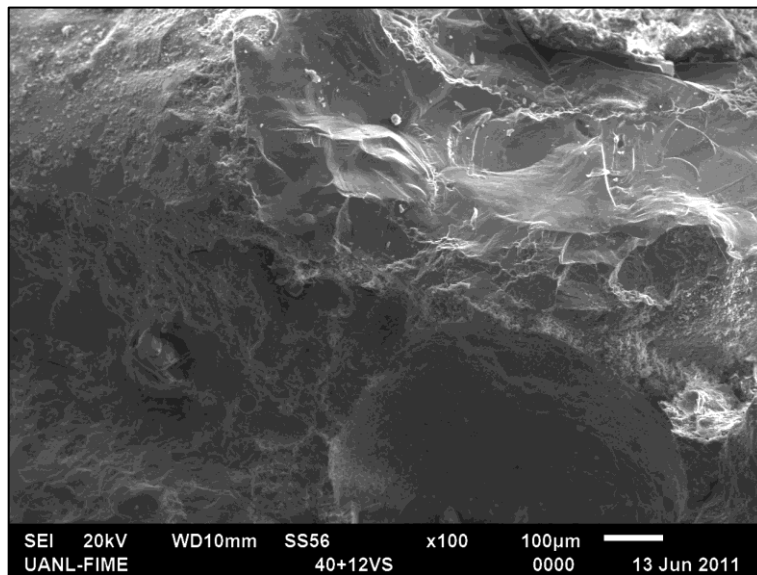


Figura A-6.10 Superficie de fractura a 100X en muestra tratada a 12V (lado positivo)

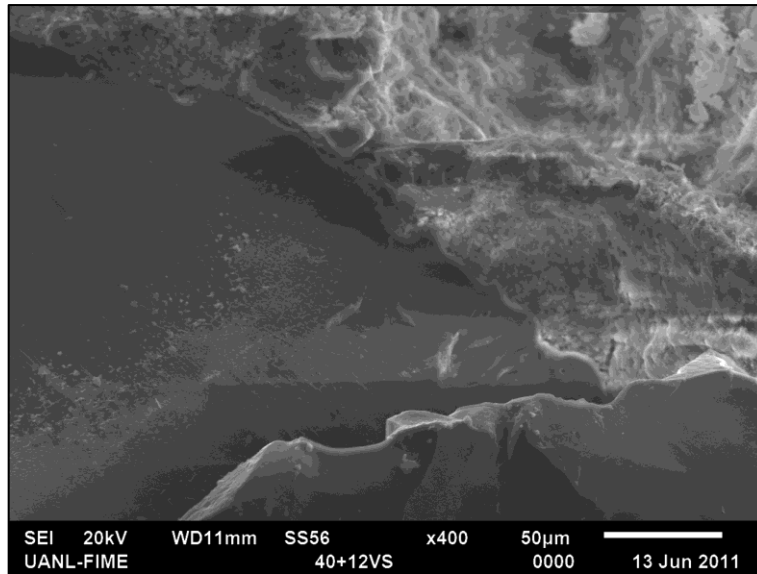


Figura A-6.11 Superficie de fractura a 400X en muestra tratada a 12V (lado positivo)

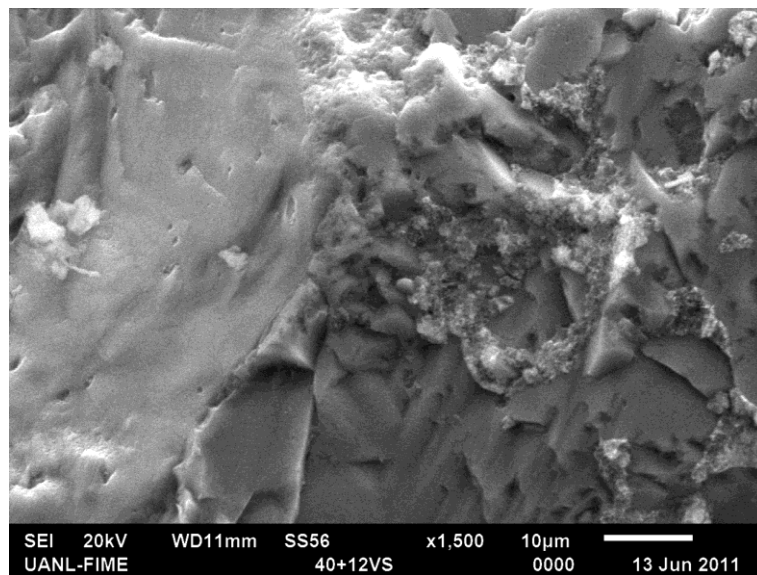
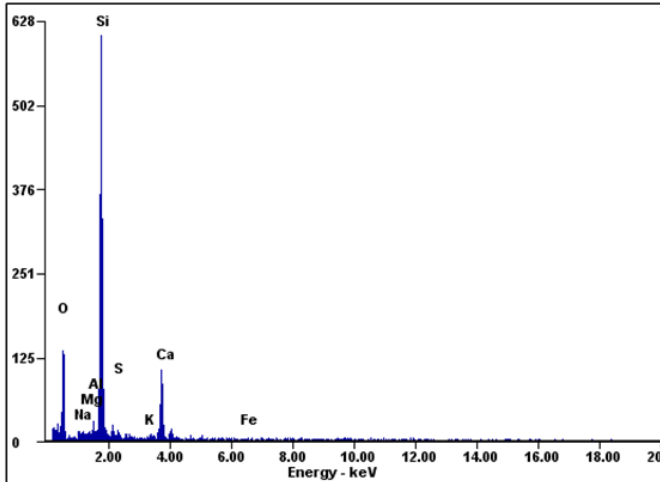


Figura A-6.12 Superficie de fractura a 1500X en muestra tratada a 12V (lado negativo)



Element	Wt%	At%
O	41.01	56.75
Na	00.84	00.81
Mg	00.22	00.20
Al	00.99	00.81
Si	42.24	33.30
S	00.81	00.56
K	00.75	00.43
Ca	12.42	06.86
Fe	00.72	00.28

Figura A-6.13 Microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V, análisis de área

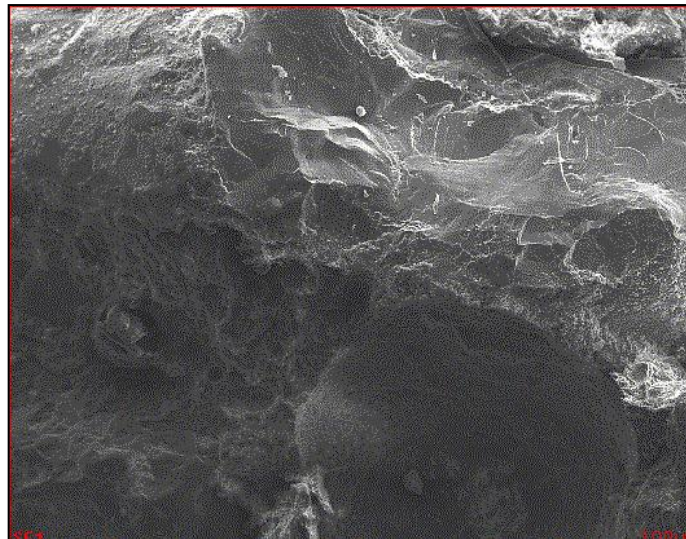
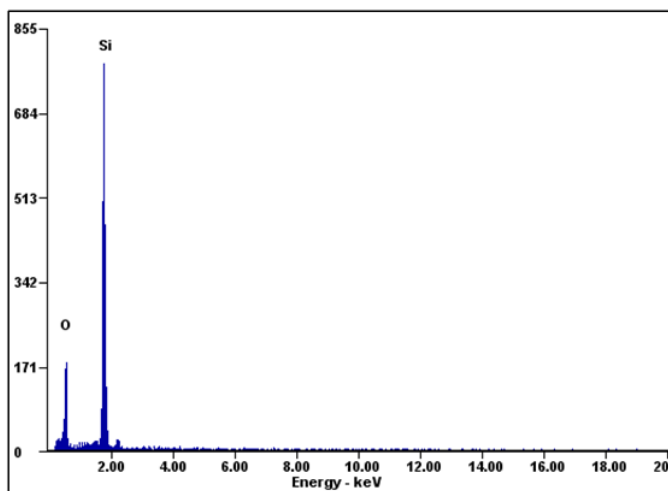


Figura A-6.14 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V

De manera similar que en el caso anterior, se encontró una zona de mayor densidad en comparación con la pasta observada del mortero, y al igual que en la muestra 30%(+) 12V, no se observa la interfase pasta- agregado por lo cual se ha descartado que lo observado sea un agregado silico.



Elemento	Wt%	At%
O	41.51	55.47
Si	58.49	44.53

Figura A-6.15 Microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V, análisis de puntual

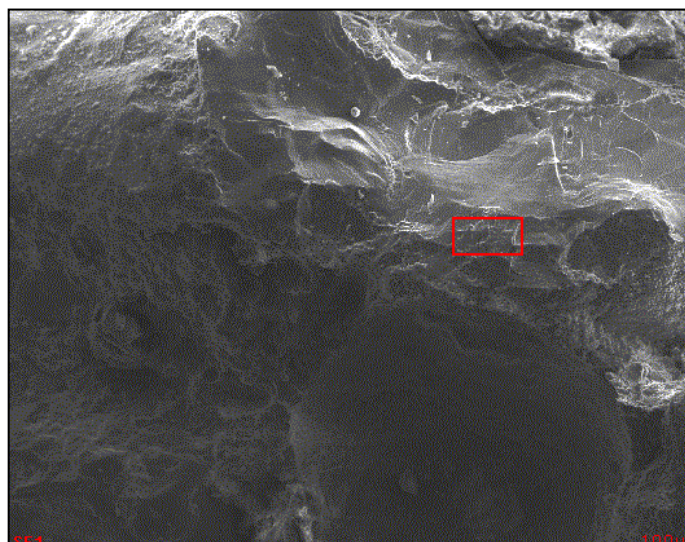


Figura A-6.16 Imagen correspondiente al microanálisis realizado en el polo positivo de la muestra 40%(+)12V

ANEXO A-7

EDX

ANEXO A-7

EDX

Figura A-7.1 EDX de la celda de referencia sin aplicación de campos eléctricos

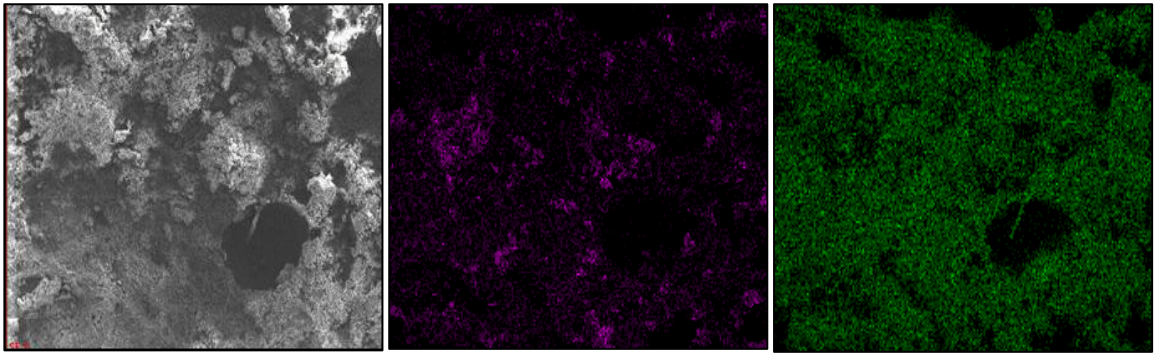
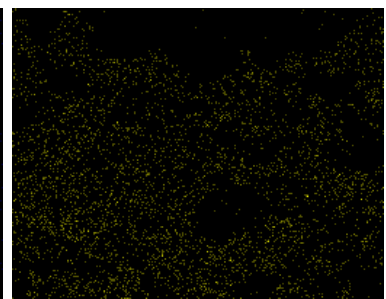
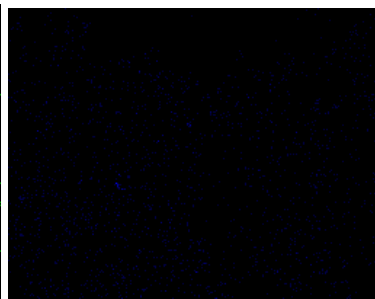
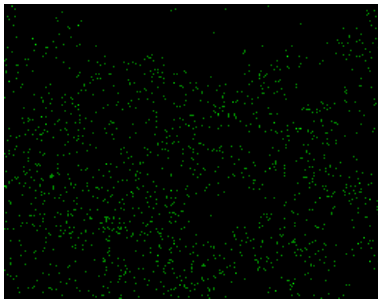


Imagen General

Distribución de Silicio

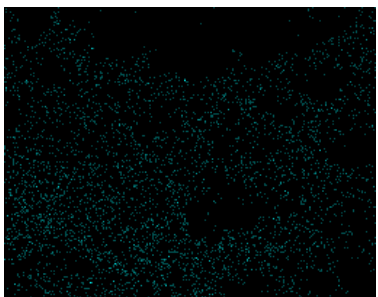
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Fierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Figura A-7.2 EDX de la celda de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12V (RH2O 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

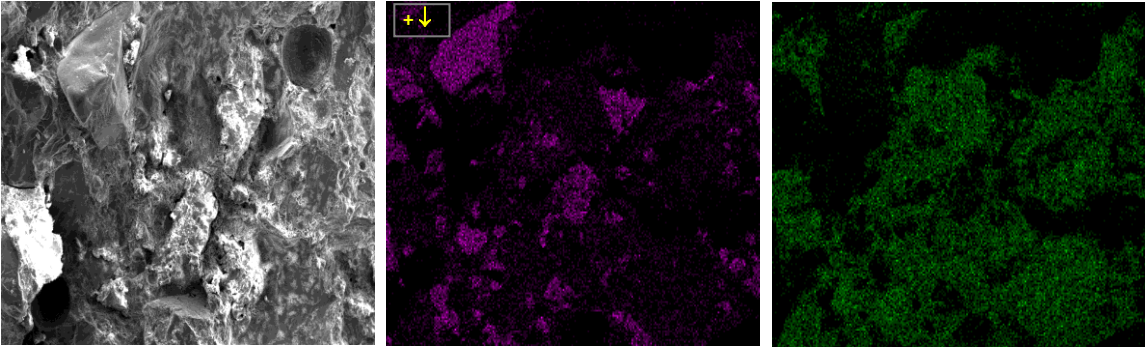
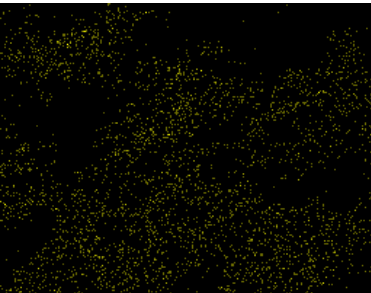
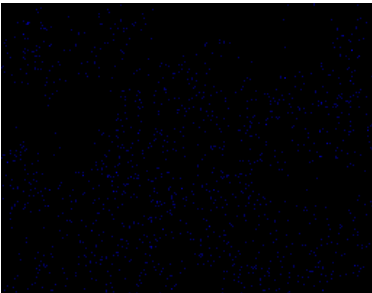
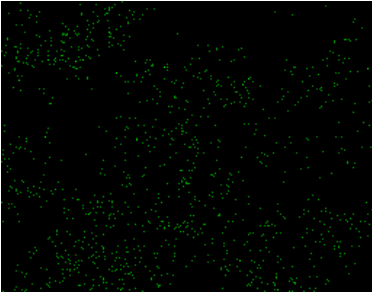


Imagen General

Distribución de Silicio

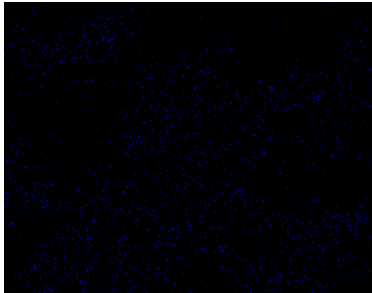
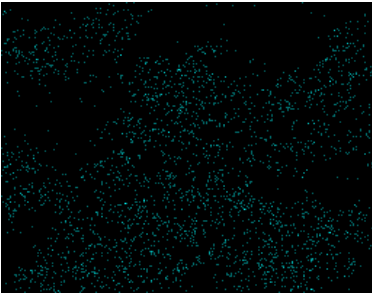
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Fierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Figura A-7.3 EDX de la celda de referencia con aplicación de campos eléctricos de 12V (RH2O 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

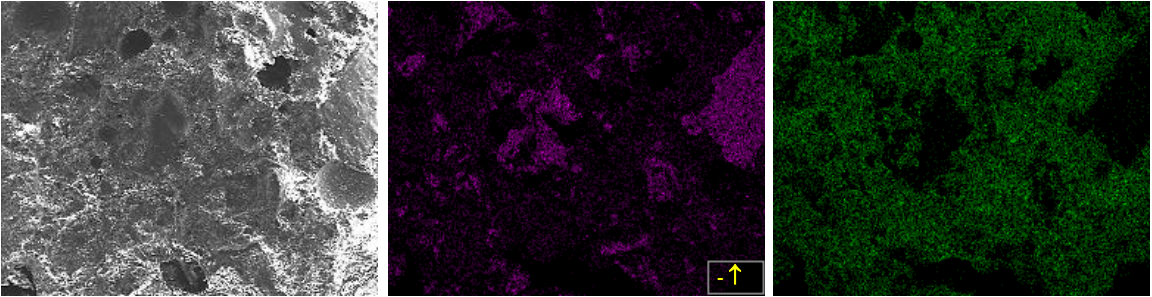
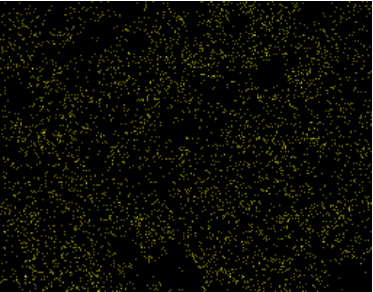
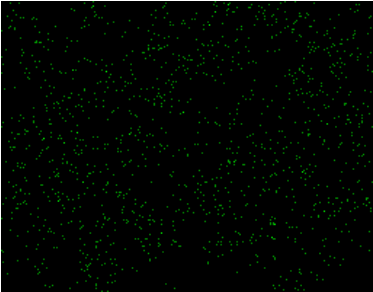


Imagen General

Distribución de Silicio

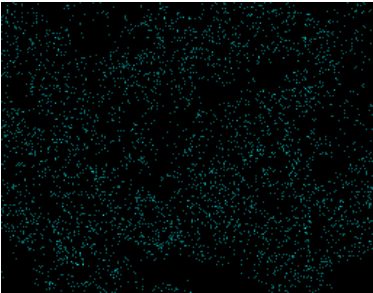
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Hierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Figura A-7.4 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

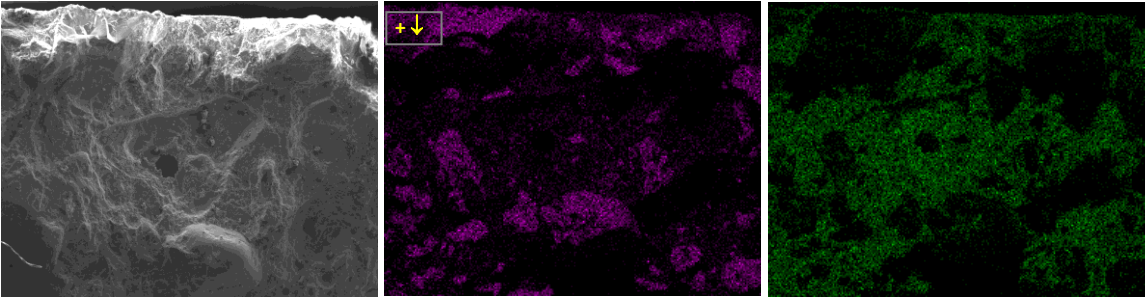
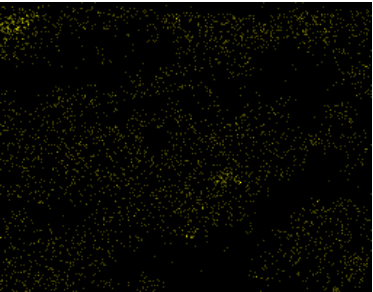
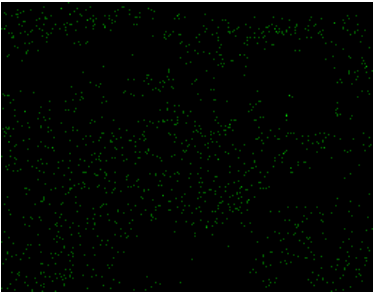


Imagen General

Distribución de Silicio

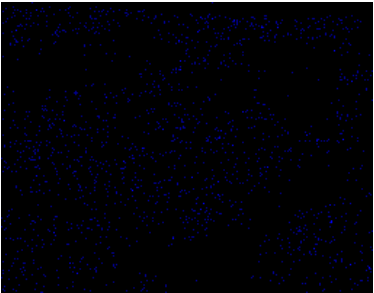
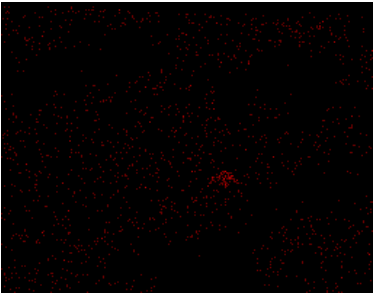
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Fierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Potasio

Distribución de Magnesio

Figura A-7.5 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 30% de concentración (30% (+) 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

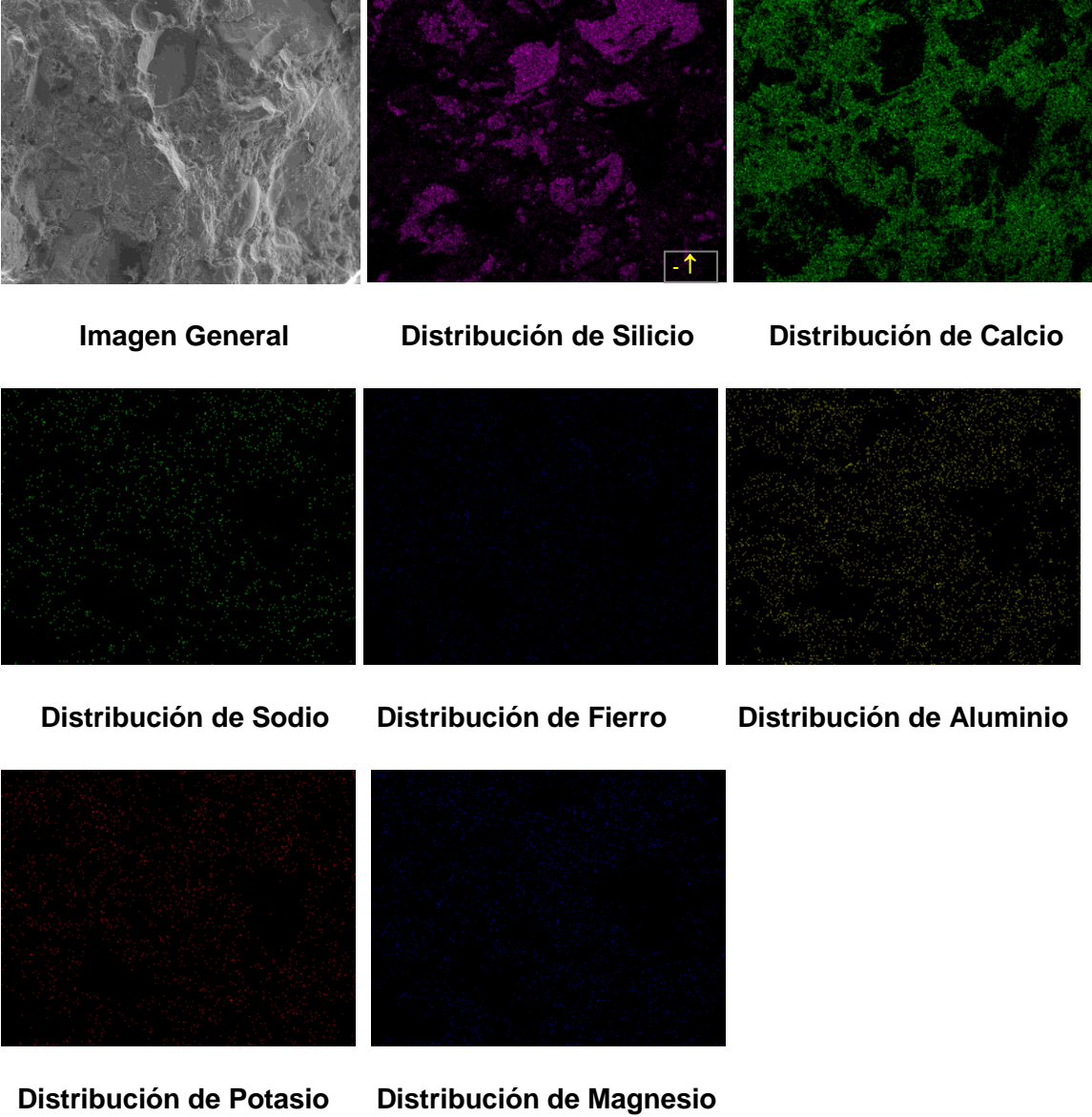


Figura A-7.6 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde positivo, 56 días después de la aplicación del tratamiento)

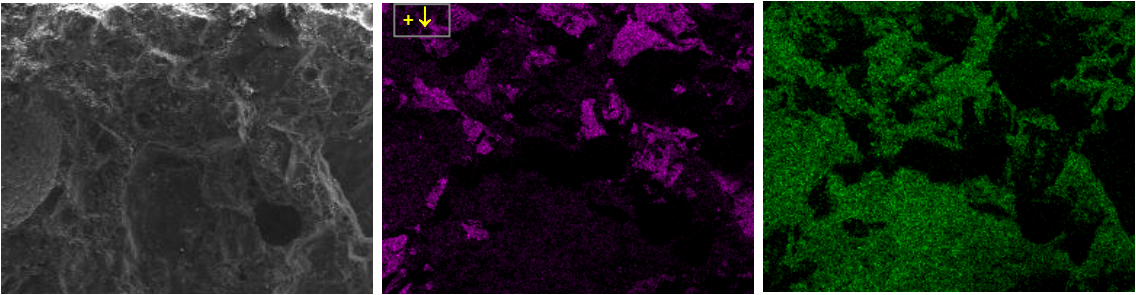
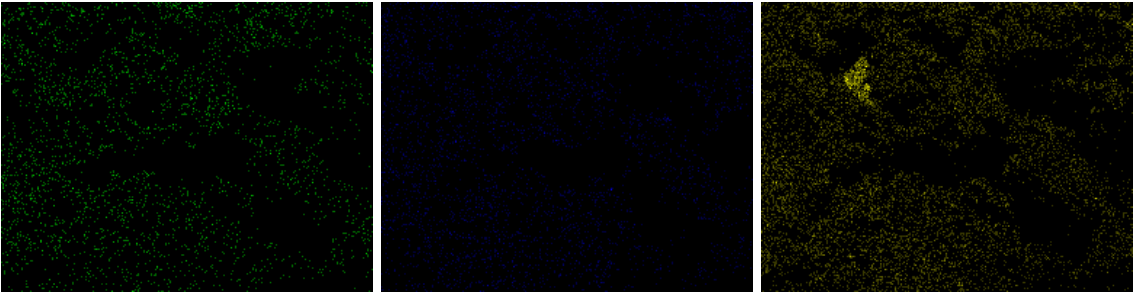


Imagen General

Distribución de Silicio

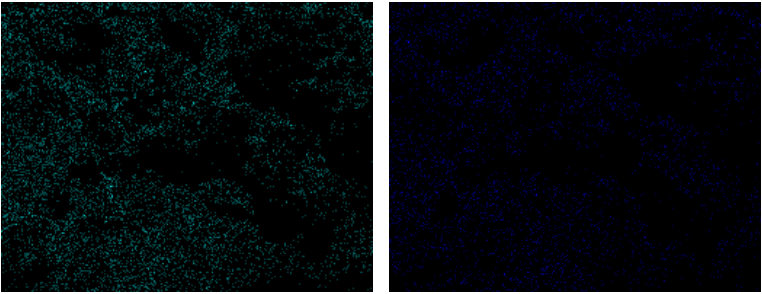
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Hierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Figura A-7.7 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión normal al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde negativo, 56 días después de la aplicación del tratamiento)

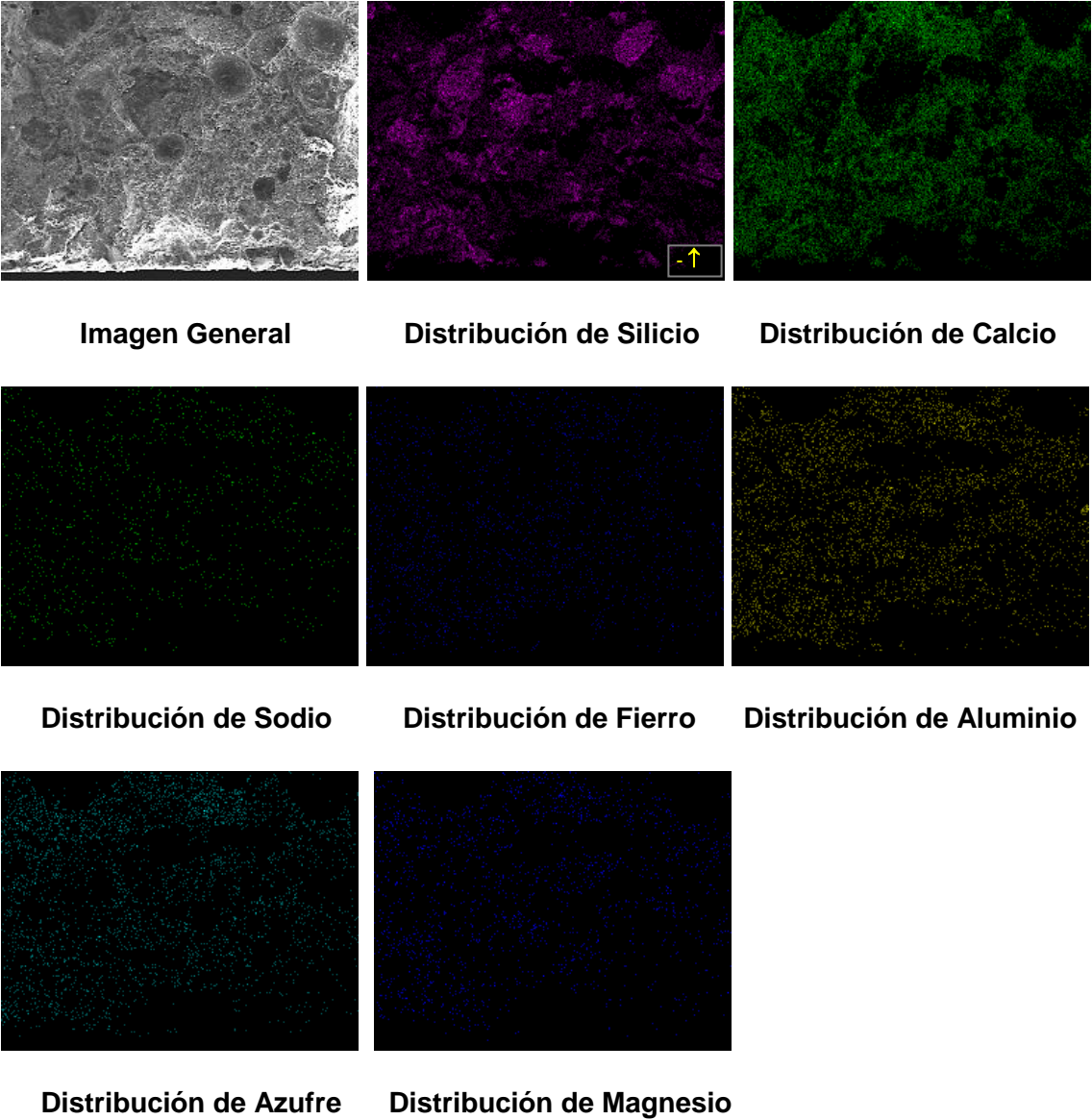


Figura A-7.8 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde positivo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

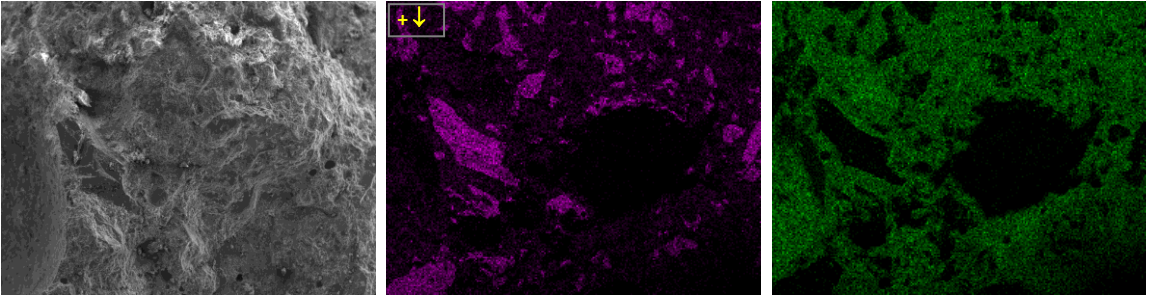
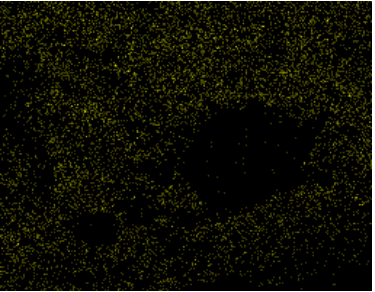
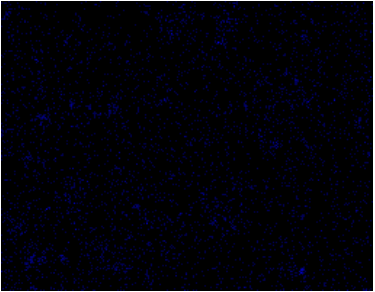
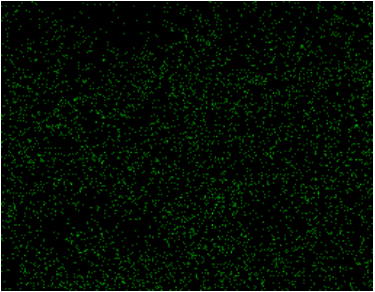


Imagen General

Distribución de Silicio

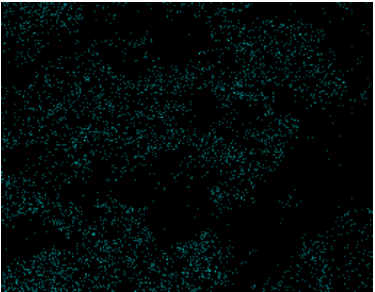
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Hierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Figura A-7.9 EDX de la celda con aplicación de campo eléctrico de 12V en conexión invertida al 40% de concentración (40% (+) 12V) (Borde negativo, 7 días después de la aplicación del tratamiento)

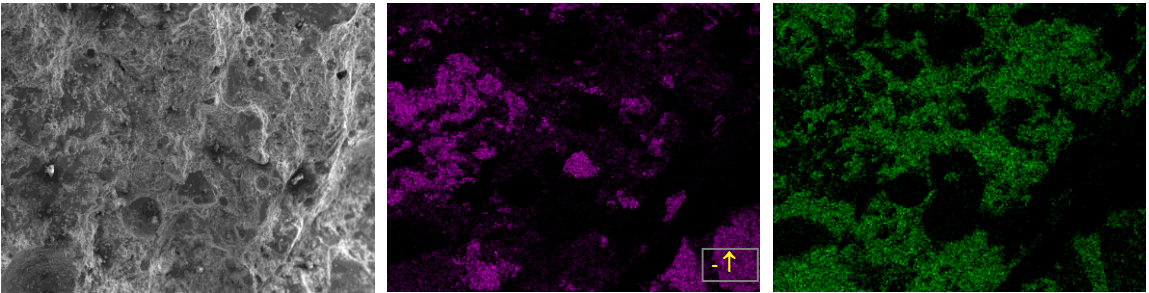
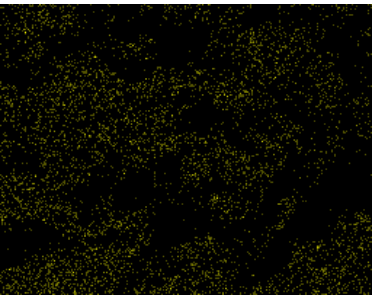
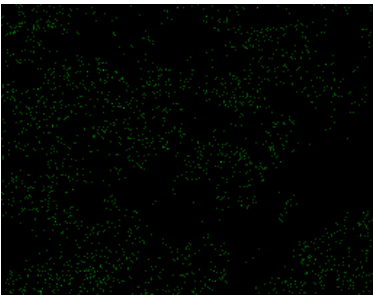


Imagen General

Distribución de Silicio

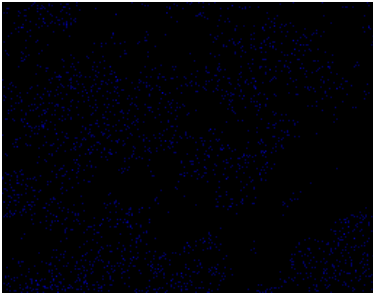
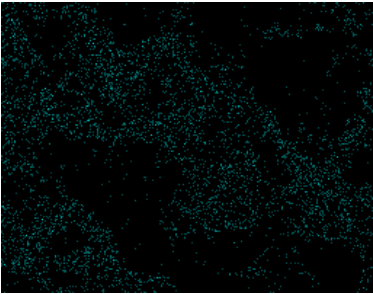
Distribución de Calcio



Distribución de Sodio

Distribución de Fierro

Distribución de Aluminio



Distribución de Azufre

Distribución de Magnesio

Resumen Autobiográfico

CHRISTIAN FERNÁNDEZ GUTIERREZ

Candidata para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Título de Investigación: **TRANSPORTE POR ELECTROMIGRACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICE EN PROBETAS DE MORTERO ENDURECIDO A EDADES TEMPRANAS**

La Ingeniera Civil Christian Fernández Gutiérrez nació el 29 de septiembre de 1986 en la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Hija de Roberto Fernández y Laura Gutiérrez. Cursó sus estudios de licenciatura en el Instituto Tecnológico de Oaxaca y posteriormente en el año 2009 ingresó a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la cual realizó sus estudios de maestría apoyada por una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Además en el año 2011 colaboró como estudiante de intercambio en el Instituto en Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja en el área de durabilidad de estructuras en donde realizó gran parte de la presente investigación.