



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE PULSOS ELECTRO-  
OSMÓTICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE HUMEDAD EN  
ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**Andrés Tenorio Luna**



**MÉXICO, D.F**

**2010**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Juan Genescá Llongueras

**VOCAL:** Profesor: Carlos Rodríguez Rivera

**SECRETARIO:** Profesor: Marco Antonio Talavera Rosales

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Vianey Torres Mendoza

**2° SUPLENTE:** Profesor: José Hernández Espinoza

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**ANEXO FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO D, METALÚRGIA.**

**ASESOR DEL TEMA: JUAN GENESCÁ LLONGUERAS**

(nombre y firma)

**SUSTENTANTE: ANDRÉS TENORIO LUNA**

(nombre y firma)

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios**:

Te doy las gracias porque sé que existes, porque en el mundo y en la vida estas presente Tú. Te doy gracias porque cuanto soy, cuanto puedo y cuanto recibo es regalo tuyo.

Los agradecimientos para este trabajo son, ante todo, para **mi familia**. Gracias por haberme acompañado y enseñado durante cada día de mi vida hasta llegar al día de hoy, sin dejar de ser mi principal apoyo y motivación. Todos y cada uno de ustedes forman parte vital de lo que soy, y sé que sin alguno de ustedes mi vida no sería ni siquiera un poco de lo maravillosa que es.

A mi mamá, **Gabriela Luna Peña**. Gracias por enseñarme que con amor y con perseverancia es posible superarlo todo. Por mostrarme que mi educación fue el mejor regalo que pudieron darme. Gracias por darme la fuerza y el valor necesarios para seguir siempre adelante y por ser siempre mi cómplice ante las adversidades de la vida.

A mi papá, **Guillermo Tenorio Pimentel**. Porque gracias a tu carácter y determinación forjaste mi camino, haciéndome buscar lo mejor sin conformarme nunca con lo más fácil. Gracias por nunca darme la razón y regresarme siempre al camino de la humildad, ser mi motivación y anteponer mis estudios como una prioridad en tu vida.

A mis hermanos. A **Guillermo**, te debo tantas y tantas horas enseñándome sobre lo interesante que puede ser la vida y por enseñarme que sin importar cuánto estudie sobre algo, siempre puedo saber más. A **Adriana**, por todas las aventuras que hemos pasamos juntos, y por haberme enseñado lo noble que es cuidar de un ser que te necesita a través de tu profesión veterinaria. Y a ti, **Gabriel**, por hacerme pasar una infancia inolvidable y por haber sido mi amigo de juegos favorito.

A mi estrella **Alicia**. Gracias por compartir conmigo tu camino por la vida, yendo junto a mí enseñándome tantas cosas nuevas y maravillosas. Gracias por enseñarme a soñar sin estar dormido, solo

junto a ti viendo la vida desde una forma tan distinta. Gracias por lo que aún nos falta por vivir.

A todos mis amigos pasados y presentes; pasados por ayudarme a crecer y madurar como persona y presentes por estar siempre conmigo apoyándome en todo las circunstancias posibles, de manera muy especial a **José Roberto Carreón, Luz Elena Rosales, Héctor Martínez, Rodrigo Hernández, Omar Segovia, Alexis Joffre, Mauricio Plata, Miguel Ramírez y Ángel Monroy**. También son parte de esta alegría.

Agradezco de manera muy personal a **Marco Antonio Talavera Rosales**, por su paciencia y empeño en este trabajo, por guiarme a lo largo de todo este tiempo, por todos sus consejos y por las largas tardes de charla en su cubículo. Sin ti jamás se habría realizado este trabajo.

Al M. en C. **Carlos Rodríguez Rivera**, por todo su apoyo e interés en este trabajo y por todo el tiempo brindado para ayudarme y resolver todas mis dudas, mi más sincero agradecimiento.

Al Dr. **Juán Genescá Llonguera**, por tenerme la confianza de otorgarme este proyecto y por saber que siempre estuvo dispuesto a ayudarme y recibirme de muy buen agrado.

A mis maestros en general, por todas sus enseñanzas y conocimientos impartidos. De manera muy especial al profesor **José Hernández Espinoza**, por adentrarme en el impresionante mundo de la electroquímica y la corrosión. Tus clases marcaron mi camino académico.

“Para las personas creyentes, Dios está al principio. Para los científicos está el final de todas sus reflexiones.”

Max Planck (1858-1947)

A mi mamá

Porque tú me enseñaste a no rendirme nunca y por eso he podido concluir esta etapa de mi vida. Ahora es mi turno para ayudarte a nunca darte por vencida

# ÍNDICE

<b><u>Capítulo 1</u></b>	Antecedentes	1
1.1	Deterioro de las estructuras de concreto	2
1.2	Métodos convencionales para el control de la humedad	9
<b><u>Capítulo 2</u></b>	Bases teóricas	11
2.1	Iones	11
2.2	Iones en disolución	13
2.3	Conducción eléctrica en electrolitos	14
2.4	Conductividad de las disoluciones	16
2.5	Migración	17
2.6	Resistividad eléctrica en concretos	23
2.7	Mediciones de resistividad	24
2.8	Método de Wenner	25
2.9	Electro-ósmosis	28
2.10	Pulsos Electro-osmóticos	33
2.10.1	Consideraciones de diseño	34



2.10.2	Programa de operación	36
2.10.3	Producción de gases	37
<b><u>Capítulo 3</u></b>	Técnica experimental	39
3.1	Especificaciones del concreto	40
3.2	Diseño de probetas	41
3.3	Diseño del sistema de pulsos	44
<b><u>Capítulo 4</u></b>	Resultados y discusión de resultados	48
4.1	Mediciones de resistividad.	48
<b><u>Capítulo 5</u></b>	Conclusiones	60
<b><u>Capítulo 6</u></b>	Referencias	62

## **1 ANTECEDENTES**

El concreto de cemento portland ha emergido claramente como el material de elección para la construcción de un gran número y variedad de estructuras en el mundo de nuestros días ya que es el producto hecho por el hombre de mayor uso en el mundo y genera una industria de 35 mil millones de dólares, una de las más grandes en el mundo (13).

Esto se atribuye principalmente al bajo costo de los materiales y la construcción para estructuras de concreto, así como también al bajo costo del mantenimiento. Por lo tanto, no es sorprendente que muchos avances en la tecnología del concreto hayan ocurrido como resultado de dos fuerzas impulsoras, específicamente la velocidad de construcción y la durabilidad del concreto. Las dos ventajas que el concreto ha tenido sobre el acero son: un menor valor del costo inicial y un menor requerimiento de desarrollo industrial para su producción; lo anterior lo ha hecho especialmente ventajoso en los países de menor desarrollo.

Es un material de construcción muy versátil pues se utiliza para la construcción de cimientos, aceras, cimientos, autopistas y carreteras, viaductos, estructuras de estacionamiento, muros, zapatas para verjas, vallas y postes. Anualmente se producen aproximadamente seis

millones de metros cúbicos de hormigón cada año, lo que equivaldría a un metro cúbico por persona en la Tierra (13).

La composición del concreto tradicional es relativamente simple. Sin embargo, el concreto moderno puede llegar a ser una mezcla complicada, asegurando su durabilidad y longevidad. En su forma más común, el concreto consiste de cemento, agua y agregados, los cuales se dividen en finos y gruesos según su granulometría. Entre los agregados más ampliamente usados se encuentran la arena, grava y piedra triturada.

## **1.1 Deterioro de las estructuras de concreto**

Durante muchos años se pensó que las construcciones hechas con concreto tendrían una vida ilimitada, y los diseñadores y constructores estuvieron principalmente interesados en las características asociadas con la resistencia mecánica del material. A partir de la década de los 80 se empezó a analizar con seriedad el hecho de que muchas construcciones no estuvieran manteniendo la seguridad y utilidad requeridas durante un tiempo suficientemente largo. Actualmente se puede considerar que el problema de las construcciones de concreto que más preocupa es la falta de durabilidad de las estructuras por cargas ambientales.

En el sureste de México, las viviendas que se diseñan y construyen de manera industrial están hechas casi en su totalidad de concreto, ya sea fabricando y moldeando el material en la obra (para losas, muros, castillos, cadenas, cerramientos, pisos, etc.), o bien utilizando productos industrializados (como bloques para muros, viguetas y bovedillas para losas, etc.), o incluso elementos prefabricados (como paneles, losas, etc).

La norma ACI 201 define la durabilidad del concreto como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo. El material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico.

Analizando el costo de una construcción durante todo su ciclo de vida, estructuras cuyo diseño no consideran adecuadamente las características de durabilidad de los materiales, tendrán cada vez mayores costos de reparación y sustitución de partes dañadas del

material, lo que a la postre convertirán estos costos en una parte importante del costo total de la construcción. Se ha calculado que más del 40% de los recursos totales de la industria de la construcción en países desarrollados se aplican a la reparación y mantenimiento de estructuras existentes (20).

En países con recursos económicos insuficientes, como México, la dificultad para sustituir la infraestructura, cuando se alcanza el final de su vida de servicio, provoca en muchos casos la subutilización de las construcciones en condiciones inseguras; así como un costo excesivo de reparaciones correctivas periódicas al quedar descartada la opción de demoler y construir de nueva cuenta.

Los principales efectos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto pueden clasificarse como agentes físicos o químicos. Entre los primeros, los más importantes son: el desgaste de la superficie ocasionada por abrasión o erosión (asociada al exceso de tránsito o a cualquier otro tipo de fricción); el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de sales contenidas en los poros del material (asociadas con el contacto con soluciones salinas, en cimientos o muros, por ejemplo); y la exposición a temperaturas extremas, como son las heladas o el fuego (20).

El segundo tipo de factores ocasionan reacciones químicas entre los agentes agresivos presentes en el ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento, o incluso entre los mismos constituyentes del concreto. Entre los daños químicos más importantes están los provocados por: hidrólisis o disolución del hidróxido de calcio de la pasta de cemento (ocasionado por el contacto de aguas puras o suaves con contenido escaso o nulo del ión de calcio); diversas reacciones que producen la formación de productos expansivos como son: la reacción entre los álcalis contenidos en la pasta de cemento y ciertos materiales reactivos presentes en los agregados (en el caso en que éstos no cumplen con su condición de inertes); el ataque al concreto por sulfatos contenidos en el agua o el suelo, o por ácidos que son generados por diferentes actividades humanas (industriales, agrícolas, etc.); la presencia de cantidades importantes de MgO y CaO en el cemento que provocan un efecto expansivo al hidratarse; y la corrosión de metales embebidos en el concreto tales como ductos, tubos y, principalmente, acero de refuerzo.

Este último factor es el que con mayor frecuencia provoca daños en las edificaciones de concreto, y entre ellas, especialmente a las viviendas. En este caso la durabilidad del concreto reforzado depende de las características del concreto y del acero, pero principalmente de la

interrelación entre ellos. En condiciones normales, el concreto que envuelve al acero de refuerzo, conocido como **recubrimiento**, le confiere una buena protección, tanto física como química, a dicho refuerzo. El recubrimiento proporciona un ambiente alcalino que rodea al acero propiciando la formación de una capa de óxido, llamada **película pasivante**, que lo protege contra la corrosión.

Sin embargo, el recubrimiento no constituye una barrera perfecta y permanente contra los agentes agresivos del ambiente iniciadores de la corrosión (iones agresivos, humedad, dióxido de carbono y oxígeno, principalmente); lo anterior se debe a que la pasta de cemento es un material poroso que está constituido por dos fases: una sólida de minerales hidratados y una líquida contenida en el interior de los poros que se denomina la **solución de poro**. En promedio, la porosidad total del concreto es de alrededor de 20% del volumen del material y depende, principalmente, de la relación agua/cemento, de la compactación y del curado (factores típicos que influyen en las principales propiedades físicas del material). El tamaño y la interconexión de los poros y de las grietas (que es otra respuesta natural del material) determinan la tasa de ingreso de los mencionados agentes.

La corrosión del acero de refuerzo ocurre, principalmente, por la destrucción de la película pasivante formada de manera natural en el

acero. Esto ocurre por dos causas principales: que haya una cantidad suficiente de cloruros u otros iones despasivantes, o que disminuya la alcalinidad del concreto al reaccionar con sustancias del medio ambiente.

La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico (reacción química con transferencia de electrones y iones) en el que se forman celdas de corrosión en la superficie del acero, debido a las diferencias en las concentraciones de iones disueltos.

La transformación del hierro metálico corroído es acompañada de un incremento en el volumen, que dependiendo de su estado de oxidación, puede ser tan grande como 600% del metal original. Este incremento de volumen es la causa principal de la expansión y del agrietamiento del concreto que suelen observarse en las construcciones de la costa; más que cualquier otra que pudiera relacionarse con la resistencia del material ante la acción de las demás cargas (no ambientales).

Las construcciones subterráneas de concreto, tales como sótanos, túneles y estacionamientos subterráneos, pueden presentar daños estructurales graves debido a la filtración crónica de agua a través de los pisos y las paredes, ya que el agua causa agrietamiento en las paredes de concreto, erosiona el mortero y corroe el acero de la estructura<sup>(1)</sup>. Más aún, el agua filtrada incrementa la humedad relativa



del entorno y esto a su vez puede incrementar la velocidad de corrosión y arruinar equipos eléctricos y mecánicos de alto costo que, por lo general, se encuentra en los sótanos. La intrusión de agua en las estructuras también puede presentarse en losas para pisos comerciales y de vivienda en donde el nivel freático subterráneo sea muy alto como para colocar una zona de ventilación o un sótano <sup>(6)</sup>.

Más allá de mantener la humedad alejada de los componentes eléctricos y mecánicos en las estructuras de concreto, otro factor a considerar relacionado a la filtración de agua es el control de la humedad relativa dentro de las instalaciones. La filtración de humedad a través del concreto puede resultar en niveles de humedad relativa hasta del 95% en torres de control, túneles de cruce, bóvedas y sótanos de almacenamiento. Estos niveles de humedad relativa tan altos pueden llevar a los sistemas dentro de las instalaciones a que se corroan muy rápidamente.

Además de los daños materiales que esto ocasiona, la alta humedad relativa crea condiciones inaceptables en la calidad del aire por el crecimiento de bacterias y moho.

Se sabe que las condiciones de alta humedad en un área de trabajo o del hogar promueven el crecimiento de mohos y bacterias, los cuales tienen un efecto adverso en la salud humana y en la productividad

laboral. Al proliferar los microorganismos decrece la calidad del aire e incrementan los problemas de salud. Esto puede hacer que las áreas afectadas se conviertan en lugares inhabitables por la baja calidad del aire <sup>(3)</sup>. Por lo anterior, para mejorar la calidad del aire es necesario reducir la humedad relativa y bajar los niveles de humedad en las superficies en donde se desarrollan los microorganismos <sup>(4)</sup>.

## **1.2 Métodos convencionales para el control de humedad**

Los métodos tradicionales para disminuir las condiciones de humedad elevada dentro de estructuras existentes incluyen excavación, uso de recubrimientos, canales de desagüe, y la instalación de tubos de avenamiento<sup>1</sup>. Estos métodos son caros y por lo general son poco efectivos disminuyendo los niveles de humedad dentro de estructuras subterráneas como en huecos de ascensores, túneles de servicio, cuartos eléctricos y mecánicos o sótanos de almacenamiento.

Otras medidas convencionales para el control de la humedad en estructuras subterráneas de concreto consisten en desviar o bloquear la intrusión de agua de los componentes eléctricos y mecánicos críticos

---

<sup>1</sup> Tubería o conjunto de tuberías que se entierran a cierta profundidad y que se emplean para dispersar el afluente en un terreno o para drenar un suelo saturado de agua.

que están sujetos a la degradación por corrosión. La más usada de estas medidas estriba en la inyección de sellantes epóxicos en las grietas donde se filtra el agua, sin embargo, los materiales epóxicos comunes tienden a fallar al paso del tiempo, algunos incluso dentro de los primeros 3 años de su colocación por la contracción del material inyectado o por desprendimiento del recubrimiento (debido a la migración de humedad a través de la membrana o recubrimiento impermeabilizante). Como consecuencia, el corto periodo de vida del producto hace que el uso de epóxicos sea una práctica de alto mantenimiento. Además, los materiales epóxicos pueden ser costosos, sobre todo si para su aplicación es necesario escavar o adaptar de algún modo la estructura. El costo por pie lineal puede oscilar entre los 300 y 900 dólares (10).

Incluso si fuera adecuado reparar la intrusión de agua en grietas por medio de materiales epóxicos, hay otras situaciones incontrolables que pueden llevar a la filtración de agua hacia zonas críticas. El cambio de volumen causado por gradientes térmicos, obstrucción de tubos y desagües, fallas en la bomba de desagüe, todos estos factores pueden llevar a tener niveles de humedad inaceptables en componentes eléctricos y mecánicos.

## **2 BASES TEÓRICAS**

### **2.1 Iones**

Los iones son componentes esenciales de la materia tanto inerte como viva. Son partículas con carga eléctrica neta que participan en un buen número de fenómenos químicos. A la temperatura ambiente, los iones de signo opuesto se unen entre sí fuertemente siguiendo un esquema regular y ordenado que se manifiesta bajo la forma de un cristal. En disolución, son la base de procesos como la electrólisis y el fundamento de aplicaciones como las pilas y los acumuladores.

Aun cuando la materia se presenta la mayor parte de las veces carente de propiedades eléctricas, son éstas las responsables, en gran medida, de su constitución y estructura. Un grano de sal, una gota de limón o un trozo de mármol contienen millones de átomos o conjuntos de átomos que han perdido su neutralidad eléctrica característica y se han convertido en iones.

Las fuerzas eléctricas entre iones de signo opuesto son las responsables del aspecto sólido y consistente que ofrece un cristal de cloruro de sodio. La composición iónica de una gota de limón hace de ella un conductor de la corriente eléctrica, siendo los iones presentes en la disolución los portadores de carga y energía eléctricas. Los procesos químicos en los cuales las sustancias reaccionantes ceden o captan

electrones implican la formación de iones o su neutralización. El enlace iónico, la electrólisis y los procesos de oxidación-reducción son algunos de los fenómenos naturales en los que los iones desempeñan el papel principal.

Un ión es un átomo o grupo de átomos cargado eléctricamente. Un ión positivo es un catión y un ión negativo es un anión.

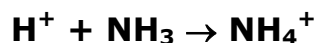
La formación de los iones a partir de los átomos es, en esencia, un proceso de pérdida o ganancia de electrones. Así, cuando un átomo como el de sodio (Na) pierde un electrón ( $e^-$ ) se convierte ( $\rightarrow$ ) en el catión  $Na^+$ :



Si un átomo de oxígeno gana dos electrones se convierte en el anión  $O^{2-}$ .



Cuando un ión sencillo se une con moléculas neutras o con otro ión de signo opuesto que no compensa totalmente su carga, se forma un ión complejo. Tal es el caso del ión amonio  $NH_4^+$  producido por la unión del ión hidrógeno con la molécula de amoníaco  $NH_3$ .



*o del ión hidronio* formado por la unión del ión hidrógeno con la molécula de agua  $H_2O$ :



Aun cuando los iones proceden de los átomos son, desde un punto de vista químico, muy diferentes de ellos. Así, la sustancia sodio metálico, compuesta por átomos de sodio Na, reacciona enérgicamente con el agua, mientras que el ión sodio  $\text{Na}^+$  no lo hace. Debido a las diferencias existentes en su configuración electrónica, átomos e iones suelen presentar diferencias notables en su capacidad para reaccionar químicamente con otras sustancias.

## 2.2 Iones en disolución.

Michel Faraday (1791-1867), discípulo de Humphry Davy, extendió los estudios de su maestro sobre la separación de sustancias fundidas a sus elementos constituyentes por medio de corriente eléctrica a disoluciones e introdujo, por primera vez, el nombre de *electrólisis* a la separación o ruptura de sustancias compuestas mediante la corriente eléctrica.

La observación de que las disoluciones salinas eran capaces de conducir la corriente eléctrica llevó a Faraday a considerar que deberían existir en tales disoluciones partículas cargadas cuyo movimiento entre los dos conductores extremos o *electrodos*, colocados dentro de la disolución, constituiría la corriente eléctrica. A tales partículas cargadas las llamó *iones*, que en griego significa *viajero*. El electrodo positivo recibió el nombre de *ánodo*; hacia él viajarían los iones negativos a los

que llamó **aniones**. Por su parte, el electrodo negativo o **cátodo** atraería a los iones positivos, que por dirigirse al cátodo los denominó **cationes**.

Los sólidos iónicos presentan una estructura característica en forma de red o retícula que puede quedar deshecha bajo la acción de algunos líquidos o disolventes polares como el agua. La desaparición de las uniones rígidas entre los iones que formaban la red cristalina confiere a aquéllos en disolución la suficiente movilidad como para poder contribuir al transporte de carga típico de la corriente eléctrica. Esta es una propiedad característica de los sólidos iónicos, la de ser buenos conductores en disolución.

Cuando un sólido iónico es disuelto en agua, sus iones componentes pueden moverse bajo la influencia de fuerzas eléctricas. Si éstas son de signo opuesto será posible entonces separar los aniones de los cationes presentes en la disolución. Esta separación de sustancias por medio de la electricidad es lo que se conoce como **electrólisis**.

### **2.3 Conducción eléctrica en electrolitos**

Debido a su naturaleza de conducción y a sus valores de conductividad, los materiales pueden clasificarse como aislantes, semiconductores o conductores. El atributo especial de los conductores es que poseen cargas eléctricas libres y el movimiento de estas cargas libres del

material al ser aplicado un campo eléctrico se manifiesta como corriente eléctrica.

De acuerdo a la nomenclatura presentada por Faraday, se pueden distinguir dos tipos básicos de conductores denominados conductores de primera y segunda clase. Conforme a los conceptos contemporáneos, los conductores de primera clase transportan la corriente eléctrica por medio de electrones, mientras que los de segunda clase transportan la corriente eléctrica por medio de iones.

La conducción de la corriente eléctrica en conductores puede ser electrónica o iónica, dependiendo del tipo de carga involucrada. Existen sustancias en donde la conducción es mixta, es decir, en donde se mueven tanto electrones como iones. La conducción electrónica puede encontrarse en todos los metales y en otras ciertas sustancias como el grafito, algunos óxidos metálicos y otros compuestos inorgánicos como el carburo de tungsteno y también sustancias orgánicas.

Los conductores iónicos (de segundo tipo) también son llamados electrolitos. Este término no solo es usado para referirse a un conductor iónico, también son llamadas así las sustancias que normalmente no son conductoras pero que al ser disueltas en agua u otro solvente producen conducción iónica.

Las soluciones acuosas de ácidos, bases y sales son los conductores iónicos usados más ampliamente y los más estudiados. La importancia



de otro tipo de conductores iónicos ha incrementado en tiempos recientes, pero las soluciones acuosas siguen siendo predominantes.

Su importancia va más allá del campo de la electroquímica como tal. Las soluciones electrolíticas pueden encontrarse en prácticamente todos los rubros de las actividades humanas. Son de una importancia enorme como fluidos intracelulares en los procesos biológicos y fisiológicos de todos los seres vivos. Son de igual importancia como aguas naturales en los océanos, ríos y aguas subterráneas en los procesos geomorfológicos.

## **2.4 Conductividad de las disoluciones**

La conductividad es un parámetro muy importante para cualquier material conductor. Está íntimamente relacionado a otras propiedades físicas del conductor, como la conductividad térmica para el caso de los metales y a la viscosidad, en el caso de las disoluciones líquidas. La fuerza de la corriente eléctrica ***I*** en conductores se mide en amperes (A) y depende de la intensidad del campo eléctrico ***E*** en el conductor (N/C) y de la sección transversal ***S*** (m<sup>2</sup>) perpendicular a la dirección del flujo de corriente.

$$I = \sigma SE$$

Por ser dependiente de las dimensiones del conductor, es conveniente usar un parámetro que sea independiente de las dimensiones de este, por lo que se emplea la densidad de corriente ***i*** que es la corriente que

pasa por unidad de área transversal del conductor ( $i=I/S$ ) por lo que sus unidades son  $A/cm^2$ .

La densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico:

$$i = \sigma E$$

El factor de proporcionalidad  $\sigma$  es la conductividad eléctrica cuyas unidades son: Siemens/m y caracteriza cuantitativamente la habilidad de un material para transportar la carga eléctrica y para cualquier material depende de la temperatura mas no del tamaño o geometría de la muestra. Un valor grande de  $\sigma$  indica que el material es un buen conductor de la corriente eléctrica. La conductividad es una propiedad de todo el material, no de alguna parte de él.

Es más común encontrar materiales caracterizados por su resistividad, que es el inverso de la conductividad:  $\rho \equiv 1/\sigma$ , cuyas unidades son ( $\Omega \cdot cm$ ) y numéricamente es la resistencia que ofrece una muestra conductora de 1 cm de largo y  $1 cm^2$  de sección transversal.

## 2.5 Migración

Antes de disolverse, las moléculas poseen una carga eléctrica igual a cero. Por tanto, un sistema líquido homogéneo también posee una carga neta igual a cero, aun conteniendo especies cargadas. En disolución, el número de cargas elementales positivas igualan al número de cargas negativas de los aniones. Si el sistema contiene  $j$  iones distintos con

molalidad  $m_j$  (también pueden emplearse la concentración  $c_j$  o la fracción molar  $x_j$ ) y cada uno con carga elemental  $z_j$ , entonces la ecuación

$$\sum_{i=1}^s z_i m_i = 0$$

Llamada ecuación de electroneutralidad es válida a una escala macroscópica para cada parte homogénea de sistema mas no para la frontera entre dos fases.

En soluciones electrolíticas, la corriente eléctrica es el movimiento direccionado de iones bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado. Los iones en solución se encuentran en un estado de movimiento cinético molecular continuo. Este movimiento es caótico en ausencia de un campo eléctrico, es decir, los iones no se mueven en ninguna dirección preferente por lo que no hay un flujo de corriente.

El patrón general del movimiento iónico es muy similar al de las moléculas de gas, pues el movimiento de los iones en disolución presentan un movimiento aleatorio en el que todas las direcciones son igual de probables. El análisis de este movimiento aleatorio muestra que el desplazamiento promedio de los iones es cero, siendo la difusión el resultado de la tendencia estadística en el movimiento de los iones,

debido a que en las diferentes regiones del electrolito existen distintas concentraciones de sus iones.

Sin embargo, al situar a los electrones en un campo eléctrico su movimiento se ve afectado por tratarse de partículas con carga. Por lo tanto, la aplicación de un campo eléctrico marca una dirección en el espacio que es preferente para el movimiento de los iones y que es paralela al campo eléctrico. Las partículas cargadas positivamente preferirán moverse hacia el electrodo negativo mientras que las partículas con carga negativa se moverán en dirección contraria. Con esto el movimiento deja de ser aleatorio y los iones migran.

Considerando a un solo ión del electrolito podemos decir que el campo eléctrico le confiere a éste una aceleración de acuerdo a la segunda ley de Newton. Si el ión está aislado acelerará de manera indefinida hasta chocar con el electrodo. Sin embargo, en una disolución electrolítica el ión colisionará con otros iones o moléculas de disolvente a su paso, lo que producirá una discontinuidad en su velocidad y dirección, por lo que el medio ofrece resistencia a su movimiento. Esto ocasiona que el ión se detenga y comience un zigzagueo aleatorio. Sin embargo, el campo eléctrico le proporciona al ión la dirección hacia el electrodo de carga opuesta, por lo que este recorrerá el camino, aunque un poco errático,

en la dirección de este electrodo. El ión migra en una dirección preferencial.

La migración se impone al movimiento térmico de los iones. La densidad de flujo  $J_j$  de iones, es decir, el número de moles de iones que atraviesan una sección transversal de área  $S^0$  perpendicular a la dirección de flujo, depende de la concentración  $c_j$  y de la velocidad lineal  $v_j$ . Por cada unidad de tiempo la sección transversal  $S^0$  será atravesada por los iones que se encuentran contenidos en un volumen igual a  $v_j$ . Por tanto:

$$J_j = c_j v_j$$

En estado estacionario, el flux total es constante en toda la trayectoria. Esta condición de continuidad de flujo es resultado del balance de masa. En un flujo estacionario no hay ni acumulación ni consumo, es decir, la concentración es invariante en el tiempo.

Al momento de aplicar un campo eléctrico de intensidad  $\mathbf{E}$ , cada tipo de ión  $\mathbf{j}$  con carga  $z_j \mathbf{F}$  (por mol) se encuentra bajo el efecto de una fuerza motriz eléctrica  $\mathbf{f}_{dr} = z_j \mathbf{F} \mathbf{E}$  que ocasiona que los iones se muevan en la dirección dada por el campo. A este movimiento derivado del efecto de un campo eléctrico se le llama migración iónica.

La velocidad promedio de migración  $v_j$  depende de la fuerza motriz externa  $f_{dr} = z_jFE$  y de la resistencia al movimiento aportado por la viscosidad del medio. Esta fuerza retardante es proporcional a la velocidad. Bajo la influencia de la fuerza externa, la velocidad incrementará hasta alcanzar el valor  $v_j$  que es donde la fuerza retardante  $v\theta$  (donde  $\theta$  es el coeficiente de arrastre) se iguala a la fuerza motriz externa. Por tanto:

$$v_j = \frac{1}{\theta} f_{dr} = \frac{1}{\theta} z_jFE$$

Y:

$$J_j = c_j v_j = c_j \frac{1}{\theta} f_{dr} = c_j \frac{1}{\theta} z_jFE$$

Un ejemplo de migración es la electrólisis de una disolución salina.

Aunque el agua pura no conduzca muy bien la electricidad (con una conductividad de  $4.4 \times 10^{-4}$  ohm-cm a 20°C) una disolución de sal es un buen conductor. Durante la electrólisis las reacciones químicas toman lugar en las interfaces electrodo-electrolito.

El fenómeno que transcurre cuando una corriente eléctrica atraviesa esa solución puede resumirse en cinco pasos:

1.- La fuente de poder envía electrones al cátodo.

2.- Los electrones pasan del cátodo hacia los iones o moléculas adyacentes, produciendo así la reacción catódica.

3.- La corriente es conducida a través del líquido por la migración de los iones disueltos.

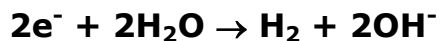
4.- Los electrones pasan de los iones o moléculas en disolución hacia el ánodo, llevando a cabo la reacción anódica.

5.- Los electrones salen del ánodo hacia la fuente de poder.

Considerando una disolución diluida de cloruro de sodio (sal común o sal de mesa). El proceso de conducción a través de la disolución es debido a los iones disueltos de sodio que migran hacia el cátodo y a los iones disueltos de cloro que migran hacia el ánodo. Por el movimiento de iones en estos sentidos, la carga eléctrica es transportada hacia el ánodo desde el cátodo.

La electrólisis de una disolución diluida de una sal produce hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

La reacción catódica en una disolución salina es:



Las burbujas de hidrógeno molecular salen del sistema como gas y los iones hidróxido permanecen en la solución.

La reacción anódica es:

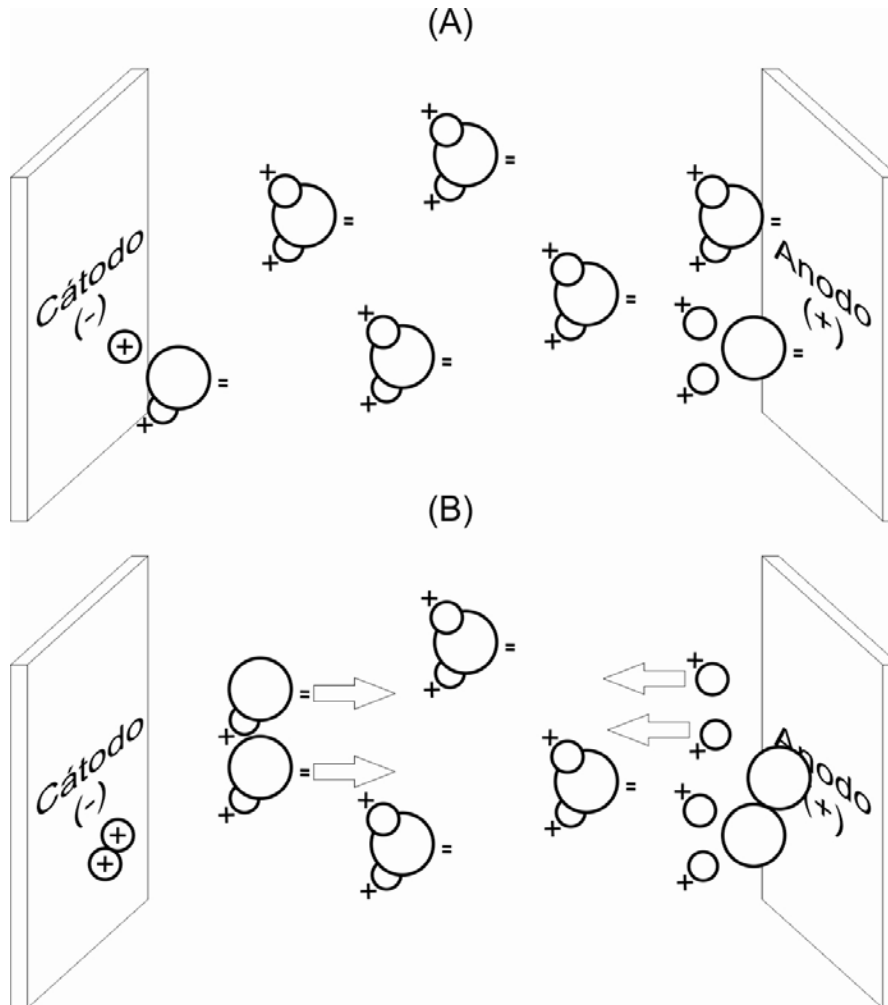
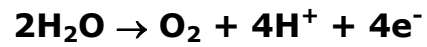


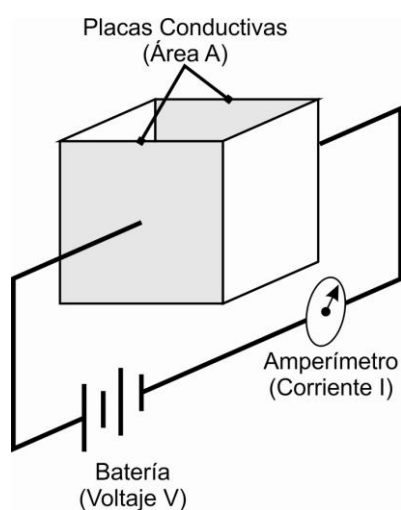
Figura 1.- Esquema de la electrólisis de una disolución salina con formación de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

## 2.6 Resistividad eléctrica en concretos

### 2.6.1 Resistividad



La resistividad se define como la resistencia eléctrica de un conductor de volumen unitario y área transversal constante en el cual la corriente esta continua y uniformemente distribuida. Puede ser interpretada como la resistencia eléctrica entre dos caras opuestas de un cubo de volumen unitario. Si se supone una caja construida de material aislante y con dos placas conductoras en lados opuestos se puede calcular la resistividad del material con el que se ha rellenado la caja aplicando una diferencia de potencial en las placas y midiendo la corriente producida.



**Figura 2.- Principios de resistividad.**

La resistividad eléctrica en el concreto es un indicativo de la cantidad de humedad en los poros del concreto y del tamaño y tortuosidad del sistema de poros. La resistividad se ve fuertemente afectada por la calidad del concreto, es decir, el contenido de cemento, la relación agua/cemento, el curado y aditivos usados. El nivel de cloruros no

afecta en gran medida la resistividad del concreto pues hay una gran cantidad de iones disueltos en el agua intersticial y la adición de estos cloruros no hace mayor diferencia. Sin embargo, en el concreto los cloruros pueden ser higroscópicos, es decir, favorecerá que el concreto retenga agua y es por lo que se acusa a los cloruros de reducir la resistividad.

## **2.7 Mediciones de resistividad.**

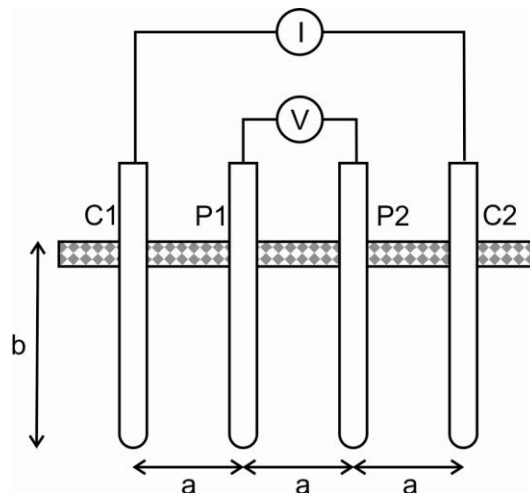
Debido a que la corrosión es un fenómeno electroquímico, la resistividad del concreto tiene una gran influencia en la velocidad de corrosión del acero de soporte pues una corriente eléctrica (corriente eléctrica en forma de un flujo de iones cargados en el agua intersticial) debe pasar del ánodo al cátodo para que la corrosión pueda llevarse a cabo.

La prueba de resistividad de los cuatro electrodos, o método de Wenner, fue desarrollado para medir la resistividad de los suelos (norma ASTM G57) (25), pero frecuentemente se emplean modificaciones especializadas a este método para la medición de la resistividad del concreto. Esta medición puede indicar posible actividad de corrosión si el acero es despasivado.

## **2.8 Método de Wenner**

Para la medición de resistividad en suelos se hace necesario insertar cuatro electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno y, por el contrario, no dependen en forma apreciable del tamaño y material de los electrodos, aunque si dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la aplicación de corriente directa a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.



*Figura 3.- Disposición de electrodos en el método de Wenner.*

En la figura 2 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se aplica a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. Si los electrodos se encuentran espaciados a la misma distancia, entonces la resistividad está dada por la siguiente expresión:

$$\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = 2\pi aR$$

Donde  $a$  es la separación entre electrodos en cm y  $R$  la resistencia en  $\Omega$ . Si los electrodos de corriente no están espaciados a la misma distancia que los electrodos de potencial, entonces la resistividad es calculada por:

$$\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = \frac{\pi bR}{\left(1 - \frac{b}{b+a}\right)}$$

Donde  $b$  es la separación de los electrodos externos en cm,  $a$  es la separación de los electrodos internos en cm y  $R$  es la resistencia en  $\Omega$  (3).

Dependiendo del tipo y de las características del material los valores de resistividad pueden variar de manera importante. Pueden obtenerse valores de  $10^{-6}$  Ohms-cm para un material altamente conductor como la

plata mientras que materiales aislantes como el caucho y algunos polímeros pueden reportar valores de hasta  $10^{19}$ .

<b>Resistividad (<math>\Omega\cdot\text{cm}</math>)</b>	<b>Material</b>	
$10^{19}$	<b>Parafina</b>	<b>Aislantes</b>
$10^{18}$	<b>Teflón</b>	
$10^{17}$	<b>Poliestireno</b>	
$10^{16}$	<b>Neopreno</b>	
$10^{15}$	<b>Madera, acrílico, cerámico</b>	
$10^{14}$	<b>Epóxico</b>	
$10^{13}$	<b>Polietileno</b>	
$10^{12}$	<b>Mica</b>	
$10^{10}$	<b>Vidrio</b>	<b>Semiconductores</b>
$10^9$	<b>Vinilo</b>	
$10^8$	<b>Concreto (seco al horno)</b>	
$10^7$	<b>Granito (seco)</b>	
$10^6$	<b>Concreto (seco interior)</b>	
$10^5$	<b>Concreto (Seco exterior)</b>	
$10^3$	<b>Concreto saturado</b>	<b>Conductores</b>
$10^{-3}$	<b>Grafito</b>	
$10^{-5}$	<b>Níquel</b>	
$10^{-6}$	<b>Plata, cobre</b>	

*Tabla 1.- Escala de resistividades para diversos materiales.*

Esta técnica ha sido modificada de su aplicación en suelos ya sea insertando los electrodos o presionándolos sobre la superficie de concreto usando geles en la punta para mejorar el contacto eléctrico.

## **2.9 Electro-ósmosis**

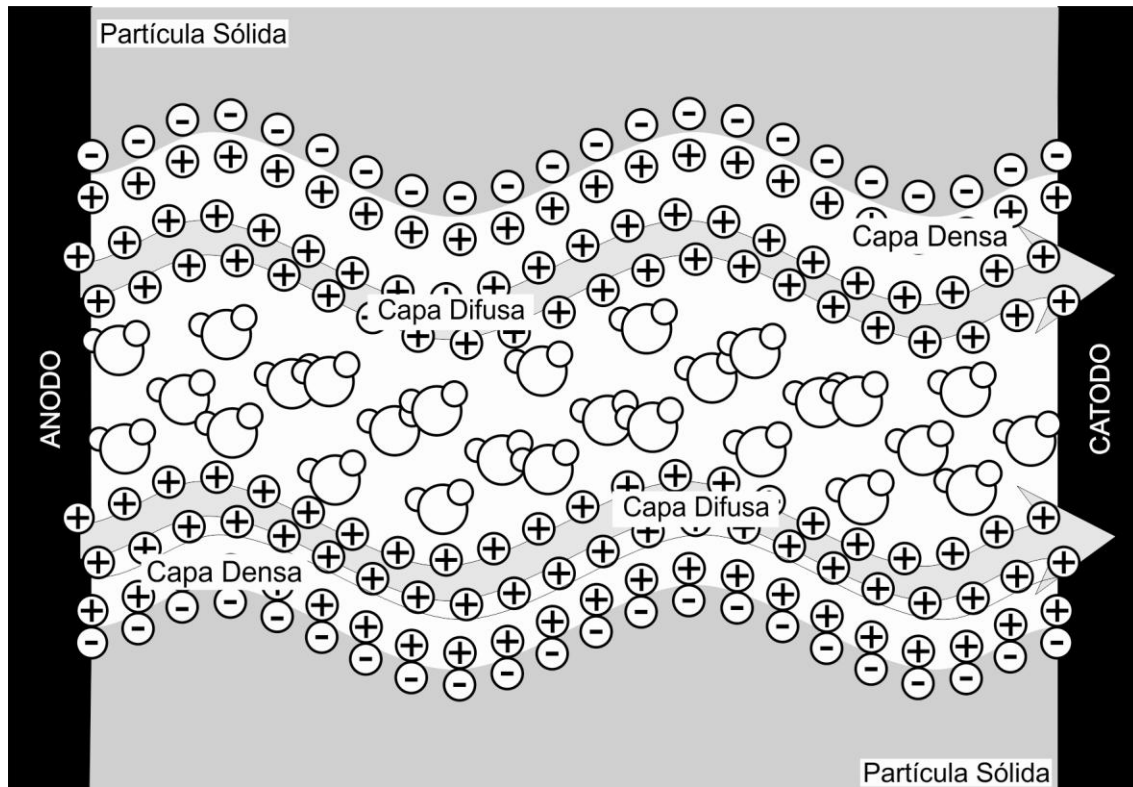
Si los iones de cierto signo son adsorbidos de manera preferencial en una intercara sólido /disolución entonces se genera una carga neta o

una diferencia de potencial eléctrico a través de la intercara. A este fenómeno se le llama electro-ósmosis.

En 1809, F. F. Reuss describió por primera vez la electro-ósmosis por medio de un experimento que mostraba que era posible hacer fluir el agua a través de arcilla al aplicar un campo eléctrico externo. Ahora se sabe que en el sistema agua-arcilla el flujo de agua es iniciado por el movimiento de cationes presentes en el agua intersticial de la arcilla, o de cualquier otro medio poroso, como el concreto. Con la migración de los cationes por efecto del campo eléctrico, el agua que rodea a estos cationes es arrastrada con ellos.

La mayoría de las partículas que componen el suelo poseen carga negativa, permitiendo a los cationes ser adsorbidos a la superficie para mantener la neutralidad eléctrica. Cuando se agrega agua al suelo, los cationes adsorbidos son hidratados y tienden a migrar de la superficie del suelo. La tendencia de los iones a migrar de la superficie es contrarrestada por la fuerza electrostática que la capa de cargas negativas de la superficie del suelo ejerce sobre los cationes, sin embargo, esta atracción no es lo suficientemente fuerte, provocando que esta capa de cationes sea una película móvil de iones solvatados en la vecindad de las partículas del suelo. Cuando se aplica un campo eléctrico de corriente directa en el suelo húmedo, éste provoca que los

cationes solvatados migren hacia el cátodo. Al ocurrir la migración, los cationes arrastran consigo el agua intersticial del suelo produciendo entonces un flujo electro-osmótico.



*Figura 4.- Migración iónica en medios porosos. Las partículas sólidas del suelo poseen cargas negativas mientras que la migración de las cargas positivas arrastra el agua con ellas hacia el cátodo.*

La ecuación básica para el movimiento de agua intersticial en un sistema poroso capilar como la arcilla o el concreto según Tikhomolova (21) es:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \underbrace{\vec{g}\rho}_{\mathbf{a}} - \underbrace{grad\mathcal{P}}_{\mathbf{b}} + \underbrace{\eta\Delta^2\vec{v}^0}_{\mathbf{c}} + \underbrace{\left(\frac{\rho^+ z^+ e_0}{m^+} + \frac{\rho^- z^- e_0}{m^-}\right)\vec{E}}_{\mathbf{d}} - \underbrace{\frac{kT}{m^+} grad\rho^+ - \frac{kT}{m^-} grad\rho^-}_{\mathbf{e}}$$

Donde:

$\mathcal{P}$  = densidad de la solución.

$\rho^\pm$  = densidad del medio de iones positivos o negativos

$\vec{v}$  = velocidad de la disolución (centro de masa)

$\vec{v}^0$  = velocidad del disolvente

$\vec{g}$  = aceleración de la gravedad

$\mathcal{P}$  = presión

$\eta$  = coeficiente de viscosidad de corte

$z^\pm$  = carga de un ión.

$e_0$  = carga eléctrica elemental.

$m$  = masa de un ión positivo o negativo.

$\vec{E}$  = fuerza del campo eléctrico en el sistema.

$k$  = constante de Boltzman.



T = temperatura

Esta ecuación posee diversas componentes y se asocian a las siguientes fuerzas: **a** es el componente de fuerza debido a la gravedad; **b** designa al componente de fuerza debido a la presión; **c** es el componente debido a la viscosidad; **d** es el componente de fuerza debido a la electro-ósmosis; y **e** es el componente de temperatura.

Los componentes de fuerza dominantes suelen ser los debidos a la presión y a la electro-ósmosis. Al aplicar electro-ósmosis para la prevención de filtración de agua cuando ésta es causada por presión hidrostática, la fuerza de electro-ósmosis debe balancear o exceder la fuerza de la presión hidrostática.

$$\left( \frac{\rho^+ z^+ e_0}{m^+} + \frac{\rho^- z^- e_0}{m^-} \right) \vec{E} \geq \text{grad} \mathcal{P}$$

Para que la electro-ósmosis sea una solución efectiva en la prevención de intrusión de agua en una estructura, ésta debe cumplir ciertas condiciones: el medio a tratar debe presentar poros capilares; la carga superficial no debe variar; debe estar presente una doble capa iónica en las paredes de los poros; el medio debe estar saturado, y el fluido debe ser un electrolito diluido. Estos requisitos son cubiertos por la mayoría

de los materiales para mampostería como: concreto, mortero, piedras en general y suelos arcillosos.

El agua y los iones forman un electrolito donde los iones positivos tienden a ser solvatados y los negativos a no solvatarse, por tanto, al moverse los iones positivos a través de los poros llevan consigo moléculas de agua. En la práctica, el movimiento de agua depende en gran medida de la concentración de los iones, el tipo de material y la magnitud del campo eléctrico aplicado. De las variables independientes, puede controlarse  **$E$**  para redireccionar el movimiento de la solución.

Como ya se ha mencionado, el agua puede filtrarse a una estructura de concreto por la porosidad del concreto, a través de grietas o por las uniones de los materiales de construcción. Debido a que la electro-ósmosis recae en la necesidad de un medio poroso para mover agua, no puede usarse para detener el agua que entra por las grietas y uniones, para lo cual es necesario el uso de métodos estándar para impedir el paso de agua como impermeabilizantes o selladores. Sin embargo, estos métodos de reparación se basan en la unión que se crea entre el material de reparación y el concreto. La humedad en el concreto deteriora esta unión por lo que se requiere el remplazo periódico de los materiales de reparación, pero con el empleo de la electro-ósmosis

puede mantenerse alejada a la humedad de la unión entre estos materiales.

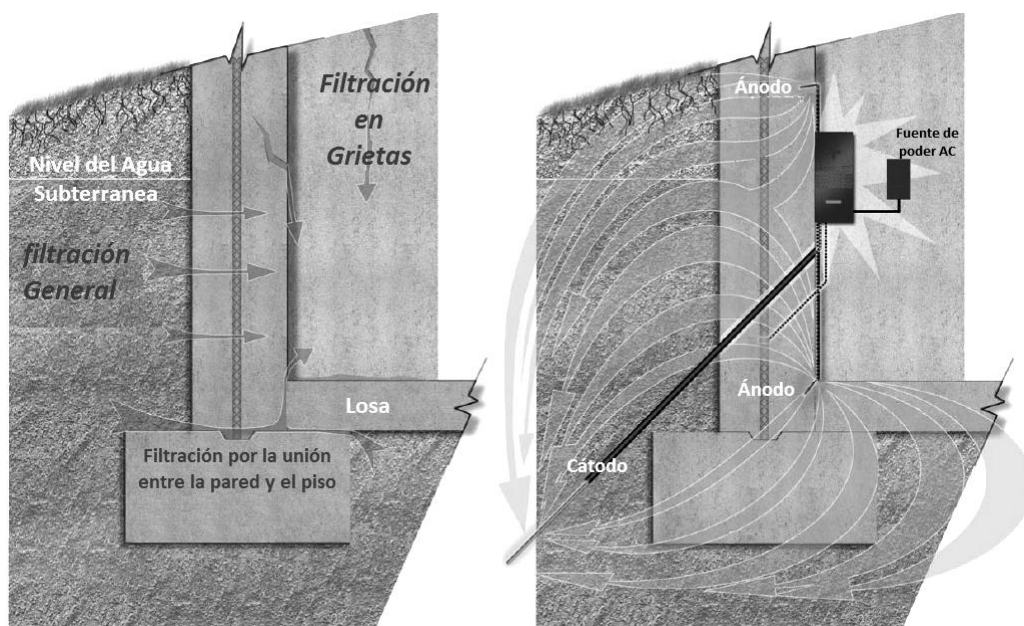
## **2.10 Pulsos electro-osmóticos**

Para aplicar la electro-ósmosis de manera comercial dentro de estructuras de concreto se han desarrollado equipos que aplican un campo eléctrico por medio de una corriente directa pulsante. Estos sistemas de pulsos electro-osmóticos trabajan enviando una secuencia de pulsos que consiste en un pulso de voltaje positivo seguido de un periodo de reposo en donde no se aplica voltaje alguno seguido de un voltaje negativo. De estos tres pulsos, el voltaje positivo es el que tiene la mayor duración de tiempo y tanto este pulso como el negativo son del orden de 20 a 40 V. El pulso positivo causa el movimiento de moléculas de agua del ánodo al cátodo mientras que los pulsos negativo y de reposo ayudan a mantener la integridad del medio.

El campo eléctrico es generado por dos conjuntos de electrodos. Un conjunto, los ánodos, es enterrado justo debajo de la superficie de la cara interior del concreto o del piso mientras que el otro conjunto, los cátodos, es colocado ya sea en el suelo de los alrededores o, si el grosor de las paredes o el piso no es mucho, se coloca atravesando el concreto hasta llegar al suelo. Al aplicar la corriente directa pulsante en los

electrodos para generar el campo eléctrico en el concreto un pulso eléctrico positivo provoca que los cationes (como el  $\text{Ca}^{+2}$ ), junto con las moléculas de agua que los rodean, fluyan del interior del concreto (de los ánodos) hacia el exterior de la estructura (hacia los cátodos) en dirección contraria al flujo inducido por el gradiente hidráulico, impidiendo así que la humedad alcance el interior de la estructura.

Estudios realizados por el *US Army Corps of Engineers* (15) para evaluar la viabilidad y rentabilidad de la técnica de EOP en comparación con las técnicas convencionales para mitigar los problemas de humedad, concluyen que los ahorros llegan al 50% usando la tecnología EOP.



*Figura 5.-Esquema del funcionamiento de la técnica de EOP.*

### **2.10.1 Consideraciones de diseño.**

Al construir un sistema de EOP para ser usado a lo largo de la vida útil de una estructura se debe asumir que el suelo será sometido a ciclos de húmedo a seco y que pueden ocurrir cambios en las condiciones del suelo en la periferia de los electrodos, y que a pesar de esto los electrodos deben mantener un contacto eléctrico efectivo con el suelo y deben sobrevivir sin remplazo.

El flujo volumétrico es inversamente proporcional a la separación entre ánodos y cátodos, por lo que la migración de agua más efectiva se obtiene cuando el ánodo y el cátodo están razonablemente cerca, sin embargo se tiene que cuidar que la cercanía del cátodo no genere una acumulación de agua cerca de los cimientos. Otro factor a tomar en cuenta en la separación de electrodos es el gradiente de potencial que se genera entre ellos. Gradientes altos de voltaje pueden incrementar la temperatura del suelo y disminuir la efectividad del EOP. Acar y Hamed (1) reportan que el espaciamiento entre electrodos que genere un gradiente de potencial del orden de 1 volt por cm proporciona un desempeño óptimo. De las consideraciones anteriores se consideran adecuados los espaciamientos de 50 cm y hasta 1m.

En estructuras subterráneas el ánodo puede colocarse dentro de una pared exterior. Estos electrodos internos suelen ser alambres metal-cerámicos que se introducen en surcos que son posteriormente

resanados con cemento conductor. Los cátodos son barras metálicas de cobre que se entierran en el suelo tras perforar la pared de la estructura subterránea.

La resistividad típica de un concreto seco oscila entre  $10^8$  y  $10^9$  ohm-metro y puede disminuir hasta por debajo de los 50 ohms-metro en concretos húmedos. La arcilla suele tener una resistividad por debajo de los 100 ohms-metro. Estas resistividades hacen que las conexiones eléctricas dentro de un muro de concreto sean altamente conductoras con humedad presente. Cuando el electrodo atraviesa la pared hasta el suelo, la conductividad del sistema permanece elevada incluso cuando la conductividad del concreto comience a caer.

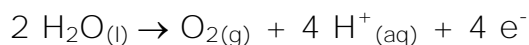
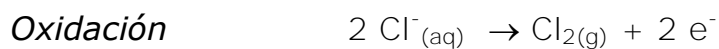
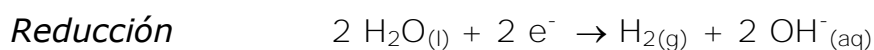
### **2.10.2 Programa de operación**

Si el sistema de eliminación de agua es operado con una corriente directa continua se habla de electro-ósmosis. Los sistemas de pulsos electro-osmóticos manejan una reversión periódica de corriente continua. Se han propuesto una gran variedad de pulsos para su uso en EOP. En todos los sistemas el electrodo más alejado de la estructura tiene la función de polo negativo (cátodo) por el periodo más largo de tiempo y posteriormente se invierte la polaridad en los electrodos.

Para secar concreto la aplicación de los pulsos electro-osmóticos ha mostrado ser más efectiva al compararla con la aplicación de la electro-ósmosis estándar. Esto se debe a que los cambios de polaridad en los pulsos resultan en la reversibilidad de algunas de las reacciones que ocurren durante la electrólisis, además, el periodo de reposo entre los pulsos le permite al sistema estabilizarse y evitar así la polarización del sistema. Con lo anterior se evitan efectos secundarios indeseables como la producción de ácido. Otra función importante del pulso negativo es evitar que el concreto se seque en exceso.

### **2.10.3 Producción de gases**

Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por agua o una disolución de sal común (cloruro de sodio) el líquido se hidrolizará para formar hidrógeno y ya sea oxígeno u oxígeno y cloro. El hidrógeno se forma en el cátodo mientras que el cloro y el oxígeno se forman en el ánodo.



Si los gases quedan atrapados en los electrodos comenzarán a desplazar al agua, elevando la resistencia en el circuito y, por ende, disminuye la efectividad del proceso de eliminación de agua. En el caso del cátodo, que generalmente se encuentra colocado fuera de la estructura, el gas hidrógeno se difunde en el suelo y se disipa. Si el ánodo se encuentra sellado dentro del concreto, la acumulación de gases oxígeno y cloro ocasionando la falla del sellante. Al producir gases por la descomposición del agua, la electrólisis remueve el agua del substrato alrededor del electrodo, llegando a disminuir la eficiencia del sistema por el secado local del concreto que incrementa la resistencia del circuito.

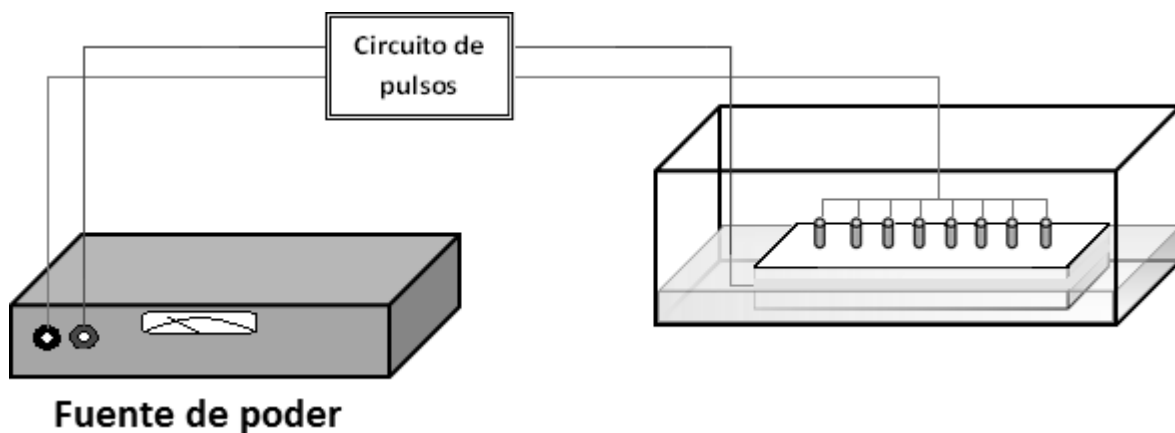


### **3 TÉCNICA EXPERIMENTAL**

Para esta tesis se montó un sistema de pulsos electro-osmóticos sumergiendo diversas probetas de concreto, que serían la estructura a secar, en una disolución salina dentro de una celda de acrílico.

Las piezas de concreto fueron fabricadas con electrodos embebidos a lo largo de las probetas para poder realizar las mediciones de resistividad por el método de Wenner y para ser utilizados como ánodos en el proceso de secado. Alrededor de las probetas se colocó una cinta de cobre como cátodo.

Las probetas se conectaron a un circuito eléctrico con el patrón de pulsos que a su vez estaba conectado a una fuente de poder.



*Figura 6.- Esquema del equipo montado para la aplicación de pulsos en las probetas de concreto*

### 3.1 ESPECIFICACIONES DEL CONCRETO

Los métodos actuales para el proporcionamiento de mezclas por peso y por volumen se especifican en la publicación estándar ACI 211.1 publicado por el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (2). Para la elaboración de la mezcla de las probetas de concreto se ha seleccionado el método volumétrico, pues es descrito como un método más exacto e involucra los valores de densidad absoluta de todos los ingredientes para determinar el volumen absoluto que cada uno ocupará en la mezcla.

La mezcla de concreto empleada en la elaboración de los cilindros tiene como objeto simular las condiciones a las que está expuesta una estructura de concreto real en situaciones de extrema humedad, como es el caso de túneles y sótanos. Se ha seleccionado una mezcla de concreto para loza que será expuesta a condiciones de humedad constante y que no sea expuesto a condiciones severas ambientales ni al ataque de sulfatos.

Siguiendo el procedimiento del ACI 211.1 se obtiene el proporcionamiento de mezcla con los siguientes ingredientes:

· **Cemento tipo:** I Portland con peso específico de  $3150 \text{ Kg/m}^3$ .

· **Agregado grueso:** con 3/8" (9.5mm) de pulgada y partículas trituradas. El agregado tiene un peso específico de 2628 Kg/m<sup>3</sup> y peso volumétrico varillado de 1602 Kg/m<sup>3</sup>.

· **Agregado fino:** Arena con módulo de finura de 2.80 y un peso específico de 2640 Kg/m<sup>3</sup> al secarse en un horno durante 30 min a 90° C.

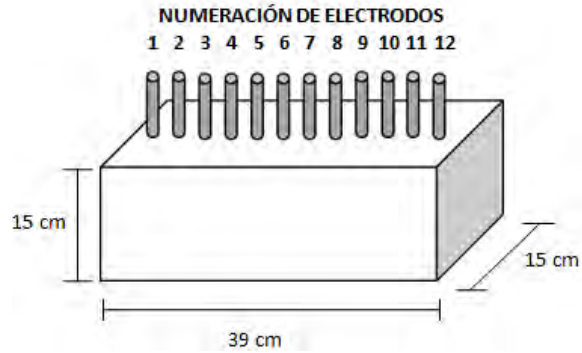
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD (Kg<sub>componente</sub>/m<sup>3</sup><sub>mezcla</sub>)</b>
<b>Agua</b>	207
<b>Cemento</b>	431.25
<b>Agregado grueso</b>	737
<b>Agregado fino</b>	1005.84

Tabla 2.- Proporcionamiento de mezcla para las probetas.

### 3.2 Diseño de Probetas

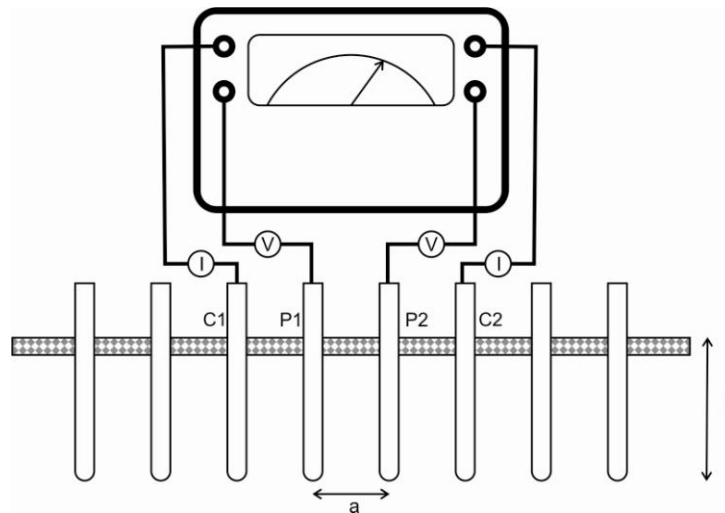
Se emplearon tres diseños de probetas para la aplicación de pulsos electro-osmóticos.

- a) El primer diseño es una probeta rectangular de 15 cm x 15 cm x 39 cm. A lo largo de una de las caras se encuentran incrustadas 12 varillas de acero inoxidable de 15 cm y ¼ de pulgada a 3 cm de profundidad y con una separación de 2 cm entre ellas.



*Figura 7.- Primer diseño fabricado para aplicación de pulsos.*

Se elaboran 5 probetas con este diseño y se les mide la resistividad en seco por medio del método de Wenner usando un equipo Nilsson Modelo 400. De manera similar a la medición de resistividad en suelos, se toman 4 electrodos de la probeta de concreto. Los dos electrodos externos suministran corriente al circuito mientras que los electrodos internos reportan una diferencia de potencial.



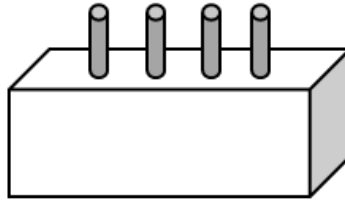
*Figura 8.- Esquema de la conexión del equipo a los electrodos de las probetas para medición de resistividad por el método de Wenner.*

Con el propósito de medir resistividad a lo largo de la probeta se seleccionan grupos de electrodos para medir la resistividad:

# ARREGLO	# ELECTRODOS
1	1 al 4
2	2 al 5
3	3 al 6
4	4 al 7
5	5 al 8
6	6 al 9
7	7 al 10
8	8 al 11
9	9 al 12
10	1, 3, 5, 7
11	6, 8, 10, 12
12	1, 5, 8, 12
13	1, 4, 7, 10
14	3, 6, 9, 12

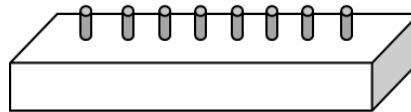
*Tabla 3.- Conexiones a lo largo de la probeta para medición de resistividad por el método de Wenner*

b) El segundo diseño es una probeta rectangular de 7 cm x 7 cm x 20 cm. A lo largo de una de sus caras se introducen 4 varillas de acero inoxidable a 3 cm de profundidad y 3.5 cm de separación entre ellas.



*Figura 9.- Segundo diseño fabricado para aplicación de pulsos.*

- c) El tercer diseño es el más pequeño, siendo una tableta de 2 cm x 3.5 cm x 10 cm.



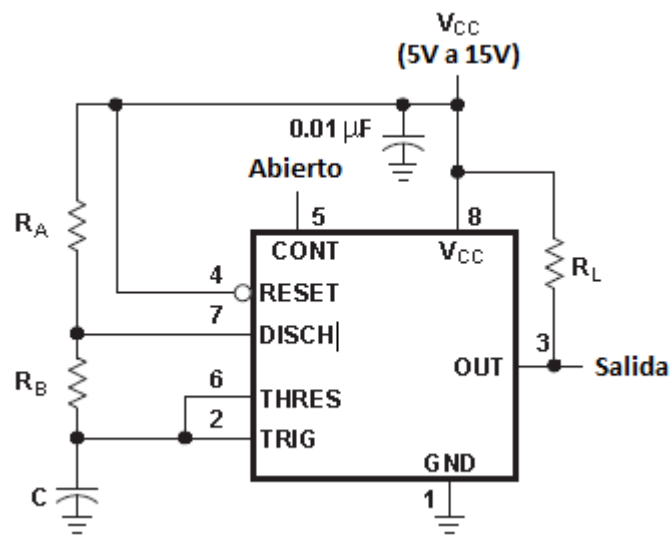
*Figura 10.- Tercer diseño fabricado para aplicación de pulsos.*

A esta probeta se le introducen 8 barras de grafito de 2 mm de diámetro embebidas a 0.5 cm de profundidad y a 1 cm de separación.

### **3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE PULSOS**

Para el sistema de pulsos se emplea un circuito integrado NE555, el cual es un multivibrador astable. Los multivibrador son circuitos osciladores con capacidad de generar una onda cuadrada. Se denomina astable por

ser un multivibrador que no presenta ningún estado estable, lo que significa que posee dos estados quasi-estables entre los que conmuta, permaneciendo en cada uno de ellos un tiempo determinado. En este circuito, la frecuencia de conmutación depende del valor de dos resistencias externas y un capacitor. El NE555 tiene un rango de operación de 5 a 15V.



*Figura 11.- Circuito 555 para operación astable.*

El pulso positivo tiene una duración  $t_H$  mientras que el pulso de reposo tiene una duración  $t_L$  y ambos periodos de tiempo dependen de los valores de las resistencias externas  $R_A$ ,  $R_B$  y del capacitor  $C$ :

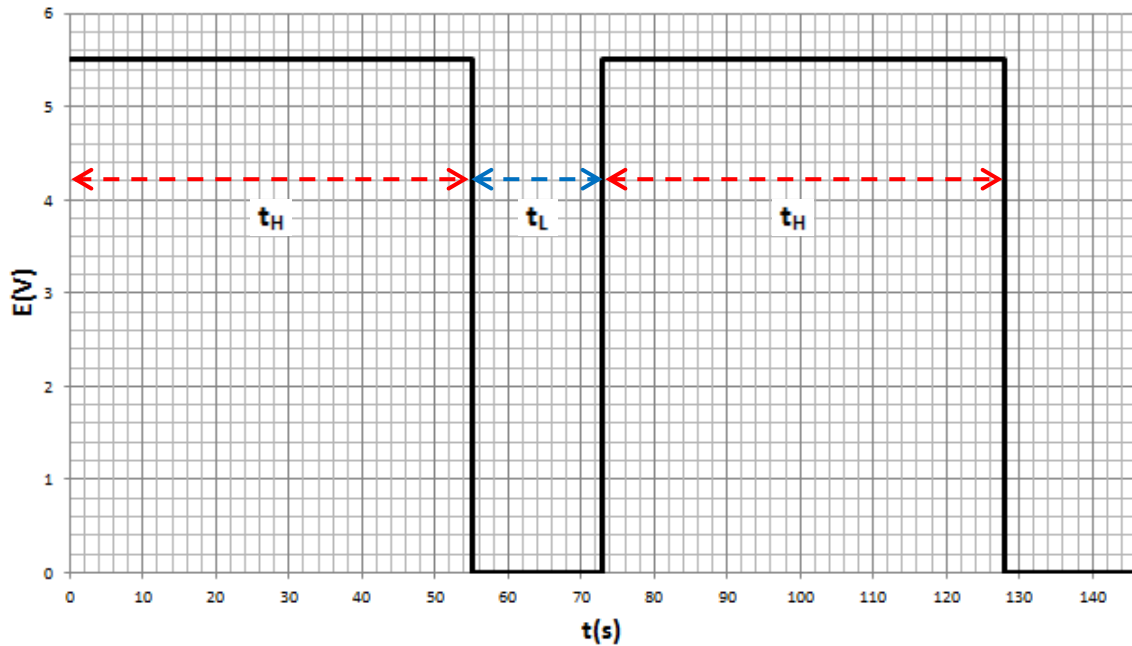
$$t_H = 0.693(R_A + R_B)C$$

$$t_L = 0.693(R_B)C$$

Para el sistema electro-osmótico se emplean los siguientes valores:

$$R_A = 0.821M\Omega ; R_B = 220k\Omega ; C = 100\eta F$$

$$t_H = 55seg \quad t_L = 18seg$$



*Figura 11.- Diagrama de los pulsos empleados en las probetas de concreto.*

A todas las probetas de concreto se les mide la resistividad estando secas y posteriormente se sumergen en una celda de acrílico y se sumergen en una disolución de NaCl 0.1 M. Se ha escogido así por ser una concentración típica de esta sal en el agua de suelos. Una vez sumergidas se mide la resistividad periódicamente para monitorear la

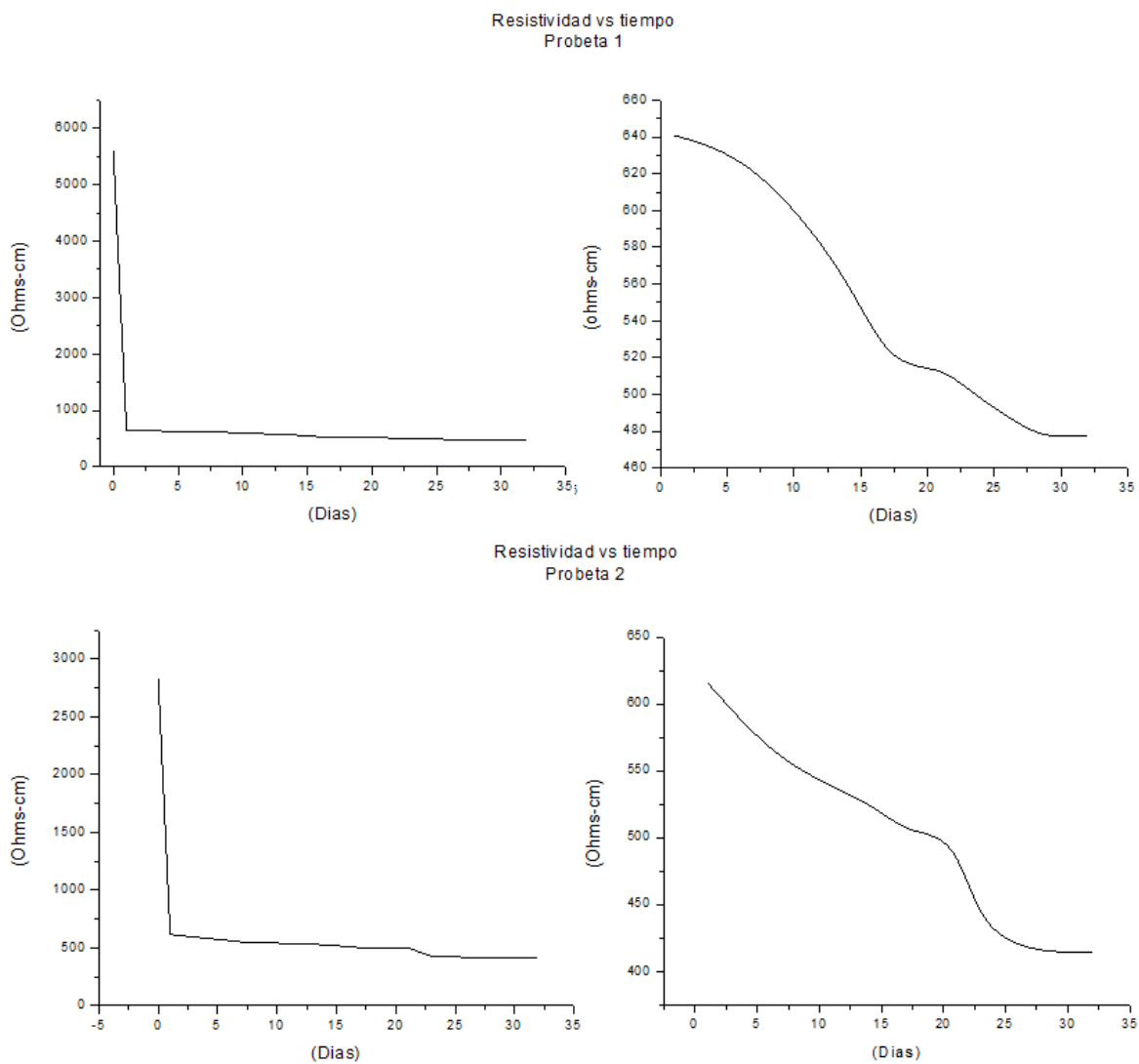


rapidez con la que difunde la humedad en la probeta. Una vez que las probetas alcanzan un valor constante de resistividad se conectan a la fuente de poder por medio del circuito NE555 y se deja corriendo el pulso eléctrico. Diariamente se toman registros de la resistividad del concreto para monitorear el estado de estos sistemas.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

### 4.1 Medición de resistividad

Se presentan primero de manera gráfica los resultados de las mediciones de resistividad obtenidas por el método de Wenner para las 5 probetas de concreto de 39 cm x 15 cm x 15 cm.



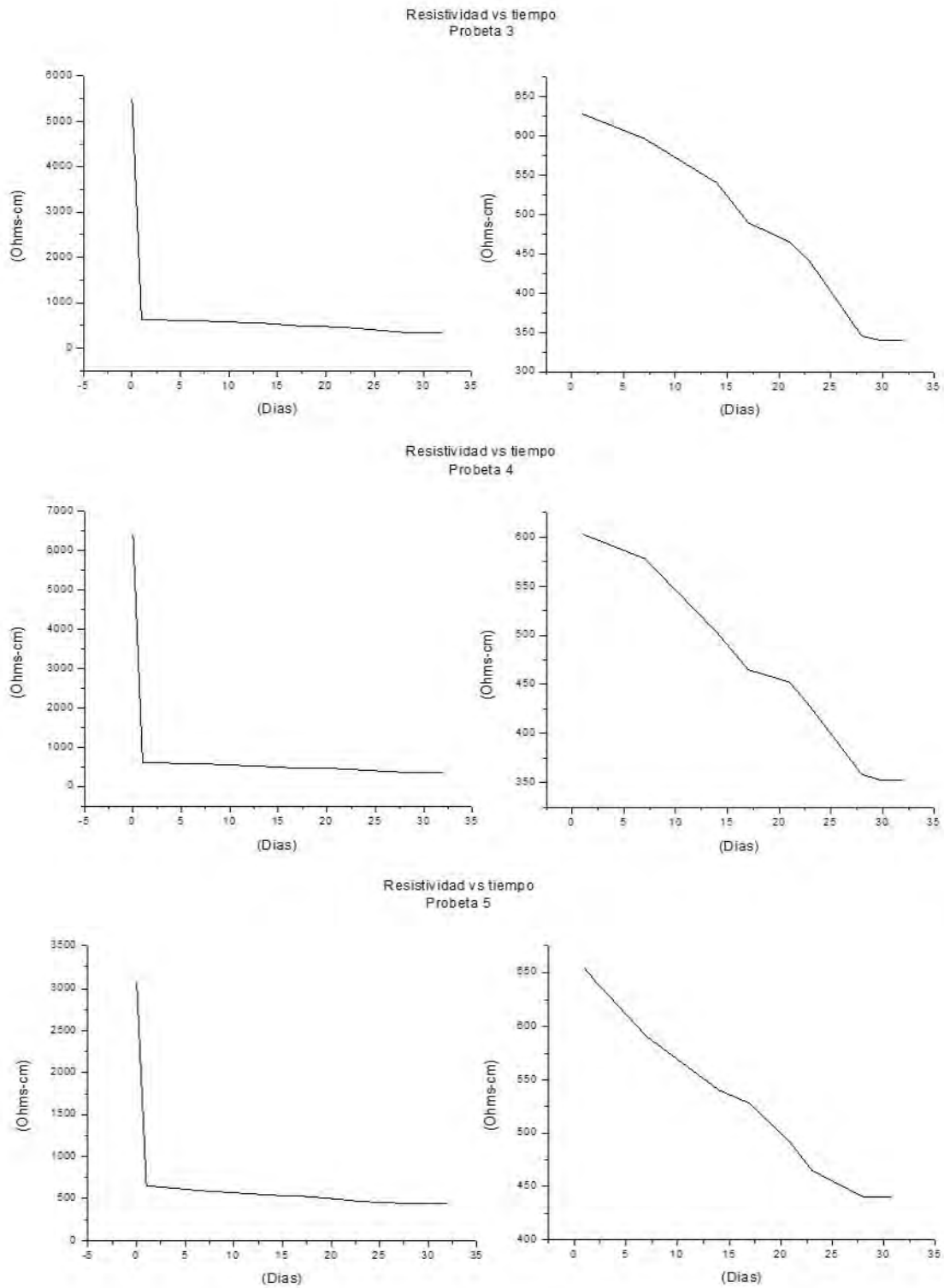


Figura 12.- Cambio de resistividad de las probetas 1-5 en función del tiempo de inmersión en disolución 0.1 M NaCl.

Las gráficas 1-10 muestran la medición de resistividad de cada probeta estando secas al tiempo 0, con una resistividad promedio de 4700 ohms-cm. Al momento de sumergir las 5 probetas su resistividad disminuye drásticamente a un promedio de 630 ohms-cm.

Las gráficas de la izquierda muestran el rápido cambio de resistividad que presentan las probetas estando secas y una vez que se han sumergido en la disolución salina 0.1 M NaCl. Las gráficas del lado derecho omiten el valor de resistividad de las probetas antes de la inmersión para poder observar más claramente la humidificación de las probetas al paso del tiempo. La lectura de resistividad de las probetas inmersas se llevó a cabo hasta obtener lecturas constantes durante tres días en el equipo de medición, lo cual tomo entre 27 y 30 días.

La medición de resistividad en estas probetas permitió comprobar la efectividad del método de Wenner al medir el contenido de humedad dentro de las piezas concreto, sin embargo, las características de estas probetas no permitieron la aplicación de los pulsos electro-osmóticos.

El equipo usado para el sistema de pulsos fue elaborado con material disponible en el laboratorio y no permite mantener una diferencia de potencial necesaria para el proceso de secado. Aunque el rango recomendado en la literatura para el potencial es de 20 a 40 V el equipo

empleado en las pruebas solo admite de 5 a 15 V. Al enviar 15 V con la fuente de poder las probetas mantenían un potencial de 0.7 V en promedio, siendo este un valor totalmente inútil para el proceso.

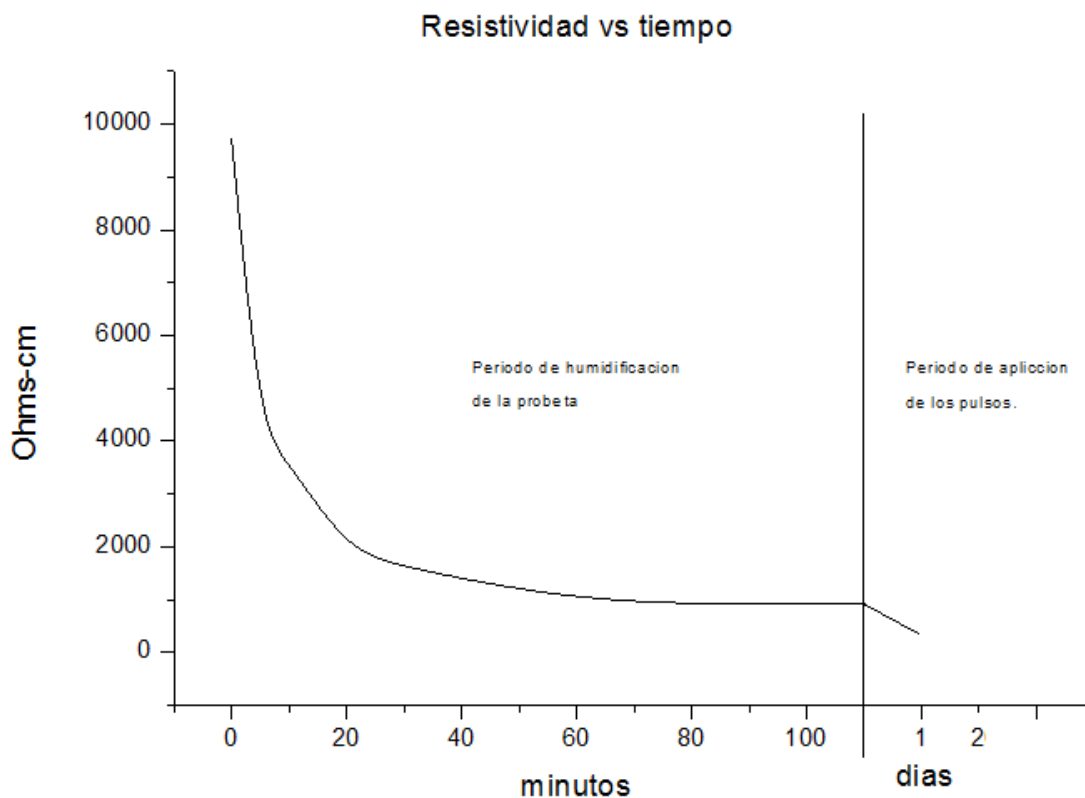
Dado que este trabajo tiene como objetivo demostrar el fenómeno de migración del agua por efecto de los pulsos electro-osmóticos y no así el diseño de un equipo para uso a gran escala, se cambió el diseño de las probetas por uno de menores dimensiones que permitiera un circuito con una diferencia de potencial de al menos 5 V.

El siguiente diseño de 7 cm x 7 cm x 20 cm. Presentó el mismo problema de resistencia disminuyendo el potencial a 0.3 V en promedio, por lo que para el tercer diseño se realizó la misma proporción de mezcla excluyendo el agregado grueso para reducir la resistencia del sistema.

Posteriormente, el diseño se redujo a 2 cm x 3.5 cm x 10 cm y, siguiendo las referencias de la literatura, se emplearon ánodos de acero inoxidable y cátodo de cobre. Este sistema permite un potencial de 13 V, lo cual excede por mucho el potencial estándar del acero inoxidable. Los ánodos en estas probetas se disuelven mucho antes de permitir siquiera una medición de resistividad después de comenzado el patrón de pulsos, por lo que se emplearon ánodos de grafito en sustitución del acero inoxidable y se mantuvo el cátodo de cobre.

## Mediciones de potencial antes y después de aplicar el patrón de pulsos.

Con el propósito de observar el efecto del campo eléctrico sobre el contenido de humedad en el concreto se emplearon dos probetas con el mismo diseño de 2 cm x 3.5 cm x 10 cm conectándolas al sistema con polaridades distintas.

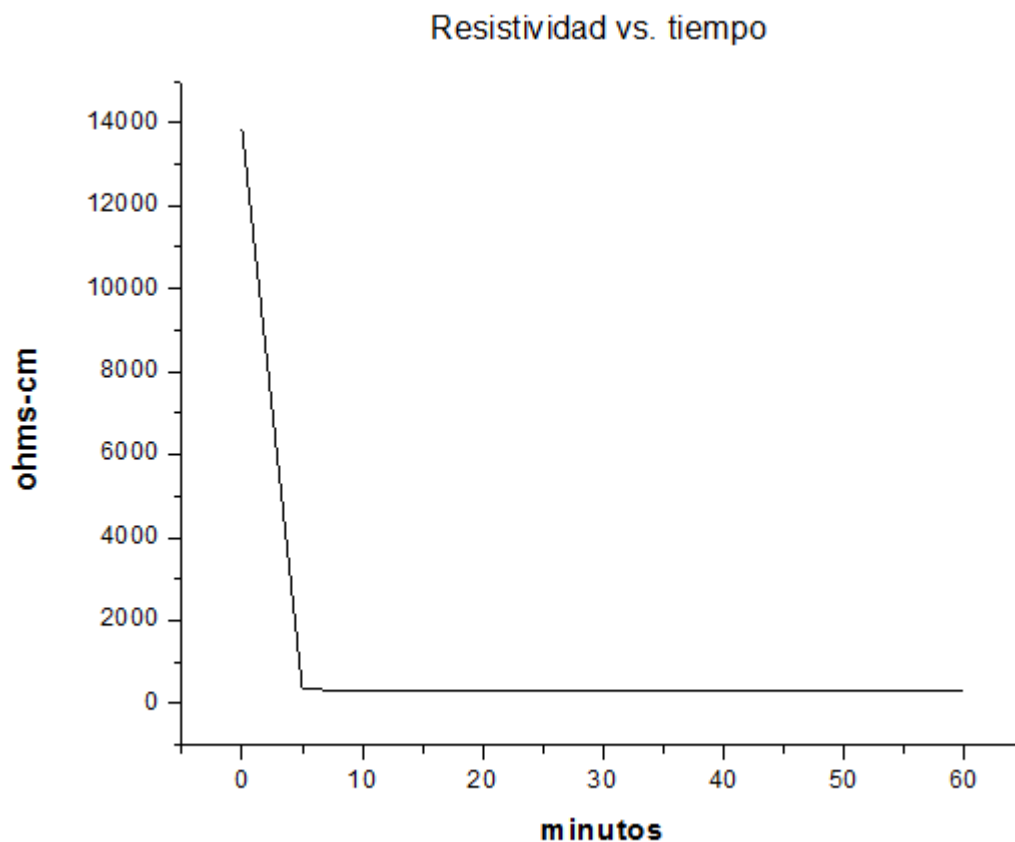


*Figura 13.- Valores de resistividad en función del tiempo en la probeta 1 al tener insertados los cátodos en el interior de la probeta y el ánodo en el exterior.*

A la probeta 1 se le invirtió la polaridad dejando las barras de grafito como cátodos y la barra de cobre como ánodo. Como se observa en la figura 13, la probeta de concreto alcanzó con una resistividad constante de 905 ohms-cm a partir de 80 minutos de inmersión. Después de 30 minutos de haber alcanzado un valor constante se aplicó el patrón de pulsos a 13 V durante un día, al cabo del cuál reportó una resistividad de 451 ohm-cm. La disolución del ánodo de cobre no permitió más lecturas.

La segunda probeta se conectó con la polaridad correcta para sacar agua del concreto: las barras de grafito se conectaron a la terminal positiva y la cinta de cobre que rodea a la pieza sirvió de cátodo. Sin embargo, imprimir en la pieza un voltaje de 13 V el cloro desprendido en los ánodos se saturó alrededor de las barras de grafito y fracturó la probeta de grafito por la mitad. La diferencia de potencial de 13 V resultó tan alta para la pieza que las cabezas de caimán sujetas a las barras de grafito se disolvieron, por lo que se perdía el contacto eléctrico con la pieza.

Finalmente se repitió la prueba bajando el potencial a 5.13 V, con el propósito de extender la vida útil de los contactos y bajar la rapidez de formación de gas cloro en los ánodos y poder tomar lecturas durante mayor tiempo. Se referirá a esta pieza como ***Probeta 2.***

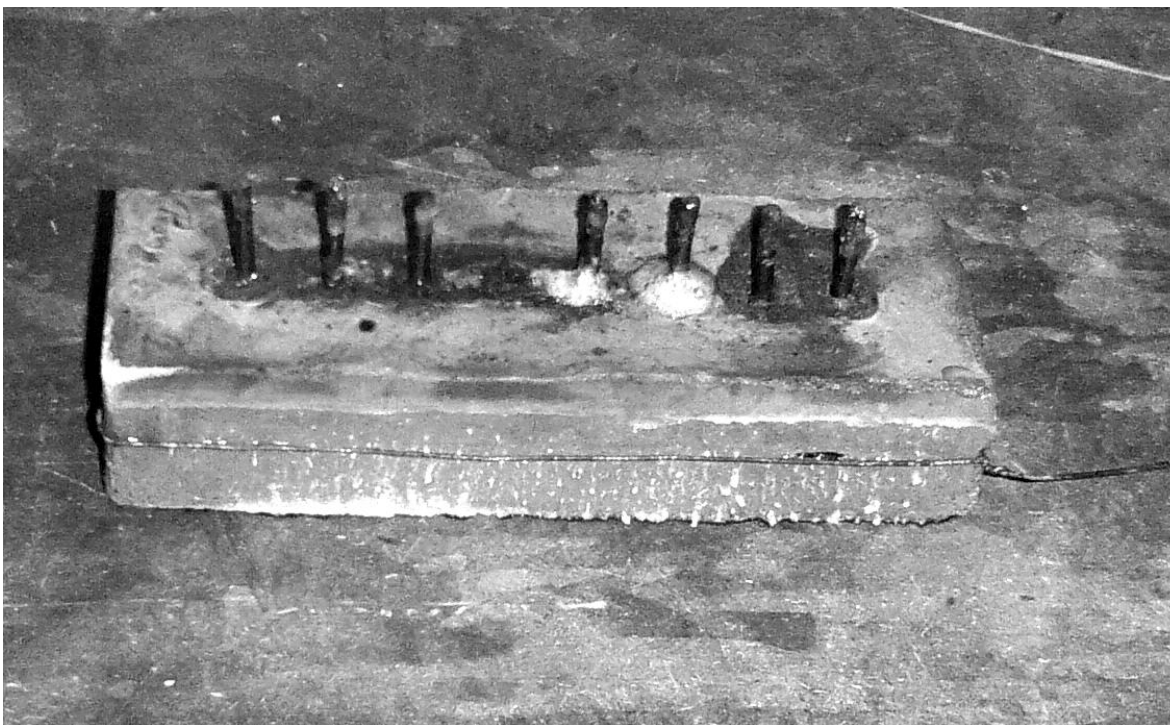


*Figura 14.- Cambio de resistividad de la probeta 2 seca al sumergirse en disolución 0.1 M NaCl.*

La probeta 2 seca reporta una resistividad de 13823 ohms-cm, a los 5 minutos de permanecer sumergida en disolución salina 0.1 NaCl el valor de su resistividad disminuye a 349 Ohms-cm y se estabiliza en 300 ohms después de 20 minutos (figura 14). Después de 1 hora de haberse sumergido se aplica el sistema de pulsos y se toman lecturas diarias de la resistividad de la pieza.



La figura 16 muestra gráficamente los resultados de la aplicación de los pulsos electro-osmóticos. Los 2 primeros días de comenzado el patrón de pulsos incrementan la resistividad de la pieza a 423 Ohms-cm alcanzando un valor de 470 Ohms-cm al día 14 de aplicar los pulsos. El día 15 la resistividad del sistema disminuye a 465 Ohms-cm y se suspende el programa de pulsos pues la probeta se observa dañada por la formación de cloro y la formación de óxido en las cabezas de caimán conectados a los ánodos ocasionan un decremento en la eficiencia del proceso.



*Figura 15.- Estado de la probeta 2 al término de la prueba.*

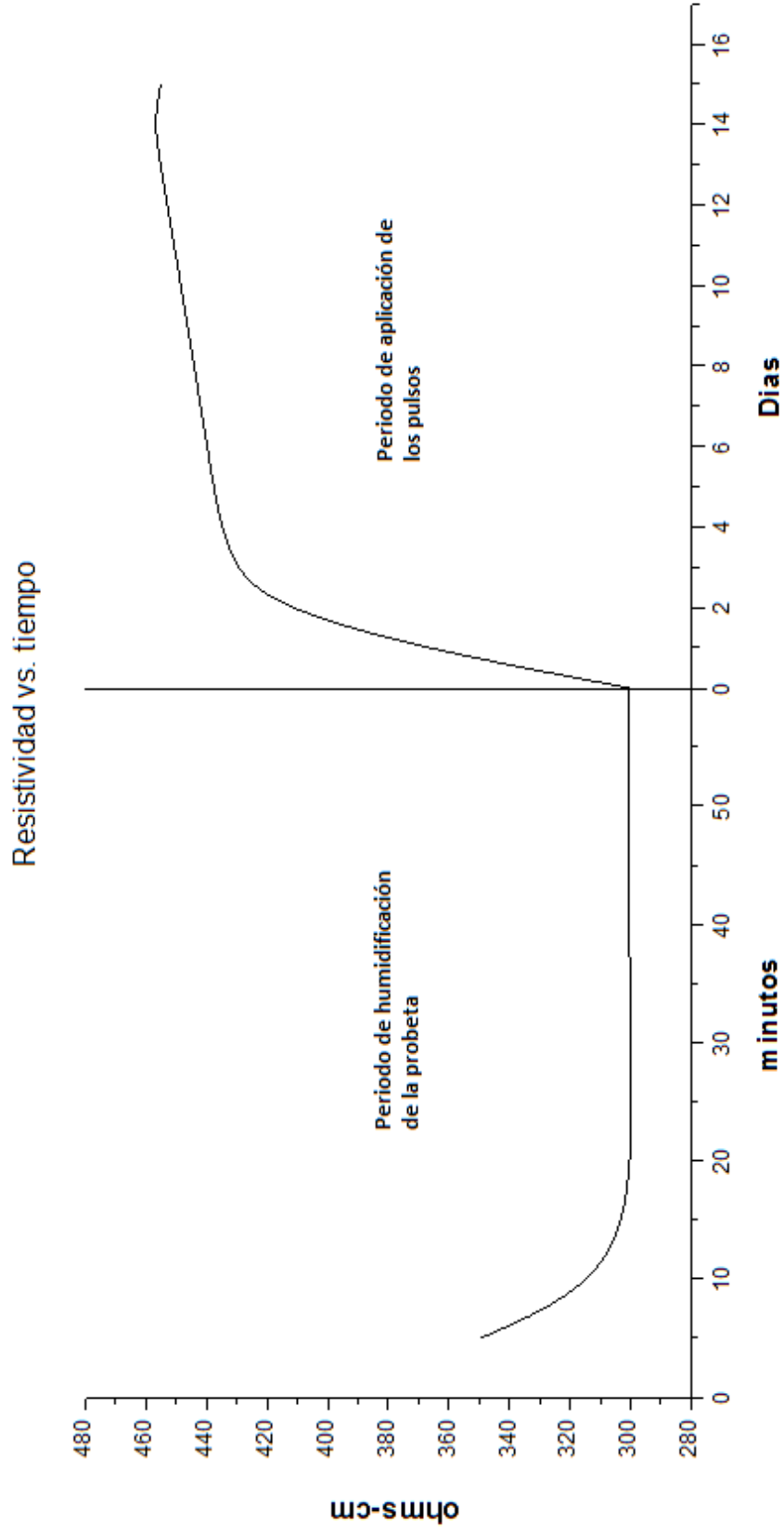


Figura 16.- Cambio de resistividad de la probeta 2 antes y después de la aplicación del patrón de pulsos electro-osmóticos.

En esta prueba no se pudo conseguir elevar más la resistividad debido al diseño del equipo: mientras que en esta prueba se trabajó con 5.13 V, la literatura reporta que la diferencia de potencial mínima que debe aplicarse en el sistema son 20 V, pues un valor menor a este no consigue un flujo de agua suficiente para secar satisfactoriamente una pieza de concreto. Por otro lado, el patrón de pulsos se logra por el uso del circuito NE555, el cual permite pulsos positivos y de reposo mas no genera pulsos negativos, que son los que permiten la reversibilidad de las reacciones involucradas en la interface de los electrodos durante la electrólisis, protegiendo de este modo la estructura. La formación de gas cloro a los alrededores del ánodo forman una barrera que incrementa la resistencia del sistema y el gas hidrógeno formado en la interface con el cátodo acidifica la disolución. En la figura 12 Incluso se aprecia la acumulación de cloro atrapado en burbujas en la base de los ánodos.

A pesar de las limitaciones y simplificaciones, las pruebas muestran claramente el efecto de migración iónica por medio del campo eléctrico generado por los pulsos electro-osmóticos.

En el caso de la probeta 1, con la polaridad invertida (gráfica 11) La probeta se sumerge en la disolución salina y se satura de agua a los 80 minutos. Al ser una probeta de dimensiones tan reducidas es de esperarse que no transcurra mucho tiempo antes de alcanzar valores

constantes de resistividad. Sin embargo, al aplicar los pulsos el valor de resistividad disminuye muy rápidamente en un intervalo corto de tiempo, demostrando que la migración iónica generó un flujo de agua al interior de la probeta en dirección de los cátodos.

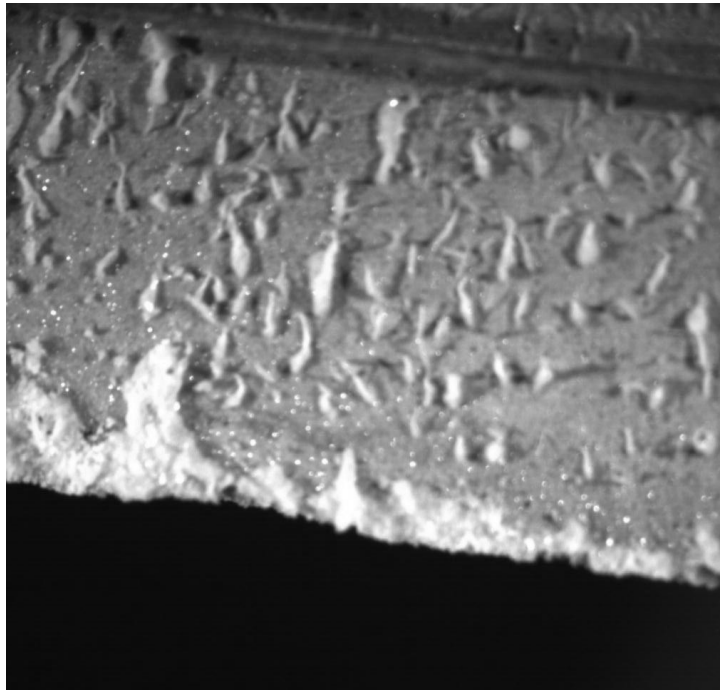
Para la probeta 2 se observa una clara estabilidad en la medición de resistividad desde el minuto 20 y permanece sin cambios durante 40 minutos. Desde el momento en que comienza a correr el programa de pulsos la resistividad aumenta rápidamente evidenciando el flujo de agua en contra de la presión hidráulica.



(a)



(b)



(c)

Figura 17.- Vistas laterales de la probeta 2 después de 15 días de aplicación de pulsos electro-osmóticos.

Al retirar la probeta 2 al terminar la prueba se observan a simple vista los cristales de NaCl que salen del concreto en dirección al cátodo a lo largo de todo el alambre de cobre (figura 17)

## **5 Conclusiones**

- 1.- La aplicación de pulsos electro-osmóticos en un material poroso como el concreto induce un campo eléctrico en el medio que provoca la migración de los aniones y cationes presentes en la disolución, generando de este modo un flujo electro-osmótico de agua en dirección al cátodo.
- 2.- El flujo electro-osmótico de agua se impone sobre el flujo hidrostático que es la causante de que el agua de los alrededores difunda en la pieza de concreto, de este modo es posible drenar estructuras que incluso se encuentran sumergidas en agua o suelos permanentemente húmedos.
- 3.- La técnica de pulsos electro-osmóticos es una técnica viable para el mantenimiento y reparación de estructuras de concreto dañadas por el exceso de humedad, siempre y cuando se maneje el patrón de pulsos adecuado, pues de esto depende la eficiencia del proceso y el cuidado de la estructura de concreto.
- 4.- El uso de la técnica de pulsos electro-osmóticos puede fracasar al largo plazo debido al daño que sufren tanto lo ánodos como los cátodos por los altos voltajes y flujos de corriente a los que son sometidos. Técnicas y equipos de vanguardia utilizan voltajes y

flujos de corriente muy bajos. En estos equipos se emplean ánodos compuestos de mezclas de óxido de titanio.

5.-Es inevitable la formación de gases como productos de la hidrólisis, principalmente hidrógeno y/o cloro. Si estos gases se acumulan alrededor de los electrodos pueden causar falla en los materiales sellantes y afectar el rendimiento del proceso electro-osmótico al elevar la resistencia del circuito.

## 6 Referencias

1. Acar, Y. B. Hamed, J.  
Electrokinetic soil processing in remediation/treatment: synthesis of available data.  
Transportation Research Record, No. 1312: Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 153–161.
2. American Concrete Institute  
Proporcionamiento de Mezclas ACI 211.1  
Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C
3. ASTM G57-95a  
Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method  
Annual Book of ASTM Standards 2009-2010, Vol. 03.02.
4. Anderson, B.  
Electro-osmotic Protection Using Low-voltage Electric Currents to Waterproof Foundations.  
Concrete Construction Magazine, January 1, 2010.  
Consultado en línea el 17 de abril de 2010 en:  
(<http://www.concreteconstruction.net/table-of-contents/magazine.aspx>)
5. Bagotsky, V. S.  
Fundamentals of electrochemistry  
Second edition. Published by John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2006
6. Bockris, J. Reddy, N.  
Modern aspects of electrochemistry, Vol 1. Ionics.  
Second edition. Kluwer Academic Publishers, New York. 2002
7. Broomfield, J. P.  
Corrosion of steel in concrete. Understanding, investigation and repair.  
Second edition. Taylor & Francis, New York. 2007
8. Clute, D  
Fundamentals of Concrete Mix Design.  
Curso impartido en Construction and Soil Mechanics Center, Fort Worth, Texas.
9. Electrical resistivity of concrete - A literature review.  
Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. 2457, 2003.
10. Hock, V. Marshall, McInerney, M. O. Morefield, S. Malone, P. Weiss, Ch.  
Electro-osmotic Pulse Technology for Control of Water Seepage in Various Civil Works Structures.  
*Engineer Research and Development Center*  
*Geotechnical and Structures Laboratory*



11. Hock, V.F. McInerney, M.K. Kirstein, E.  
*Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures.*  
Presented at the U.S. Army Corps of Engineers
12. Koryta, J. Dvorak, J. Kavan, L.  
Principles of electrochemistry  
Second edition. Published by John Wiley & Sons, West Sussex, England.  
1993.
13. Kumar Mehta, P.  
Advancements in concrete technology.  
Point of view: Reflections about technology choices, Concrete International. Pp. 69-76. June 1999
14. McCarter, J. Starrs, G. Kandasami, S. Jones, R. Chrisp, Malcolm.  
Electrode configurations for resistivity measurements on concrete.  
ACI Materials Journal/May-June. Vol. 103 Issue 3. Pp, 258-64. 2009
15. McInerney, M. K. Hock, V. F.  
Electro-osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures.  
U. S. Army Construction Engineering Research Laboratories, Champaign IL.
16. Morefield, S. Hock, V. McInerney. Marshall, O. Marsh, Ch. Cooper, S.  
Control of Water Migration Through Concrete Using Electro-osmosis.  
U.S Army Engineer Research and Development Center  
Construction Engineering Research Laboratory
17. Pauling, L.  
General Chemistry.  
Dover publications. New York. 1988.
18. Proporciónamiento de mezclas. Concreto normal, pesado y masivo ACI 211.1  
Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
19. Sistemas de puesta a tierra: Teoría, diseño, medición y mantenimiento.  
<http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>  
(24 abril 2010)
20. Solís Carcaño, R. G., Moreno, E. I. Castro Borges, P.  
Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera  
Ingeniería 9-1 (2005) 13-18, 2005.
21. Tikhomolova, K. P.  
Electro-Osmosis  
Ellis Horwood Limited. Chichester, West Sussex, England. 1993.
22. Texas Instruments.  
NA555, NE555, SA555, SE555 Precision timers Datasheet. 2006.
23. Weiss, Ch. Jr. Malone, P. G. Hock, V. F. McInerney, M. K. Morefield, S. W.  
Use of Small-Scale Electro-osmotic Systems in Controlling Groundwater Movement Around Structures.  
Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XI, No. 1, February 2005, pp. 53-60

24. Woodson, R. D.  
Concrete structures. Protection, Repair and rehabilitation.  
Elsevier, Oxford, England. 2009