



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA



**“ESTUDIO DE CORROSIÓN DE CONCRETO ARMADO ELABORADO CON
RESIDUOS INDUSTRIALES MINEROS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTAN:

Guadalupe Verónica Teisier Guerra

Nereo de Jesús Hernández Salas

Director:

Dr. Luis Daimir López León

Co-Director:

Dr. Francisco Javier Olguín Coca

MINERAL DE LA REFORMA, HGO, OCTUBRE DE 2015.

DEDICATORIA

Este trabajo y todo el esfuerzo que hice por lograrlo, quiero dedicarlo en especial a mi padre, por darme la oportunidad de formar mi futuro con las herramientas y valores necesarios, por haberme proporcionado la mejor educación, el mejor ejemplo, por haber sacrificado gran parte de su vida para formarme y por todo el esfuerzo que día a día realiza para sacarnos adelante; de quien estoy tan orgullosa y a quién nunca podría pagar lo que hace por mí ni aun con las riquezas más grandes del mundo.

A mi madre que me dio la vida y está conmigo para escucharme y apoyarme sea cual sea mi dificultad, a ella que me impulsa a pensar en grande y que muestra siempre su confianza en mí sin importar los malos ratos.

A mis hermanos por todo el tiempo y las aventuras que pasamos juntos, por hacer cada uno de mis días diferentes, por confiar y apoyarme en mis decisiones y por cuidarnos siempre el uno al otro.

Finalmente, a las personas que siguen estando cerca de mí y quienes le regalan a mi vida algo de ellos.

Guadalupe Verónica Teisier Guerra

DEDICATORIA

Existen muchas personas en mi vida a las cuales quiero agradecer infinitamente el apoyo que me brindaron para culminar una de las metas más importantes en mi vida.

A mis padres y a mi hermana quienes sin escatimar esfuerzo, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, sobre todo por los valores que son su mayor legado, por sus desvelos y preocupaciones, por su ejemplo de superación incansable, quienes con gran ilusión se esforzaron todo este tiempo para convertirme en una buena persona. Por darme el libre albedrío de forjar mi destino. Además sabiendo que jamás podré pagarles todo este gran esfuerzo que han hecho por mí, solo me resta decirles que esta etapa fue gracias a ustedes.

Gracias por sus consejos, por guiarme hacia el camino correcto, por estar siempre a mi lado y levantarme en las dificultades y alentarme en todo momento, por darme la fuerza para seguir adelante, siempre buscando mi bienestar. Siempre estaré a su lado para cuidarlos y amarlos, mil gracias por existir. A mis abuelos porque pase lo que pase siempre están conmigo.

Nereo de Jesús Hernández Salas

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, agradezco al Dr. Luis Daimir López León, mi director de tesis, por darme la oportunidad de aprender algo nuevo, por su colaboración, tiempo y conocimientos compartidos a lo largo de este proyecto ya que sin él, nuestro trabajo no habría sido posible.

A mi compañero de tesis por su amistad y el apoyo que tuvo hacia mí, por formar juntos un buen equipo.

A la Arquitecta Valeria Volpi León por su ayuda, disposición y conocimientos compartidos, porque también es parte de este esfuerzo.

Al Dr. Francisco Javier Olguín Coca, por su participación, tiempo, facilidades y disposición para elaborar nuestra tesis.

A Dios por acompañar y guiar mis pasos, por darme la fuerza y el coraje para cumplir mis metas, por ponerme en este mundo tan loco y por estar presente en cada momento de mi vida.

A mi familia, aunque me faltarían las palabras para expresar la gratitud que les tengo por ser el motivo e inspiración de todo lo que hago y todo lo que soy; porque gracias a mis padres y hermanos es que tengo la oportunidad de vivir este logro para su satisfacción y ejemplo. Los amo con todo el corazón.

A mis compañeros de carrera y en especial a mis amigos que en algún momento fueron parte de mi formación Universitaria y quienes amenizaban la tensión que en algunas ocasiones sentía.

A mis sinodales por el tiempo invertido en las revisiones de esta tesis y por los comentarios tan valiosos que recibí de ellos.

A todos los profesores que tuve durante mi estancia en la Universidad, de quienes me llevo aprendizajes y experiencias muy buenas.

A todos los involucrados en este trabajo les muestro mi admiración, gracias por creer en mí.

Guadalupe Verónica Teisier Guerra

AGRADECIMIENTOS

Hay muchísimas personas a las cuales quiero agradecerles el poder terminar este trabajo entre ellas primeramente a Dios por permitirme llegar hasta este momento. A mis papas por su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, por la motivación que me daban día a día y por sus consejos que son invaluable.

Al Dr. Luis Daimir López León mi director de tesis, por depositar su infinita confianza, paciencia y amistad, para la realización de este proyecto, además de influir en mi formación personal, así como el tiempo dedicado en la elaboración de este trabajo, ha sido un privilegio contar con su guía y apoyo, también gracias por la gran oportunidad de cruzar las fronteras no solo en conocimiento también en la vida real y aprender de los congresos nacionales e internacionales.

A mi codirector Dr. Francisco Javier Olguín Coca por sus asesorías, consejos y enseñanzas durante todo este tiempo dedicado al proyecto sin olvidar su gran amistad.

A la arquitecta Valeria Volpi León por su ayuda, asesoría, consejos y amistad que nos brindó en todo momento y por todas las cosas aprendidas en Portugal.

A mi amiga y compañera tesista Vero por su paciencia, dedicación y su responsabilidad depositada en el proyecto.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por la oportunidad brindada para terminar mis estudios en esta gran institución.

A mis revisores de este trabajo que dedicaron su valioso tiempo y conocimientos para la elaboración del mismo.

Nereo de Jesús Hernández Salas

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xiii
RESUMEN	xvii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos particulares	6
1.5 Estado del arte	7
1.5.1 Antecedentes de las escombreras	8
1.5.2 Estudios con dosificación de residuos industriales en concreto	9
1.5.3 Estudios de corrosión en concreto y en un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos.	10
1.5.4 Estudios reutilización de residuos.	11
CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS	12
2.1 Concreto.....	12
2.1.1 Cemento portland.....	13
2.1.2 Cementante.....	15
2.1.3 Agregados.....	16
2.1.4 Puzolana	17
2.1.5 Materiales puzolánicos	18
2.2 Proporcionamiento de la mezcla de concreto	22
2.2.1 Relación agua-cemento y la resistencia	23
2.2.2 Permeabilidad del concreto	24
2.2.3 Fraguado del concreto.....	24
2.2.4 Endurecimiento del concreto	25
2.3 Concreto reforzado	26

2.4	Acero de refuerzo.....	27
2.5	Corrosión.....	28
2.6	Oxidación	30
2.7	Celda electroquímica.....	30
2.8	Potencial electroquímico	31
2.9	Electrodo de referencia	32
2.10	Norma de potenciales de media celda	32
2.11	Técnicas electroquímicas	36
2.11.1	Espectroscopia de impedancia electroquímica	37
2.12	Técnica de caracterización superficial.....	46
2.12.1	Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	47
2.12.2	Difracción de rayos x.....	48
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		50
3.1	Caracterización del Jal.....	50
3.1.1	Escombreras Dos Carlos.....	51
3.2	Pulverización.....	53
3.3	Tamizado	53
3.4	Caracterización física de agregados pétreos	54
3.5	Medio Corrosivo	55
3.6	Elaboración de especímenes	56
3.7	Determinación de parámetros de corrosión	59
3.8	Cámara de aspersion de cloruros	59
3.8.1	Diseño y manufactura de la cámara.....	60
3.9	Inmersión de especímenes dentro de la cámara de penetración de cloruros.	63
3.10	Efecto del ion cloruro sobre la protección que brinda el concreto al acero.	63
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		64
4.1	Potenciales de Corrosión presa Dos Carlos.....	64
4.1.1	Monitoreo de especímenes con jal-varilla 1	64
4.1.2	Monitoreo de especímenes con jal-varilla 2	65
4.2	Potenciales de Corrosión humo de sílice	66

4.2.1 Monitoreo de especímenes con humo de sílice-varilla 1	66
4.2.2 Monitoreo de especímenes con humo de sílice-varilla 2	67
4.3 Impedancia electroquímica	68
4.3.1 Comportamiento Electroquímico para los sistemas con jal y humo de sílice como aditivo cementante (5 días de exposición).....	68
4.3.2 Comportamiento Electroquímico para los sistemas con jal y humo de sílice como aditivo cementante (30 días de exposición).....	69
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

	Nombre	Pág.
Tabla 1.	<i>Escombreras en diversas zonas de la Ciudad de Pachuca Hidalgo.</i>	3
Tabla 2.	<i>Tipos de cemento portland.</i>	15
Tabla 3.	<i>Propiedades de los aceros estructurales.</i>	28
Tabla 4.	<i>Composición química promedio de la escombrera Dos Carlos.</i>	51
Tabla 5.	<i>Normativa correspondiente a las características físicas de los agregados.</i>	55
Tabla 6.	<i>Dosificación de concreto con 5 % de jal.</i>	57
Tabla 7.	<i>Dosificación de concreto con 10 % de jal.</i>	58
Tabla 8.	<i>Dosificación de concreto con 15 % de jal.</i>	58

ÍNDICE DE FIGURAS

	Nombre	Pág.
Figura 1.	<i>Presas de Jal en Boulevard Nuevo Hidalgo.</i>	7
Figura 2.	<i>Componentes del concreto.</i>	13
Figura 3.	<i>Humo de sílice.</i>	19
Figura 4.	<i>Etapa de curado acelerado.</i>	26
Figura 5.	<i>Comparación del efecto de corrosión en una varilla de acero.</i>	29
Figura 6.	<i>Representación gráfica de una celda electroquímica.</i>	31
Figura 7.	<i>Configuración básica del circuito eléctrico de media celda de cobre-sulfato de cobre.</i>	33
Figura 8.	<i>Vista seccional de la media celda de cobre-sulfato de cobre.</i>	34
Figura 9.	<i>Electrodo de referencia de Cu/CuSO₄.</i>	34
Figura 10.	<i>Instrumentos y accesorios empleados para el monitoreo de potenciales de corrosión.</i>	35
Figura 11.	<i>Monitoreo de potenciales de corrosión con electrodo de Cu/CuSO₄.</i>	35
Figura 12.	<i>Representación del vector de impedancia en coordenadas polares, por medio del módulo Z y el ángulo de fase φ, en coordenadas cartesianas, por medio de los componentes Z' y Z''.</i>	40
Figura 13.	<i>El lugar geométrico de la sucesión de puntos por el extremo del vector de impedancia con la frecuencia constituye el diagrama de impedancia.</i>	41
Figura 14.	<i>Simulación del sistema electroquímico mediante el modelo de Randles de un condensador y una resistencia en paralelo. También incluye la resistencia del electrolito en aire.</i>	42

Figura 15.	<i>Diagrama de impedancia típico, en forma de semicircunferencia, correspondiente al circuito equivalente de Randles (R-C en paralelo).</i>	42
Figura 16.	<i>Tramo en línea recta de pendiente 45°, que identifica el control por difusión en el diagrama de impedancia.</i>	43
Figura 17.	<i>Circuito equivalente para el caso de actuar la impedancia de Warburg, ZW, en serie con la resistencia de transferencia de carga, RT.</i>	44
Figura 18.	<i>Diagrama de impedancia para un control mixto por transferencia de carga y por difusión.</i>	45
Figura 19.	<i>El diagrama de impedancia dibuja un arco de circunferencia con el centro debajo del eje real.</i>	46
Figura 20.	<i>Difractograma de rayos X de las escombreras, cuyas especies minerales principales son: cuarzo (SiO₂), Ortoclasa (O) y albita (A), Berlinita (B) y Jarosita (J).</i>	52
Figura 21.	<i>Microfotografía de las escombreras.</i>	52
Figura 22.	<i>Proceso de pulverización mediante la máquina de desgaste de los Ángeles.</i>	53
Figura 23.	<i>Proceso de tamizado.</i>	54
Figura 24.	<i>Arreglo experimental de los especímenes de concreto</i>	56
Figura 25.	<i>Acomodo de las varillas de acero y la barra de grafito para los especímenes.</i>	57
Figura 26.	<i>Revoltura de la mezcla para elaborar especímenes.</i>	58
Figura 27.	<i>Especímenes colados.</i>	59
Figura 28.	<i>Primer vista seccional del diseño de la cámara de aspersión de cloruros.</i>	61
Figura 29.	<i>Segunda vista seccional del diseño de la cámara de aspersión de cloruros.</i>	62

Figura 30.	<i>Cámara de aspersión de cloruros en funcionamiento.</i>	62
Figura 31.	<i>Especímenes dentro de la cámara de aspersión de cloruros.</i>	63

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Nombre	Pág.
Gráfica 1.	<i>Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con Jal Dos Carlos (varilla 1) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersion salina.</i>	64
Gráfica 2.	<i>Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con Jal Dos Carlos (varilla 2) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersion salina.</i>	65
Gráfica 3.	<i>Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con humo de sílice (varilla 1) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersion salina.</i>	66
Gráfica 4.	<i>Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con humo de sílice (varilla 2) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersion salina.</i>	67
Gráfica 5.	<i>Diagramas de Nyquist para los sistemas de acero - concreto en ausencia y presencia de aditivo, con una exposición de 5 días..</i>	69
Gráfica 6.	<i>Gráfico 6. Diagramas de Nyquist para los sistemas de acero - concreto en ausencia y presencia de aditivo, con una exposición de 30 días.</i>	70

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACI: American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).

Aditivo: compuesto o sustancia que se añade a otra para aumentar o mejorar cualidades.

Aglomerante: Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo exclusivamente físico.

Aglutinante: Sustancia usualmente líquida, que se usa para disolver o desleír las sustancias.

AISI: American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero).

Al₂O₃: Óxido de Aluminio.

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

Calcáreo: Que contiene óxido de calcio (cal).

CaO: Óxido de calcio.

Ca (OH)₂: Hidróxido de Calcio.

Coloide: Se refiere a la propiedad o tendencia espontánea a agregar o formar coágulos.

Compresión: Es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección.

CPVC: Policloruro de Vinilo Clorado.

Cu/CuSO₄: Cobre/ Sulfato de Cobre.

Descimbrado: Se refiere a la acción de retirar el molde que se coloca para que tome forma el concreto y se realiza una vez que el fraguado este lo suficientemente sólido.

Ecorr: Potencial de corrosión.

EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy (Espectroscopia de Impedancia Electroquímica).

Electrolito: Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los cuales se comportan como un medio conductor eléctrico, también son conocidos como soluciones iónicas.

Escombreras: Sitio donde se depositan los escombros o desechos.

Escoria: Es el óxido que se forma en la superficie de la soldadura.

Esferoidal: Geometría que tiene una forma aproximada a la de la esfera.

Especímenes: Muestra o ejemplar.

FeCl: Cloruro Ferroso.

Fe₂O₃: Óxido de Hierro.

Flexión: Tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

Granulometría: Medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

In-situ: expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar”, y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.

Impermeabilidad: Característica que tienen las superficies de rechazar el agua sin dejarse atravesar por ella.

Inhibidores: Sustancia que detiene o evita una reacción química.

Ion: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

Materiales poliméricos: Es un compuesto formado por diversos polímeros que le dan propiedades específicas.

MDF: Medium Density Fibreboard (Tableros de fibra de densidad media).

Morteros: Mezcla de diversos materiales, como cal o cemento, arena y agua, que se usa en la construcción para fijar ladrillos y cubrir paredes.

NACE: National Association of Corrosion Engineers (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión).

NaCl: Cloruro de Sodio.

NMX: Norma Mexicana.

ONNCCE: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

Pulverulento: Que tiene aspecto de polvo.

RCD: Residuos de la Construcción y Demolición.

SAE: Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores).

SEI: Secondary Electron Image.

SEM-EDS: Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy.

SiO₂: Óxido de Silicio.

SMAW: Shielded Metal Arc Welding (soldadura por arco con electrodo metálico revestido).

Sostenibilidad: Se refiere al equilibrio de una especie con los recursos de su entorno.

Sulfatos: Los sulfatos son las sales o los esteres del ácido sulfúrico.

Tracción: Esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

Vítreo: Hecho de vidrio o que tiene sus propiedades.

RESUMEN

En este trabajo se elaboraron especímenes de concreto armado, sustituyendo la proporción de cemento de la mezcla, por distintas dosificaciones de jal y humo de sílice, para evaluar el fenómeno de corrosión y proponer el uso alternativo de estos residuos sólidos industriales de alto impacto ambiental y gran presencia en el estado. Se llevó a cabo la caracterización de muestras de jal, mediante diferentes técnicas de análisis, tales como difracción de rayos X y microscopía Electrónica de barrido con microanálisis por dispersión de energía de Rayos X (SEM-EDS); donde se observó la presencia de altos contenidos de SiO_2 , lo que define al jal como un material con propiedad de cementante. El jal fue sometido a procesos de reducción de tamaño de partícula por medios mecánicos y posteriormente fue tamizado con la malla No. 200 para obtener partículas de 0.075mm. Para la elaboración de especímenes de concreto se diseñaron distintas dosificaciones (5 %, 10 % y 15 % de aditivo) con un valor de 250 kg/cm². Los especímenes fueron sometidos a técnicas electroquímicas para conocer la velocidad de corrosión por lo que fueron elaborados con dimensiones de 15 x 15 x 15 cm, con dos varillas de acero al carbono AISI 1018 las cuales funcionaron como electrodo de trabajo, con un recubrimiento de 2.5 cm de concreto; en el centro se colocó una barra de grafito que funcionó como contra-electrodo y finalmente como electrodo de referencia se usó un Electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄). Los especímenes elaborados se introdujeron en una cámara de aspersion de cloruros con una solución salina al 5% de NaCl de acuerdo a la norma ASTM B117 y se monitorearon diariamente (30 días) midiendo su potencial de corrosión, mostrando un comportamiento muy similar para los distintos sistemas en comparación al concreto sin la presencia como aditivo de cementante. Para la técnica electroquímica de impedancia los diagramas de Nyquist muestran que el uso de residuo minero como cementante no cambia el proceso de corrosión ni la velocidad de corrosión en comparación con los sistemas con la presencia y ausencia de humo de sílice.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La sociedad ha tenido un gran desarrollo debido a la práctica de infinidad de actividades industriales de alto impacto para el ser humano, una de ellas es la construcción, considerada como la mayor consumidora de materias primas. En ella, son empleados distintos materiales que se asocian con la ingeniería de ciencias de materiales.

La construcción sostenible tiene un especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de los recursos y materiales no perjudiciales, resultando más saludable y reduciendo los impactos ambientales. La aplicación de los criterios de sostenibilidad requiere realizar cambios importantes en la utilización racional de los residuos naturales disponibles [1].

Una estrategia óptima para minimizar el impacto ambiental es utilizar soluciones que disminuyan de manera equilibrada los efectos producidos por los materiales sobre el medio ambiente, es decir, sobre el consumo de energía para producirlos e instalarlos, los residuos que generan durante su fabricación e instalación en obra, así como, la contaminación directa e indirecta que producen.

El acero estructural es utilizado para la fabricación de concreto armado y es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, empleado generalmente para la formación estructural de obras civiles como: puentes, túneles, carreteras o muelles [2].

Con la introducción del concreto reforzado se creía que este material compuesto podía soportar cualquier esfuerzo que le aplicara el medio, sin embargo, desde hace un siglo quedó en evidencia que no era cierto. En un principio esta falta de durabilidad estuvo en la práctica constructiva: compactación o curado inadecuados, recubrimiento insuficiente para las armaduras y pérdidas por las juntas, son ejemplos de prácticas deficientes de tecnología de construcción. Pero en las tres últimas

décadas, la evidencia del crecimiento del deterioro prematuro, en estructuras que fueron construidas de conformidad con el estado del arte de la práctica de la construcción, implica la necesidad de analizar qué ha sucedido con la tecnología del concreto y con los criterios de diseño estructural. También significa que el deterioro prematuro de estructuras de concreto continuará ocurriendo con una velocidad inaceptablemente alta a menos que se realice una mirada más amplia a la práctica habitual de construcción para entender y controlar las causas primarias que afectan la durabilidad del concreto.

El deterioro, como la corrosión de armaduras o el ataque por sulfatos ocurren cuando agua y iones agresivos son capaces de ingresar al interior de la matriz del concreto. Esto se produce cuando se desarrollan interconexiones entre micro-grietas aisladas, grietas visibles y poros. Por lo tanto, el deterioro está estrechamente asociado con la porosidad y el agrietamiento.

Las causas de agrietamiento del concreto son muchas; sin embargo desde el punto de vista de la tecnología de los materiales se encuentran como factores predominantes: el uso de cementos con altas resistencias a edades tempranas y las mezclas de concreto que soportan una elevada velocidad de construcción.

La elaboración del concreto armado parte del concreto hidráulico, el cual consiste en una mezcla de agregados pétreos (grava y arena) y un aglomerante (agua y cemento), que al endurecer forman una roca artificial y este material, a su vez, es combinado con varillas de acero para formar dicho sistema; las estructuras de este sistema, son definidas como estructuras muy duraderas y que requieren de muy poco mantenimiento, sin embargo uno de los problemas más importantes para su integridad es la corrosión del acero de refuerzo [3].

El fenómeno de corrosión afecta significativamente las características funcionales del concreto tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la

integridad estructural y por lo que la preservación de la infraestructura es de vital importancia económica y social para asegurar servicio y seguridad [4].

El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza; por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por el otro, el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de la armadura [5].

El concreto es un material de construcción con el cual es relativamente fácil de trabajar. Sin embargo, es muy débil a la tensión en comparación a su resistencia compresiva. Debido a la baja resistencia de tensión del concreto, se coloca el acero reforzando las zonas de tensión; la combinación del concreto y del acero proporciona un material relativamente económico y durable que se ha utilizado extensamente en la construcción de caminos, puentes y estructuras marinas.

En este trabajo se aprovecharán los residuos industriales de la minería (jales), como sustitución del elemento cementante, para así poder comparar parámetros de corrosión con elementos de concreto elaborados con humo de sílice, los residuos mineros han sido acumulados en diversas zonas de Pachuca, Hidalgo, México como se muestra en la tabla 1 [6].

TABLA 1. Escombreras en diversas zonas de la Ciudad de Pachuca Hidalgo.

Área	Toneladas
Dos Carlos	14 333 492
Porción norte	19 926 123
Porción sur	69 563 307
Velazco	3 836 303
Total	107 659 225

Fuente: Consejo de Recursos Mineros. (1990). Monografía geológico-minera del estado de hidalgo. Primera edición. CRM: Estado de Hidalgo.

1.1 Antecedentes

En los últimos años ha crecido el número de estructuras de concreto con problemas de corrosión en las armaduras, como consecuencia del envejecimiento de construcciones existentes. La pérdida de protección natural ofrecida a la armadura por el recubrimiento de concreto, puede ocurrir a través de diversos mecanismos. En ambos casos, la mayoría de veces, todo el componente estructural es atacado por el medio ambiente externo, sin embargo, la manifestación de la corrosión se da solamente en algunos puntos muy localizados, como resultado de la propia naturaleza del proceso de corrosión [7].

Desde la década de 1960 varios investigadores iniciaron el desarrollo de materiales y métodos para el control de la corrosión. El uso de materiales poliméricos como recubrimientos de la varilla de acero fue ampliamente difundido en los años 70, con la intención de formar una barrera que impidiera el contacto del acero con agentes agresivos y evitar la corrosión; después de evaluaciones de laboratorio y campo de corto tiempo, las varillas cubiertas con polímeros fueron adoptadas hasta que luego de varios años este material de construcción acusó signos de corrosión y algunas limitaciones, por lo que su empleo se cuestionó severamente [8].

Otra opción que se ha ensayado es el uso de sustancias que reduzcan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, las cuales se adicionan durante el mezclado del concreto y se conocen como inhibidores, que ha dado buenos resultados a nivel laboratorio, pero su eficiencia no está comprobada en estructuras reales [9].

Ante las limitaciones encontradas, se recurrió a utilizar un método que ha demostrado gran efectividad en estructuras: la protección catódica. El principio de funcionamiento es una pila galvánica en la que se hace pasar una corriente eléctrica a una pieza metálica para que se comporte como cátodo y así la estructura queda protegida contra la corrosión. Con este método se tiene la ventaja de aplicar la corriente suficiente para la protección, pero requiere un mantenimiento constante [10].

Las estructuras están reforzadas interiormente con varillas de acero, las cuales se cubren de concreto (mezcla de cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12) con el objeto de proporcionar una adecuada resistencia mecánica a la estructura. En condiciones normales, o sea en un medio con atmósfera limpia, no debe ocurrir nada que afecte a la estructura, ya que el concreto es un medio perfectamente compatible con el acero, precisamente por el alto valor del pH.

Uno de los ejemplos más comunes es cuando la estructura de concreto está en contacto frecuente con agua que contenga iones de cloruro (agua de mar), a través de la propia porosidad del concreto puede llegar a las varillas de acero. En este momento se inicia la corrosión del acero. Los productos de corrosión que se van formando como resultado del proceso de corrosión en el acero, por una parte se disminuye la sección transversal de la varilla, y por otra, hace perder la adherencia inicial y deseada entre el acero y el concreto.

1.2 Justificación

El concreto armado o reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más usado en la actualidad, sin embargo presentan el inconveniente de ser susceptibles a fallar debido al desgaste que le produce el fenómeno de corrosión. El control de la corrosión es un elemento sobresaliente en la preservación de la integridad de sistemas, debido a que este fenómeno representa pérdidas económicas elevadas.

En este proyecto de investigación se estudia el comportamiento electroquímico del acero dentro de estructuras de concreto elaborado a base de residuos sólidos mineros que se encuentran en abundancia dentro de nuestro estado sin alguna otra utilidad, como lo son el jal y humo de sílice, los cuales poseen características fisicoquímicas importantes para su uso final, como resistencia, durabilidad y

endurecimiento, por lo que se requiere evaluar los parámetros de resistencia y velocidad de corrosión de estos sistemas en comparación con un concreto convencional.

1.3 Hipótesis

El uso de jal como cementante en los sistemas de concreto reforzado diseñados, tendrá influencia favorable contra la corrosión durante la vida útil del sistema teniendo un desempeño similar a un concreto convencional de resistencia a 250kg/cm^2 y otro con el uso de humo de sílice como aditivo comercial.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Obtener una comparativa entre los sistemas de concreto reforzado, utilizando diferentes dosificaciones de jal, humo de sílice y concreto convencional, al estar expuesto en un ambiente agresivo (altas concentraciones de cloruros), con el uso de técnicas de monitoreo de corrosión, para comprobar la eficiencia de este tipo de sistemas ante los convencionales en parámetros de corrosión, y darle utilidad al residuo minero como aditivo del cementante.

1.4.2 Objetivos particulares

- Elaborar especímenes de concreto reforzado utilizando distintas dosificaciones de jal (5 %, 10 % y 15 %) y especímenes de concreto con humo de sílice con las mismas proporciones.
- Diseñar y manufacturar una cámara de aspersion salina.
- Exponer los especímenes en un medio ambiente agresivo, mediante una cámara que simulará el efecto de aspersion salina.

- Monitorear los especímenes a través de la técnica de potenciales de media celda.
- Monitorear los especímenes con la técnica electroquímica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.
- Efectuar una inspección visual del estado físico de las varillas para dar más validez los resultados obtenidos.

1.5 Estado del arte

Una de las actividades económicas más productivas en el estado de Hidalgo desde el siglo XVI hasta nuestro tiempo, ha sido la minería. Los métodos y procesos para extraer los metales valiosos han generado a través de los años acumulaciones de desechos mineros de jal equivalentes a más de 100 millones de toneladas depositadas en muchas partes de la ciudad y municipios aledaños.

Este tipo de desecho, por sus características físicas y químicas no ha tenido gran utilidad, por el contrario, únicamente ha generado contaminación del aire y ha dificultado el desarrollo de nuevas obras de infraestructura en la ciudad (ver figura 1).



FIGURA 1. Presas de jal en Boulevard Nuevo Hidalgo.

La necesidad de aprovechar estos recursos para mitigar el impacto ambiental es urgente y requiere de una propuesta constructiva eficiente. Su aplicación en la industria de la construcción mediante el diseño de un sistema de concreto reforzado dará apertura a nuevas soluciones. Asimismo, la implementación de estos materiales en diferentes proporciones en la mezcla de concreto puede mejorar sus características mecánicas y aminorar el proceso de corrosión de los sistemas diseñados. Debido a lo anterior, surge el interés por proponer un sistema mejorado que beneficie a la industria de la construcción y permita aprovechar los recursos materiales tan abundantes en el Estado de Hidalgo.

Los jales mineros son el acumulamiento de rocas molidas que quedan después de que los minerales de interés como el plomo, zinc, cobre, oro, plata y otros han sido extraídos de las rocas que los contienen (ver figura 1).. Como resultado de los procesos de molienda, las grandes rocas que contienen los minerales se convierten en las partículas pequeñas de los jales mineros. Estas partículas de material fino a medio (limoso arenoso) de los jales mineros ahora pueden fácilmente ser suspendidas en la atmósfera mediante la acción del viento y ser dispersadas a través del medio ambiente en forma de partículas de polvo. Este polvo de los jales mineros puede contener altas concentraciones de materiales [11].

1.5.1 Antecedentes de las escombreras

El Estado de Hidalgo, a través de 450 años aproximadamente, ha tenido dentro de las actividades más importantes, la minería. El suministro de materia prima a las industrias, electrónica, química, metalúrgica, siderúrgica y de la construcción, ha sido esencial en el desarrollo tecnológico y la modernización del país. Como resultado de la actividad minera, grandes cantidades de desechos minerales fueron acumulados a cielo abierto en la ciudad y sus alrededores de manera arbitraria, pues las zonas de depósito sólo requerían ser predios amplios, de fácil acceso y cercanos a las minas. Fue hasta el 25 de febrero de 2004, fecha en que se aprobó la NOM-141-SEMARNAT-2003 en la cual se establecen los requisitos para caracterización del

sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales, cuando se regularon los procedimientos y se dio mayor importancia al impacto ambiental que los desechos generaban en el proceso de recuperación de metales de valor, los minerales se extraen y se concentran utilizando métodos físicos, posteriormente, se separa por gravimetría la fracción de mineral valiosa económicamente. Los materiales con baja concentración de metal se retiran en forma de lodos que contienen altas cantidades de elementos potencialmente tóxicos (EPT). Los lodos son depositados en tinajas, que en México se denominan “presas de jales o escombreras”. Estos materiales son difíciles de eliminar, ya que pueden permanecer durante décadas en el suelo e incorporarse en la cadena trófica (PROFEPA, 2000). Algunos elementos que se encuentran en los jales de minas son los siguientes: zinc, cadmio, plomo, níquel, molibdeno, telurio y arsénico (Remon, et al., 2005).

En la actualidad, ante las nuevas exigencias del mercado y la constante búsqueda por la sustentabilidad y la protección del medio ambiente mediante la reutilización y el reciclaje de desechos se ha considerado, además de los componentes tradicionales, materiales cementantes suplementarios, fibras metálicas y sintéticas, aire ocluido y aditivos químicos de vanguardia.

1.5.2 Estudios con dosificación de residuos industriales en concreto

Estudios anteriores como en el de Andrés Bonola Hernández diseñaron especímenes de concreto con una resistencia de 250 kg/cm², se sustituyó en no más del 15% con respecto al peso del agregado fino, con escoria de arco de acero eléctrico tipo SMAW, en diferentes dosificaciones y los expusieron en una solución de cloruro de sodio al 3% y sulfato de magnesio al 3% durante 90 días para inducir la corrosión en las varillas de refuerzo tratando de mejorar las propiedades físicas y mecánicas demostrando que dicha escoria reduce la velocidad de corrosión.

Martínez Reyes Jacobo en su tesis de maestría realizó la caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, desperdicio agrícola e industrial y su influencia en la microestructura de pastas y morteros a base de cemento. Se evaluó además la resistencia a la compresión de las pastas y morteros a 1, 3, 7, 14 y 28 días. Los materiales en estudio consistieron en una arcilla regional de la comunidad de Tehuacán, Puebla, ceniza de pergamino de café de Huautla de Jiménez, Oaxaca y Ceniza volátil proveniente de la empresa Admixtec. Los sistemas evaluados permitieron identificar que la generación de silicato de calcio hidratado y la eliminación de hidróxido de calcio producido por el cemento Portland, explica el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las pastas y morteros estudiados.

1.5.3 Estudios de corrosión en concreto y en un ambiente corrosivo con cloruros y sulfatos.

El Doctor Abraham Leonel López León, obtuvo una comparativa de los métodos de curado del concreto reforzado de altas solicitaciones-estructurales referente a su velocidad de corrosión, cuando es expuesto en un ambiente marino, esta caracterización se efectuó por medio de técnicas electroquímicas de monitoreo de corrosión. Los diseños de mezcla con relación agua/cemento ≤ 0.35 tienen un excelente desempeño en términos de vida útil, sometidos a un medio ambiente marino, siempre y cuando se cumpla con los requisitos de fabricación y más importante aún de su curado.

El Dr. Francisco Javier Olguín Coca realizó la caracterización de la resistencia electroquímica en especímenes de concreto con dos varillas embebidas recubiertas con teflón en las puntas salientes para protegerlas y conectar ahí los equipos para las diferentes técnicas electroquímicas.

En el trabajo de la IC. Griselda Santiago Hurtado se estudian especímenes

elaborados con cemento tipo CPC 30 R(cemento normal) y CPC 30 R RS (cemento resistente a sulfatos) evaluando la corrosión en las varillas del concreto armado exponiendo los especímenes a diferentes tipos de sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio y algunos cloruros con un periodo de exposición de 270 días al suelo.

1.5.4 Estudios reutilización de residuos.

La tesis de la Dra. Yamile Rangel Martínez contribuye a generar una adecuada gestión de RCD en México, mediante la caracterización físico-mecánica de los residuos de construcción, demolición y jales de la minería, análisis de reutilización y valorización de estos residuos, se seleccionó la zona metropolitana de Pachuca, Hidalgo, debido a que los métodos constructivos de esta zona son similares a los utilizados en la Ciudad de México, y por ello es factible realizar una adecuada comparación, también demostró la aplicabilidad de los productos obtenidos mediante la selección, trituración y tamizado de los componentes pétreos.

CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS

En éste capítulo se definirán los conceptos básicos de este trabajo para poder comprender mejor el sistema acero-concreto y el fenómeno de corrosión así como para la mejor comprensión del lector sobre este estudio.

2.1 Concreto

El término concreto se deriva del latín “*concretus*” que significa compuesto y se define como un material heterogéneo [12].

El concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado en todo el mundo debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a forma (se puede moldear), función (uso estructural y no estructural) y economía, ya que la tecnología desarrollada a su alrededor hace posible su competencia no solo con las construcciones de piedra y madera, sino también con las de acero.

Su desarrollo se ha visto estrechamente vinculado al del “concreto armado”, debido a que inicialmente se concibió para fines estructurales, pues la asociación de concreto y armaduras o varillas de acero forman un sólido único desde el punto de vista mecánico.

El concreto ofrece, como las piedras naturales, una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción (generalmente, su resistencia a la tracción es del orden de un 10% de su resistencia a la compresión); por lo tanto, es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones. Pero al disponer varillas de acero en las zonas de tracción, se suple esta deficiencia, teniendo entonces una pieza resistente a la flexión. De manera que el “concreto armado” es una pieza artificial que puede resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión, circunstancia que no se da en las piedras naturales.

Las propiedades se estudian con el fin de determinar el diseño de mezcla adecuado (proporcionamiento de los ingredientes) para las condiciones especificadas en un proyecto dado.

En términos generales, el concreto puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland hidráulico) y agua, que une a los agregados (arena y grava, o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión, pues la pasta se endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua (ver figura 2) [13].



FIGURA 2. Componentes del concreto.

2.1.1 Cemento portland

El cemento "Portland" tiene sus orígenes en la cal, a partir de esta, se llega a lo que hoy se conoce como cemento.

Se puede definir al cemento como una sustancia adhesiva capaz de unir fragmentos o masas de materia sólida en un solo cuerpo compacto.

El cemento portland se refiere a un cemento hidráulico calcáreo producido por calentamiento de los óxidos de silicio, calcio, aluminio y hierro.

Esta elaborado en base a rocas calcáreas y arcillas que se extraen de yacimientos a cielo abierto y con yeso, que se incorpora en el proceso de la molienda, para regular el tiempo de fraguado; el proceso de fabricación consiste en tomar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto de la caliza (CaO) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3). El producto resultante denominado polvo crudo ingresa al horno y egresa como Clinker. El proceso se completa con la molienda conjunta del Clinker y yeso, obteniendo el cemento Portland.

Se utilizan dos métodos de manufactura: los procesos mojado y seco.

En ambos procesos se prefiere el circuito cerrado pulverizado en la preparación de los materiales crudos que el circuito abierto de pulverizado porque en el primero las partículas pequeñas o finos son colados y los gruesos del material son regresados; mientras que en el segundo, el material crudo es molido continuamente lo que significa que en lo más fino se consigue el valor deseado.

El proceso mojado fue desplazado por un tiempo por el proceso en seco, pero actualmente empieza a ser adaptado por nuevas plantas debido al control más exacto y el mezclado de los materiales crudos con sus proporciones.

Los cementos portland son cementos hidráulicos cuya clasificación se muestra en la tabla 2 [14].

TABLA 2. Tipos de Cemento Portland.

Tipo	Uso
Tipo I: Normal	Destinado a usos generales: estructuras, pavimentos, bloques, tuberías.
Tipo II: Modificado	Adecuado en general para obras hidráulicas por su calor de hidratación moderado y su regular resistencia a los sulfatos.
Tipo III: Rápida resistencia alta	Recomendable para sustituir al tipo I en obras de emergencia o cuando se desee retirar pronto las cimbras para usarlas un número mayor de veces; adquiere una determinada resistencia, en igualdad de condiciones, en la tercera parte del tiempo que necesita para ello el cemento tipo I, sin embargo, la resistencia final es la misma que la correspondiente al cemento normal.
Tipo IV: De bajo calor de hidratación	Adecuado para la construcción de grandes espesores (presas) porque su calor de hidratación es muy reducido.
Tipo V: De alta resistencia a los sulfatos	Recomendable en cimentaciones expuestas a la acción de aguas sulfatadas y agresivas.

Fuente: Elaboración propia en base a Ho, D. W. S., and Lewis, R. K.. (1987). Carbonation of Concrete and its Prediction. Cement and Concrete Research, Vol. 17 No. 3. 489-504.

2.1.2 Cementante

Los cementantes son aquellos productos que, mezclados con agua y con otros elementos que le dan personalidad al material resultante, experimentan una reacción química que los endurece, y son por tanto el alma de toda obra civil.

Los cementantes se agrupan en tres tipos: los grises, también llamados Portland; los blancos, más usados en arquitectura y acabados y los morteros, cuyo uso más importante es el pegado de blocks y los acabados de obra gris.

Los cementos deben cumplir con las exigencias de la Norma Oficial Mexicana, que además de describirlos, los caracteriza. Así, tenemos que bajo la Norma NMX-C-414-1999 los cementos se conocerán por:

- a. Los componentes básicos que definen el tipo de cemento.
- b. La resistencia mecánica a la compresión, que establece los valores mínimos y máximos y tiempo de fraguado en las clases 30 y 40.
- c. Las características especiales de durabilidad ante agentes agresivos como sulfatos y cloruros y/o pigmentación blanca

2.1.3 Agregados

Generalmente se dividen en dos grupos, finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta los 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla #4 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo del agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60 al 75 % del volumen total del concreto, su selección es importante.

Los agregados deben consistir en partículas con resistencia de exposición a la intemperie adecuada y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto.

Algunas propiedades físicas importantes de los agregados son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. También es de suma importancia la granulometría de los agregados, y el tamaño

máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido.

Los agregados se pueden calificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable, logrando producir, por ejemplo, en gravas más angulosas menor relación de vacíos; pero por otra parte un menor valor de este parámetro reduce la capacidad de compactación [15].

2.1.4 Puzolana

Son materiales de naturaleza silíceo y aluminosa que por sí solos no poseen valor cementante. Sin embargo, reaccionan con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ originado por la hidratación del clínker dando lugar a compuestos con propiedades cementantes. En este grupo, podemos encontrar las puzolanas naturales (generalmente rocas de origen volcánico) y las artificiales, entre las que destacan las cenizas volantes y el humo de sílice. Otras puzolanas artificiales usadas como adiciones activas pueden ser las arcillas activadas o calcinadas artificialmente y cenizas de residuos agrícolas como las de la cáscara de arroz o de la caña de azúcar, con las cuales se han realizado diversos trabajos, utilizándolas como sustituto parcial de cemento [16] [17].

La puzolana recibe su nombre de la población de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, donde ya en tiempos romanos era explotado para la fabricación de cemento puzolánico, el cual es considerado hoy en día como un eco-material.

Más tarde el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la Puzolana de origen natural pueden tener usos sustitutivos.

La civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. De esta forma, uno de los mejores exponentes que podemos encontrar es el Panteón de Roma. Construido en el año 123 d. de C., fue durante 1.500 años la mayor cúpula construida, y con sus 43,3 metros de diámetro aún mantiene records, como la mayor construcción de concreto no armado que existe en el mundo. Para su construcción se mezcló cal, puzolana y agua; añadiendo en las partes inferiores ladrillos rotos a modo de los actuales áridos, aligerando el peso en las capas superiores, usando materiales más ligeros como piedra pómez y puzolana no triturada [18].

2.1.5 Materiales puzolánicos

2.1.5.1 Cenizas volantes

Dentro de los materiales considerados puzolánicos se encuentran las cenizas volantes que resultan de la combustión del carbón mineral pulverizado en las centrales térmicas. Se definen como un polvo fino de partículas, principalmente de forma esférica y no cristalina, las cuales poseen propiedades puzolánicas y cuya composición química se basa principalmente en SiO_2 y Al_2O_3 [19].

2.1.5.2 Humo de Sílice

El humo de sílice es el resultado de la reducción de cuarzo de elevada pureza (SiO_2) con carbón en hornos de arco eléctrico, a temperaturas mayores a 2000 °C. Debido a su finura, varias veces superior a la del cemento, este compuesto mineral en la mezcla de concreto permite una mayor y mejor oclusión de los poros, mejorando la interfase matriz-agregado, y ofreciendo de esta manera un producto más estable, resistente y duradero.

El humo de sílice consiste en partículas esféricas vítreas con una elevada superficie específica, cuya composición química se basa fundamentalmente en SiO_2 (> 90 %) [20].

Es un residuo mineral de gran finura, pulverulento y esferoidal, que se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción antes mencionados siendo una adición mineral activa que actúa sobre el concreto mejorando su resistencia mecánica, disminuyendo el volumen y tamaño de los poros y mejorando su durabilidad, produciendo un doble efecto:

De relleno: Al actuar como consecuencia de su extremada finura (Ver figura 3), como un plastificante al reducir la red porosa.

Puzolanico: Al reaccionar con la cal libre (hidróxido de calcio) de los compuestos del cemento, dando lugar a silicatos cálcicos hidratados (CSH) parecidos a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo con ello una estructura microscópica densa.

Los dos efectos anteriormente descritos, son la razón de las propiedades de impermeabilidad, durabilidad y elevada resistencia del concreto confeccionado con humo de sílice [21].



FIGURA 3. Humo de sílice.

Inicialmente, y durante algunos años, el humo de sílice fue empleado como adición para la elaboración de ladrillos; comenzó añadiéndose en determinadas proporciones a su composición, evidenciándose mediante la cocción propiedades tales como: buena estabilidad volumétrica, dureza y resistencia.

Debido a que la industria del ferrosilicio era considerada una fuente de contaminación importante, a mediados de la década de los 70's se comenzó a recoger el humo de sílice de las fundiciones de silicio, consecuencia de la aplicación de rigurosas leyes para la protección del medioambiente. Hasta entonces, este subproducto pasaba a formar parte de desechos atmosféricos de importantes industrias en Europa y Estados Unidos. En la medida en que fue más riguroso el control de las emisiones se fueron perfeccionando los mecanismos de filtración y captación de estos desechos. En la actualidad, en vez de desecharlo, el reto está en realizar investigaciones para establecer sus posibles aplicaciones y principales ventajas. Cabe decir que entre los primeros países que desarrollaron estudios del tema, sobresalen Noruega y el Reino Unido, donde se desarrollaron investigaciones que demostraron la elevada resistencia y baja porosidad en concretos elaborados con cemento Portland y adiciones de humo de sílice.

A partir de entonces han proliferado las investigaciones en torno al empleo de este material como adición al concreto estructural; constituyéndose en una de las razones más importantes por la que hoy se exhiben por todo el mundo colosales e imponentes obras de ingeniería de elevada resistencia y confiada durabilidad.

El humo de sílice se ha convertido en una de las adiciones minerales más versátiles y apreciables para los productos provenientes de la amplia gama de cementos y concretos.

Actualmente, el consumo mundial de humo de sílice supera los 300 mil millones de toneladas al año. El proceso de fundición del silicio metálico se genera en grandes hornos de arco eléctrico sumergidos. Este proceso inicia con el horno cargado de cuarcita, carbón vegetal, virutas de madera y carbón mineral. El carbón y la cuarcita

utilizados deben ser muy puros y cuidadosamente lavados para eliminar impurezas y sustancias perjudiciales. Esta última es generalmente piedra de río que debe contener más de un 99% de dióxido de silicio. Las proporciones precisas de estos materiales se agregan continuamente por la parte superior del horno, mientras que el metal de silicio se impulsa por la parte inferior.

Los productos provenientes del carbón y la madera proporcionan un ambiente reductor cerca de la parte inferior del horno y fundamentalmente alrededor de los extremos de los electrodos. Los gases calientes, con el aumento de la carga mineral y fundente, y la temperatura elevada en los extremos de los electrodos, volatilizan la cuarcita. Este vapor de dióxido de silicio reacciona con el carbono puro para formar monóxido de carbono, monóxido de silicio, carburo de silicio y, finalmente, silicio metálico. Por otra parte el carbón en la zona de la reducción del horno separa el oxígeno de la mayor parte de monóxido de silicio, de los que algunos escapan a la parte alta del horno; de la reacción entre el monóxido de silicio y el dióxido de silicio se obtiene el HS, que es absorbido y recolectado en la chimenea desde la parte superior del horno por medio de aspiradoras.

La utilización del humo de sílice se realiza en dependencia de su disponibilidad: como polvo densificado o en forma acuosa. Cuando es suministrado a granel, se utilizan equipos similares a los del cemento, debiéndose almacenar en contenedores y silos impermeables adecuadamente identificados, que los protejan de la humedad y de la contaminación.

Para su empleo como adición en el concreto, el humo de sílice no puede contener sustancias perjudiciales en cantidades tales que puedan afectar la durabilidad del material, o causar la corrosión de las armaduras. La Norma ASTM C 1240, reguladora del uso del humo de sílice como adición en el concreto, establece que el contenido de óxido de silicio deberá ser mayor al 85 %. Asimismo, define que la pérdida por ignición y el contenido de humedad deberán ser menores a 6% y 3%, respectivamente. Debe tenerse cuidado en la posible variabilidad de la composición

de esta adición, pues al ser un subproducto industrial ésta podría no ser la correcta, afectándose así las propiedades del concreto.

Entre los ensayos más comunes que se le hacen al humo de sílice se encuentran: distribución del tamaño de partículas y superficie específica, determinación de la composición química, precisión del pH, índice de actividad puzolánica y ensayos de penetración de cloruros.

El concreto mejorado con humo de sílice, puede ser utilizado para elementos de concreto prefabricados y construidos in-situ, teniendo su uso muchas ventajas, entre las que sobresalen: la mejora en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, la ganancia a largo plazo de los niveles de resistencia mecánica (a compresión, flexión y tensión), la menor permeabilidad y por tanto el considerable aumento de la durabilidad, la posible obtención de elevadas resistencias a edades tempranas y la mayor resistencia a la abrasión y al impacto. Asimismo, su uso tiene ciertas desventajas, siendo las más representativas su limitada disponibilidad en el mercado y su elevado costo; sin embargo éstas no detienen su generalizado e inapreciable empleo como adición en el concreto estructural a nivel mundial, en busca de estructuras más resistentes y durables [22].

2.2 Proporcionamiento de la mezcla de concreto

El objetivo de diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso.

El contenido de un buen proporcionamiento y de la relación agua/cemento dependerá de un buen calor de hidratación de la matriz del concreto, mejorando su comportamiento durante la vida útil de la estructura [23].

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla se seleccionan sus características con base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros, a las proporciones físicas del concreto (tales como la resistencia), que se requieran para una estructura.

2.2.1 Relación agua-cemento y la resistencia

Dentro del rango normal de resistencias empleadas en la construcción con concreto, la resistencia a la compresión se relaciona inversamente con una relación agua-cemento, la cual se define como la cantidad de agua de mezclado que se utiliza por unidad de cemento.

En un concreto plenamente compactado y fabricado con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades deseables, bajo condiciones de humedad e hidratación requeridas a lo largo del proceso de producción del concreto, están gobernadas por la calidad y cantidad de los componentes reactivos y al grado al cual se completa la reacción de hidratación.

La diferencia en la resistencia para una relación agua-cemento dada puede ser resultado de cambios en el tamaño de agregado, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez; de la diferencia en los tipos y fuentes de cemento; del contenido de aire incluido; de la presencia de aditivos; y de la duración del periodo de curado [24].

2.2.2 Permeabilidad del concreto

El concreto normal es un material permeable. Los vacíos que dejan los agregados no son llenados totalmente por la mezcla de agua y cemento y además, el agua de mezclado, la cual se utiliza en gran parte para conseguir una manejabilidad del concreto, se evapora en los primeros meses del colado dejando huecos más o menos numerosos [25].

De acuerdo con estos hechos, se podrá disminuir notablemente la permeabilidad del concreto si se atienden los siguientes aspectos de su fabricación por orden de importancia:

- A. Emplear mezclas secas, de baja relación agua-cemento. Los concretos más resistentes son los menos permeables.
- B. Lograr una granulometría con el mínimo de vacíos posible.
- C. Colar el concreto con el uso discreto de vibradores que compacten la mezcla y expulsen parte de las burbujas de aire.

En este punto de permeabilidad es importante tomar en cuenta las características y propiedades del acero ya que en combinación con el cemento y sus agregados formamos un concreto armado que trabaja a tensión y compresión. Y como ya sabemos la permeabilidad puede debilitar esta unión por el fenómeno de corrosión [26].

2.2.3 Fraguado del concreto.

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el endurecimiento de la mezcla.

Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla.

A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final [27].

La determinación de estos dos estados, cuyo lapso comprendido entre ambos se llama tiempo de fraguado de la mezcla, es muy poco precisa y sólo debe tomarse a título de guía comparativa. El tiempo de fraguado inicial es el mismo para todos los tipos de cemento y alcanza un valor de 45 a 60 minutos, el tiempo de fraguado final se estima en 10 horas aproximadamente.

En resumen, puede definirse como tiempo de fraguado de una mezcla determinada, el lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido [28].

Cuando pasa esta reacción de transición de un estado líquido al sólido es necesario que el concreto se hidrate porque es una parte muy importante a la cual coloquialmente llamamos curado en este proceso ya que en este periodo alcanza su resistencia final.

2.2.4 Endurecimiento del concreto

El endurecimiento del concreto depende a su vez del endurecimiento de la pasta formada por el cemento y el agua, entre los que se desarrolla una reacción química que produce la formación de un coloide “gel”, a medida que se hidratan los componentes del cemento.

La reacción de endurecimiento es muy lenta, lo cual permite la evaporación de parte del agua necesaria para la hidratación del cemento, que se traduce en una notable disminución de la resistencia final. Es por ello que debe mantenerse húmedo el concreto recién colado, “curándolo” como se muestra en la figura 4. También se logra

evitar la evaporación del agua necesaria para la hidratación del cemento, cubriendo el concreto recién descimbrado con una película impermeable [29].

Con la proporción adecuada de agregados tanto fino como grueso y la relación de agua- cemento para la resistencia y características que deseamos en nuestro concreto es sumamente importante esta etapa de curado. Ya sea el concreto simple o el concreto reforzado tiene un periodo de curado el cual comienza entre los 45 a 60 minutos y termina a las 10 horas aproximadamente.



FIGURA 4. Etapa de curado acelerado.

2.3 Concreto reforzado

El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero débil en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. La combinación de concreto simple con refuerzo constituye lo que se llama concreto reforzado [30].

Joseph Monier (8 de noviembre de 1823, Saint-Quentin-la-Poterie, Francia -13 marzo 1906, París) fue un jardinero francés y uno de los principales inventores de concreto armado, Monier comenzó a hacer macetas de cemento y tinas, pero estos no eran lo suficientemente estable. Con el fin de fortalecer los contenedores de cemento, experimentó con malla de hierro incrustado. Él no fue el primero en experimentar con concreto armado, pero vio algunas de las posibilidades de la técnica, y promovió ampliamente (Obtuvo su primera patente el 16 de julio de 1867).

2.4 Acero de refuerzo

La mayoría de los aceros estructurales o de refuerzo son en forma de varilla o de alambre. Sus superficies pueden ser lisas o corrugadas. Este último es de empleo más general, porque produce mejor adherencia con el concreto debido a las rugosidades y salientes de la varilla (ver tabla 3).

No olvidemos que todos los materiales se van degradando poco a poco o dicho de otra manera se reincorporan a la naturaleza, y el acero no es la excepción, la metalurgia extractiva inversa nos dice que a esta situación se le conoce como corrosión [31].

TABLA 3. Propiedades de los aceros estructurales.

Resistencia a la tensión o última resistencia	Es el esfuerzo unitario máximo que puede alcanzar en un ensayo a la tensión.
Ductilidad	Es la capacidad del material para ser sometido a deformaciones inelásticas sin ruptura.
Resistencia al Impacto	Es el índice de propensión a las fallas de rotura y se mide por la energía de impacto necesaria para fracturar un espécimen ranurado.
Dureza	Refleja la capacidad de un espécimen liso de absorber energía, como se ha caracterizado por el área bajo la curva esfuerzo–deformación.
Resistencia a la corrosión	No tiene índice específico. Sin embargo, los índices nominales relativos de resistencia a la corrosión se basan en las pendientes de las curvas de pérdida por corrosión (reducción del espesor) contra el tiempo

Fuente: Elaboración propia con base en González, J. A., Andrade, C. (1980). Relaciones Cuantitativas entre la Carbonatación del Hormigón y la Corrosión de las Armaduras. Corrosión Protection, Vol. 11. P 15-24.

2.5 Corrosión

La corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver al estado combinado, es decir, al mismo estado en que se encontraban en la naturaleza, que es, en términos termodinámicos, el estado más estable.

Es definida como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno (ver figura 5). Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión. Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas,

polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, concreto etc.) [32].

Principalmente es un fenómeno electroquímico. Una corriente de electrones que se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química cede y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción.

Para que esto ocurra entre las especies debe existir un diferencial electroquímico, si separamos una especie y su semi-reacción se le denominará semi-par electroquímico, si juntamos ambos semi-pares se formará un par electroquímico. Cada semi-par está asociado a un potencial de reducción (antiguamente se manejaba el concepto de potencial de oxidación). Aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción y viceversa, aquel que exhiba un potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación [33].



FIGURA 5. Comparación del efecto de corrosión en una varilla de acero.

2.6 Oxidación

La oxidación es una reacción química donde un compuesto cede electrones, y por lo tanto aumenta su estado de oxidación. Pero esta acción no se da sola. Cuando un material, pierde electrones, otro debe ganarlos. Al haber este arreglo, siempre está acompañado de la reducción de la otra, dado que los electrones son transferidos entre ellas [34].

Cuando un átomo ha ganado electrones se dice que se ha reducido. Al conjunto de estas reacciones se le llaman oxido-reducción o reducciones redox.

En una reacción redox, a la sustancia que se oxida se le llama ánodo y a la que se reduce se le llama cátodo. La transferencia de electrones que ocurre durante las reacciones de oxidación - reducción también se puede utilizar en forma de electricidad. La rama de la química que se refiere a las reacciones entre la electricidad y las reacciones químicas es la electroquímica [35].

2.7 Celda electroquímica

Una celda electroquímica se compone de un ánodo, un cátodo, y un separador formando una parte anódica y una parte catódica (figura 6). La función del separador es aislar las dos partes al mismo tiempo que le permite a los iones migrar de la parte anódica a la parte catódica. Una salmuera de cloruro de sodio y agua sirve como separador, en donde se introduce la parte anódica y catódica, en este medio salino se lleva a cabo la oxidación del ión cloruro. Los iones de sodio son atraídos hacia el cátodo cargado negativamente y son transportados a través del separador. Si el separador está haciendo un trabajo, todo el cloruro estará contenido en el lado del ánodo de la celda [36].

El agua se reduce en el cátodo y se desprende hidrógeno, el restante ion hidróxido se combina con el ion de sodio para formar una solución de hidróxido de sodio, la cual sale en la parte catódica. El separador ideal mantiene todos los iones de hidróxido en el lado del cátodo de la celda [37].

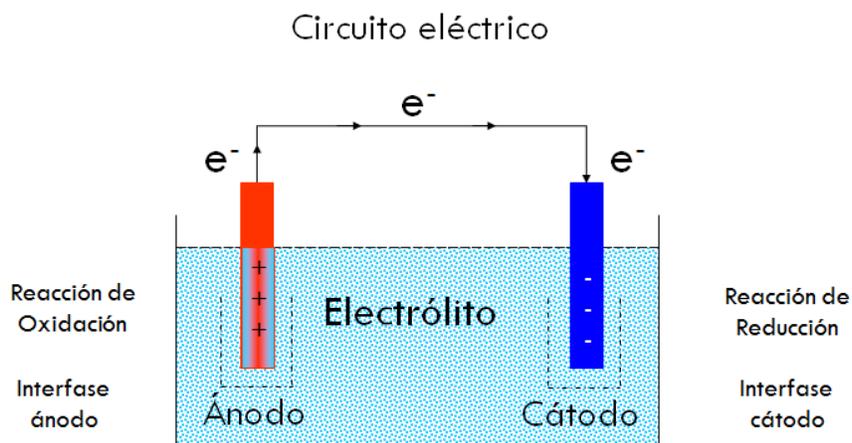


FIGURA 6. Representación gráfica de una celda electroquímica.

2.8 Potencial electroquímico

Se puede considerar a la diferencia de potencial entre dos electrodos de una celda voltaica como la fuerza motriz que impulsa los electrones a través de un circuito externo. Por tanto, se suele denominar a la diferencia de potencial entre los electrodos de una celda como la fuerza electromotriz o potencial electroquímico de equilibrio.

El potencial electroquímico de un metal guarda relación con la carga eléctrica que este alcanza como resultado del equilibrio entre la tendencia de sus átomos a ionizarse, pasando a la disolución, y la de los iones metálicos formados en reducirse, pasando nuevamente a la forma metálica. Este potencial se mide en unidades de volts, y se considera negativo cuando la tendencia a oxidarse es mayor y positiva al contrario.

No todos los metales tienen la misma tendencia a oxidarse, ya que unos son más estables que otros, inclusive, algunos metales que permanecen indefinidamente en su forma elemental. Ahora bien, resulta imposible medir el potencial electroquímico de un metal en valor absoluto. Por lo que, se ha tomado un cero arbitrario el cual corresponde al potencial de Hidrogeno ($2H^+/H_2$) y todos los restantes se miden con respecto a esta referencia [38].

2.9 Electrodo de referencia

En la práctica, los potenciales de un metal no se miden con respecto al de hidrogeno por la dificultad operatoria que entraña su manejo. Se recurre para ello a una serie de electrodos cuyo potencial permanece fijo al estar basados en reacciones reversibles. Son numerosos los electrodos de referencia utilizados en la práctica, pero los más comunes son los de calomelanos (basado en la reacción $Hg/Hg_2Cl_2/KCl$), el de cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$) y el de plata/cloruro de plata ($Ag/AgCl$) [39].

2.10 Norma de potenciales de media celda

Este método de ensayo cubre la estimación del potencial eléctrico de media celda en acero de refuerzo sin revestir en el campo y concreto de laboratorio, con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero de refuerzo.

Este método puede usarse en cualquier momento durante la vida del concreto y está limitado por circuitos eléctricos. La superficie de concreto que se ha secado en la medida en que es un dieléctrico y las superficies que están recubiertas con un material dieléctrico no lo hará proporcionar un circuito eléctrico aceptable. La configuración básica del circuito eléctrico se muestra en la figura 7.

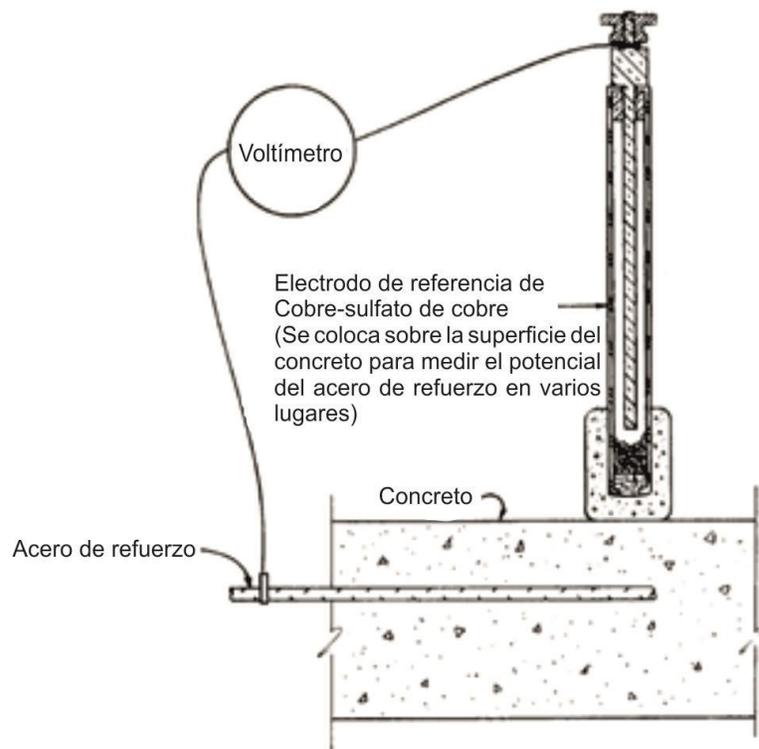


FIGURA 7. Configuración básica del circuito eléctrico de media celda de cobre-sulfato de cobre

El aparato de prueba para realizar este estudio es un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre que consiste en un tubo rígido o un recipiente compuesto de un material dieléctrico que no es reactivo con el cobre o con el sulfato de cobre, un tapón de madera o plástico poroso que permanece húmedo por acción capilar, y una varilla de cobre que se sumerge dentro del tubo en una solución saturada de sulfato de cobre como se puede observar en la figura 8.

La solución deberá estar preparada con cristales de sulfato de cobre de grado reactivo disuelto en agua destilada o desionizada. La solución puede ser considerada saturada cuando un exceso de cristales (no disuelto) se encuentra en la parte inferior de la solución [40].

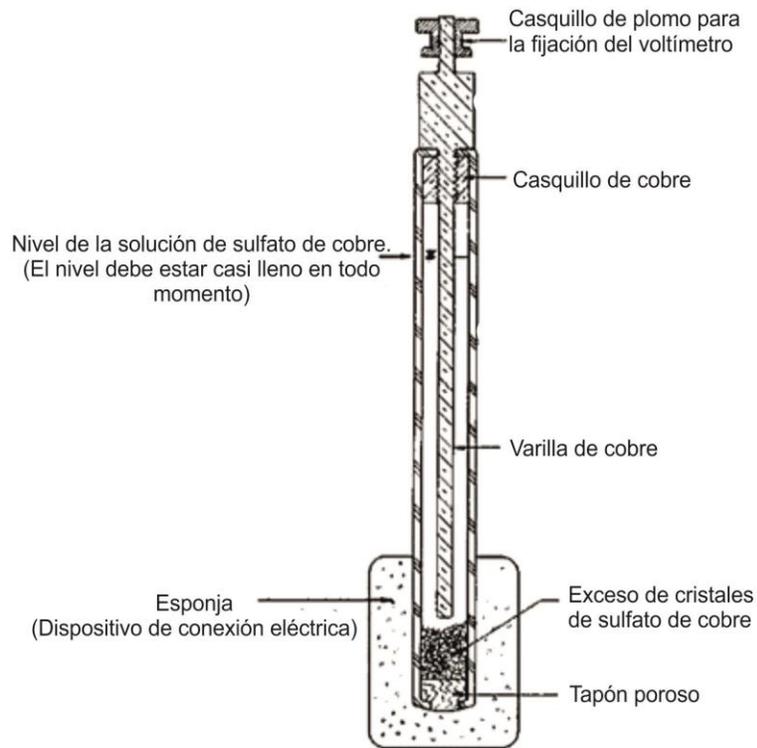


FIGURA 8. Vista seccional de la media celda de cobre-sulfato de cobre

Para la medición de potenciales de corrosión se utilizó un multímetro de alta impedancia, un electrodo de Cu/CuSO_4 (ver figura 9) como electrodo de referencia y las mismas varillas como electrodo de trabajo (ver figura 10).



FIGURA 9. Electrodo de referencia Cu/CuSO_4



FIGURA 10. Instrumentos y accesorios empleados para el monitoreo de potenciales de corrosión.

Procedimiento: El monitoreo de potencial de corrosión se realizó humectando la viga empleando una esponja para ello, después se coloca el electrodo de Cu/CuSO₄ el cual se conecta a la línea positiva del voltímetro y la línea negativa del voltímetro se conecta al cable conectado a la varilla de la viga (ver figura 11).

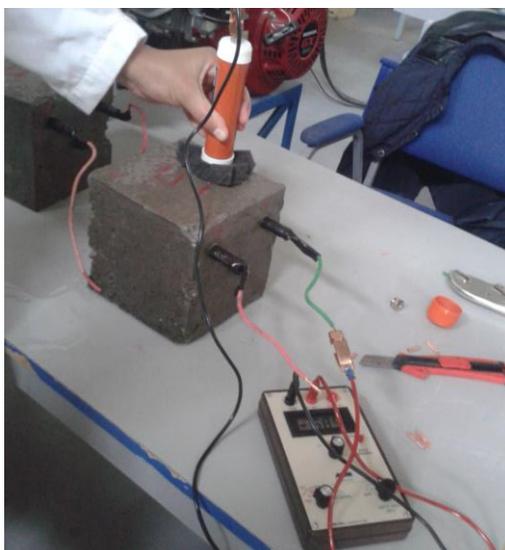


FIGURA 11. Monitoreo de potenciales de corrosión con electrodo de Cu / Cu SO₄

Material y reactivos:

- Conexiones (esponjas, cables, electrodos).
- Agua potable.
- Equipo de corrosión.
- Cables y conectores.
- Eléctrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄).
- Voltímetro de alta impedancia.

2.11 Técnicas electroquímicas

El mecanismo de la corrosión que tiene lugar en una fase acuosa es electroquímico.

Por lo tanto una amplia gama de técnicas electroquímicas han sido desarrolladas a lo largo del tiempo incluyendo dos ventajas principales como son la sensibilidad a bajas velocidades de corrosión y corta duración experimental.

Durante los experimentos electroquímicos los especímenes están polarizados para acelerar el proceso de medición de la corrosión y las mediciones se realizan en cuestión de minutos u horas. Las mediciones de las técnicas electroquímica se utilizan tanto en el laboratorio como en el campo.

Las técnicas de polarizaciones electroquímicas y resistencia a la polarización son las más usadas, además de métodos de extrapolación como lo son curvas de Tafel, métodos cíclico potenciodinámico, métodos potencioestáticas, métodos galvanostáticas, y los métodos galvánicos actuales. Los métodos electroquímicos de polarización se utilizan para controlar la corrosión general y cuantitativamente la corrosión galvánica. También se utilizará para monitorear cualitativamente la corrosión localizada (picaduras y grieta) [41].

2.11.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica

Corriente alterna de impedancia Farádica, resistencia de una interfase electroquímica, es una técnica de corriente alterna, que desde los años 60 ha tenido un vertiginoso avance. El procesamiento de los resultados, control de los experimentos e interpretación de los resultados se ha facilitado mucho con la utilización de los aparatos electrónico-digitales. La corriente alterna puede pasar a través de la interfase metal-disolución, como consecuencia de la reacción electroquímica, corriente faradéica, o debido a la carga y descarga de la doble capa eléctrica, corriente no faradéica; la suma de ambas representa la corriente total [41] [42].

La técnica de Espectroscopia de Impedancia electroquímica, es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (AC) que es aplicada a un electrodo determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial–tiempo y corriente – tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina, “Espectro de Impedancias” [43] [44].

Esta técnica utiliza mediciones de impedancia sobre un intervalo de frecuencias que proporcionan gran cantidad de información en estudios fundamentales de electroquímica, su aplicación a la ciencia de Corrosión es relativamente nueva. En la actualidad, esta técnica se ha implantado de tal manera que ha tenido un enorme impacto en el estudio de diversos problemas de corrosión. La impedancia faradéica,

también llamada espectroscopia de impedancia electroquímica, permite distinguir diferentes procesos que se llevan a cabo en la interfase del electrodo-medio corrosivo; tales como [45] [46]:

- 1) *Transferencia de carga*
- 2) *Adsorción de compuestos*
- 3) *Fenómenos de transporte de materia, entre otros.*

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica, los espectros obtenidos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos equivalentes”.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencia (E) está dada por la ley de ohm.

$$E = I R \quad (2.1)$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente.

$$E = I Z \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior, Z representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. Es necesario hacer notar que a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de CA depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La

frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de hertz (Hz) o número de ciclos por segundo (s⁻¹).

De esta manera, es posible definir la admitancia (Y) de un circuito de CA. La admitancia es un recíproco de la impedancia y es un parámetro de importancia en los cálculos matemáticos que involucra la técnica y por otra parte, los equipos usados en estudios de espectroscopia de impedancia electroquímica miden en realidad la admitancia.

$$Y=1/Z = I/E \quad (2.3)$$

La impedancia de un sistema a cada frecuencia está definida por la razón entre la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. Un listado de estos parámetros a diferentes frecuencias constituye el “espectro de impedancia”. El desarrollo matemático de la teoría que fundamenta la técnica permite describir la impedancia de un sistema en términos de un componente real y un componente imaginario (asociado a la raíz cuadrada de -1) [47].

Unas de las principales ventajas de la técnica de impedancia es que la utilización de una señal periódica proporciona la relación señal-ruido para señales pequeñas, y que a una frecuencia suficientemente baja el módulo de impedancia igualará la resistencia a la polarización.

Comúnmente el comportamiento de los sistemas electroquímicos se caracteriza en términos de circuitos modelo, equivalentes, (ver figura 12), compuestos de elementos pasivos (resistores, capacitores e inductores), un componente dependiente de la frecuencia, impedancia Warburg, donde se encuentran involucrados fenómenos de difusión.

La impedancia de un sistema electroquímico está completamente definida por una magnitud o módulo, |Z|, y un ángulo de fase o argumento, ϕ , como se ve en la figura

13. En electroquímica, las impedancias capacitivas se representan en la parte superior del eje imaginario.

Utilizando notación compleja, el vector impedancia se expresa como en la siguiente ecuación:

$$Z(w) = Z'(w) + jZ''(w) \quad (2.4)$$

Siendo $j = (-1)^{1/2}$, la unidad imaginaria; $w = 2\pi f$, f es la frecuencia impuesta;

$Z' = |Z| \cdot \cos \varphi$, la parte real; y $Z'' = |Z| \cdot \sin \varphi$, la parte imaginaria; representado en la Figura 12.

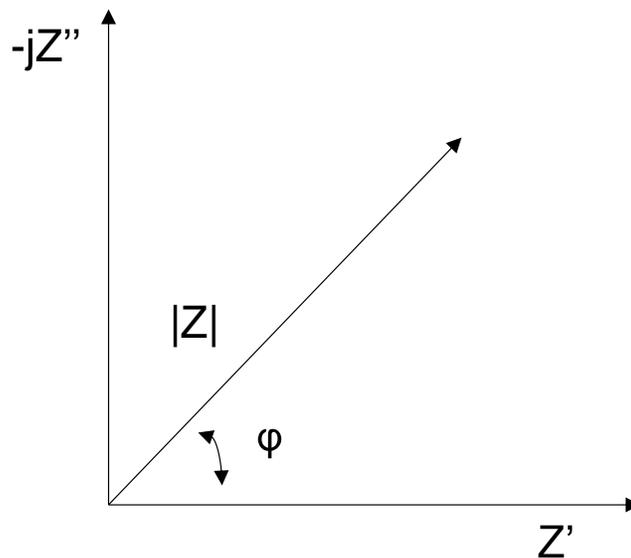


FIGURA 12. Representación del vector de impedancia en coordenadas polares, por medio del módulo $|Z|$ y el ángulo de fase φ , en coordenadas cartesianas, por medio de los componentes Z' y Z'' .

La variación de Z en función de w , cuando se representa en el plano complejo, forma lo que se conoce como diagrama de impedancia, o diagrama de Nyquist, mostrado en la Figura 13. Este último constituye el lugar geométrico de las posiciones

ocupadas por la extremidad del vector Z en su recorrido por el plano complejo [48]. Cada punto del diagrama representa la magnitud y dirección del vector de impedancia a una frecuencia dada.

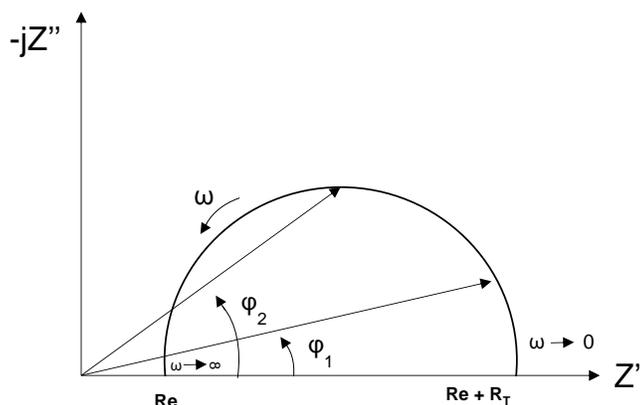


FIGURA 13. El lugar geométrico de la sucesión de puntos por el extremo del vector de impedancia con la frecuencia constituye el diagrama de impedancia.

Para analizar la variación de la impedancia con la frecuencia en un sistema electroquímico es de gran utilidad recurrir al concepto de circuito equivalente, circuito constituido por una hipotética combinación de elementos eléctricos que dé un comportamiento similar al del electrodo estudiado. Randles, la interfase electroquímica se puede representar por una impedancia faradéica, R_T , también llamada resistencia de transferencia de carga, que informa del proceso de corrosión, en paralelo con la doble capa electroquímica, C_d . Finalmente, en serie incluye Re , que simula la resistencia óhmica del sistema metal-medio, lo cual se muestra en la figura 14.

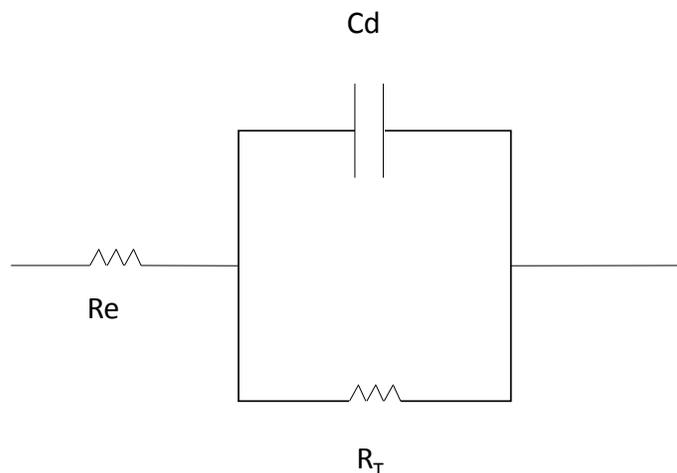


FIGURA 14. Simulación del sistema electroquímico mediante el modelo de Randles de un condensador y una resistencia en paralelo. También incluye la resistencia del electrolito en aire.

La Figura 15 muestra el diagrama de impedancia que dibuja el circuito de Randles de la Figura 14. Es posible demostrar que el diámetro de la circunferencia resulta ser R_T .

El punto de corte de la semicircunferencia con el eje real a frecuencias elevadas, lado izquierdo del diagrama, equivale a R_e .

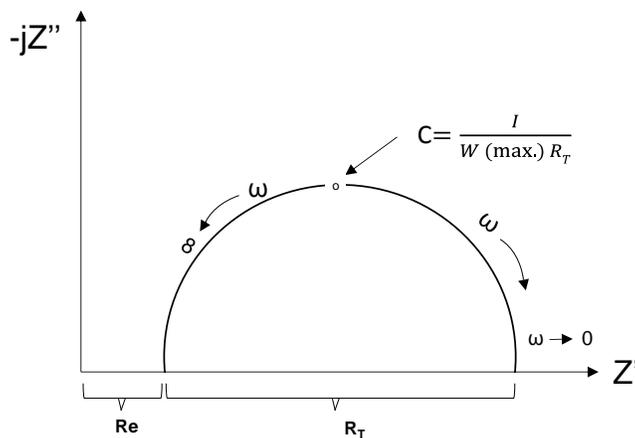


FIGURA 15. Diagrama de impedancia típico, en forma de semicircunferencia, correspondiente al circuito equivalente de Randles (R-C en paralelo).

También resulta fácil demostrar que la frecuencia, ω_{msx} , a la cual la semicircunferencia alcanza el punto más alto en el eje imaginario, está dada por la siguiente ecuación:

$$\omega_{msx} = 1/\tau = 1/R_e C_d \quad (2.5)$$

Siendo τ la constante de tiempo del sistema electrónico. Ello permite calcular la capacidad de la doble capa electroquímica C_d .

Transporte de Masa (Difusión Semi-infinita)

Superpuestos al proceso de corrosión, y enmascarando sus efectos en el diagrama de impedancia, se desarrollan los procesos de difusión, controlados por transferencia de masa. A bajas frecuencias, la difusión puede deformar la parte derecha de la semicircunferencia, obteniéndose diagramas como el de la Figura 16.

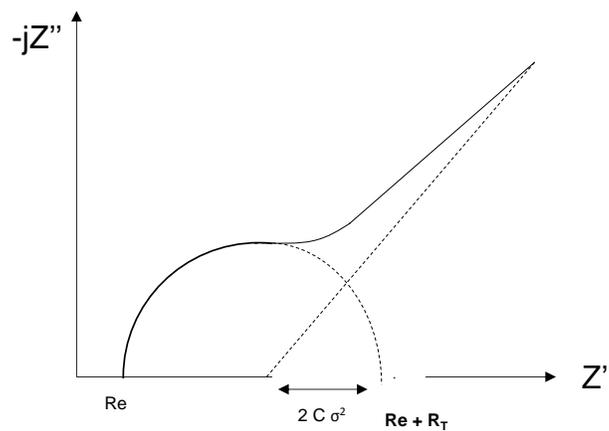


FIGURA 16. Tramo en línea recta de pendiente 45°, que identifica el control por difusión en el diagrama de impedancia.

Los procesos de difusión se deben imaginar en el circuito equivalente en serie con la resistencia de transferencia de carga, y en paralelo con la doble capa. Este

elemento adicional que se incluye en el circuito equivalente, se conoce como impedancia de Warburg, Z_w , mostrada en la figura 17. En forma compleja se escribe como en la ecuación:

$$Z_w = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}}(1 - j) \quad (2.6)$$

Siendo σ el coeficiente de Warburg.

La impedancia de Warburg tiene dos propiedades importantes. Primera, la parte real, Z_w' , y la parte imaginaria, Z_w'' , son iguales y son función lineal de $1/\sqrt{\omega}$; y segunda, el ángulo de fase ($\cot \varphi = Z_w' / Z_w''$) es independiente de la frecuencia e igual a $\pi/4$.

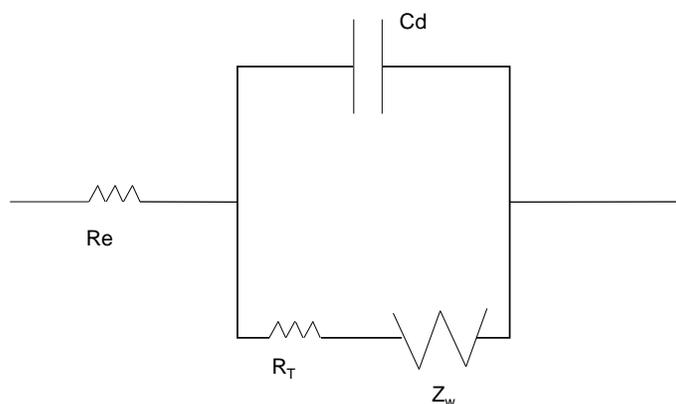


FIGURA 17. Circuito equivalente para el caso de actuar la impedancia de Warburg, Z_w , en serie con la resistencia de transferencia de carga, R_T .

Así pues, la forma del diagrama de impedancia depende de los valores relativos de R_T , C_d y σ , lo cual es una valiosa herramienta para establecer criterios de cinética de corrosión.

Difusión Finita

El tratamiento acabado de realizar ha supuesto que el espesor de la capa de difusión sobre el electrodo es semi-infinito. Sin embargo, en la práctica raramente se cumple

esta hipótesis; sino que, por el contrario, el espesor de la capa de difusión es finito. Por ello se debe introducir un factor de corrección en la ecuación

(2.6). Resultando ser la impedancia de Warburg (ecuación 2.7).

$$Z_w = \text{tanh} (s\sqrt{j\omega/D}) \quad (2.7)$$

Siendo s el espesor de la capa y D el coeficiente de difusión. Dependiendo de los valores de s y D , la cola de difusión, definida a baja frecuencia, inicialmente dependiente de la unidad, se curva hacia el eje real a frecuencia decreciente [49].

El diagrama de impedancia tiene la forma mostrada en la figura 18.

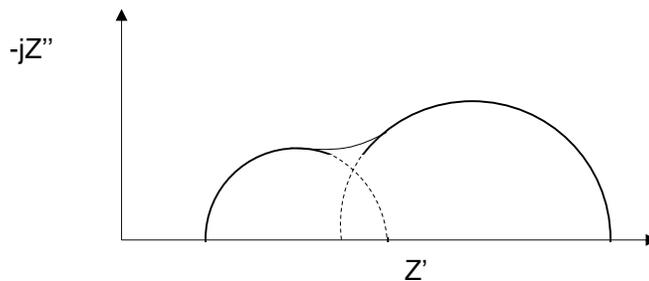


FIGURA 18. Diagrama de impedancia para un control mixto por transferencia de carga y por difusión.

Depresión de la Semi-circunferencia

A menudo, el diagrama de impedancia define una semicircunferencia con el centro situado por debajo del eje real. Los puntos de intersección con dicho eje delimitan una cuerda de longitud inferior al diámetro de la hipotética semicircunferencia, figura 19.

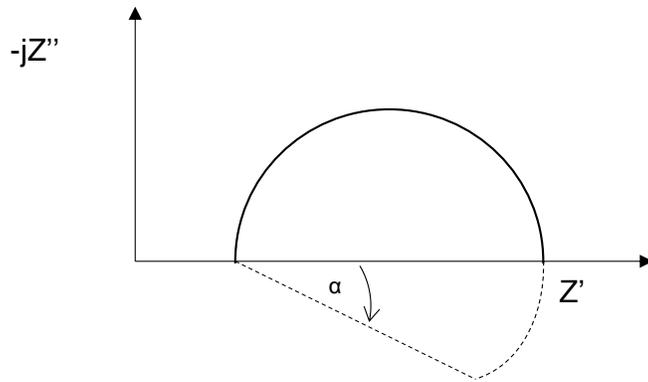


FIGURA 19. El diagrama de impedancia dibuja un arco de circunferencia con el centro debajo del eje real.

El fenómeno, en general, se atribuye a dos factores, a una superficie no uniforme y a una dispersión de la constante de tiempo, T , en torno a un valor medio, T^* . Este fenómeno puede afectar a cualquier parte del trazado del diagrama.

Empíricamente el valor de la constante es (ecuación 2.8) de la forma:

$$F(s)ds = \frac{1}{2\pi} - \frac{\text{sen } \alpha\pi}{\cosh(1-\alpha)(s - \cos \alpha\pi)} ds \quad (2.8)$$

Siendo α el ángulo de depresión; y $s = \ln \frac{T}{T^*}$.

2.12 Técnica de caracterización superficial

Hoy en día, se puede caracterizar un material sólido bajo cualquier forma y en cantidades mínimas, siendo incluso posible llegar a ver un átomo y su envoltura electrónica. Este avance se debe al constante desarrollo de las técnicas instrumentales (basadas en gran parte en conceptos cristalográficos) y a su creciente informatización. Dos han sido los motores de este avance. El primero, la necesidad

creciente de caracterizar nuevos materiales de gran interés económico e industrial, a fin de conocer las relaciones existentes entre estructura y propiedades. Dicho conocimiento permite formular los criterios a seguir en la síntesis de materiales con propiedades físicas y químicas predefinidas. El segundo, la determinación estructural de macromoléculas de interés en biología y bioquímica.

La caracterización de materiales consiste en la obtención de información a partir de la respuesta de un material al ser perturbado por una señal. (Caracterización \neq análisis instrumental). Dicho análisis es necesario para conocer o predecir las propiedades de un material y así valorar su utilidad en diversas aplicaciones dando como resultado su composición, estructura, topología, topografía, morfología y propiedades [50].

Los pasos más importantes en el análisis de una estructura cristalina deben ser llevados a cabo con una atención particular para poder hacer descripciones exactas de la geometría molecular de los compuestos estudiados.

2.12.1 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de

energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

Se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores científicos y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: muestra sólida, conductora. Caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío.

Las aplicaciones del equipo son muy variadas, y van desde la industria petroquímica o la metalurgia hasta la medicina forense [51].

2.12.2 Difracción de rayos x

La difracción de rayos X es una técnica analítica no destructiva y de las más importantes en la caracterización de materiales cristalinos, tales como los metales, cerámicos, polímeros, intermetálicos, minerales, u otros compuestos orgánicos e inorgánicos.

La técnica de rayos X puede ser utilizada para identificar las fases presentes en la muestra, desde materia prima de partida hasta un producto final. Esta técnica ha sido utilizada durante muchas décadas con gran éxito para proporcionar información

precisa sobre la estructura de los materiales. La calidad del patrón de difracción suele ser limitado por la naturaleza y la energía de la radiación disponible, por la resolución del instrumento y por las condiciones físicas y químicas de la muestra. Dado que muchos materiales sólo pueden ser preparados en una forma policristalina, la técnica de difracción de rayos X se convierte en la única opción realista para una determinación de la estructura cristalina de estos materiales.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Una metodología apropiada para el sector de la construcción es la que establece una visión más amigable con el medio ambiente. Con esta mentalidad aprovecharemos los residuos sólidos industriales mejor conocidos como jales o relaves; estos se utilizarán como cementante al 5 %, 10% y 15% y también con humo de sílice en las mismas proporciones.

Para la realización del muestreo fue necesario tomar en cuenta las características mineralógicas y físicas de las escombreras (coloración), por lo cual el muestreo se realizó de forma sistemática sobre los diferentes bancos incluyendo la periferia de la presa para cubrir las tres dimensiones (x, y, z) del jal, la toma de muestras fue de tipo canal con un peso por muestra de 5 kg, aproximadamente con una longitud de 2 m por 0.30 cm. de ancho, tomando un total de 36 muestras representativas.

3.1 Caracterización del Jal

Para la caracterización se realizó el estudio en donde se formó un compuesto, tomando en cuenta la similitud de las muestras de cada escombrera estudiándose por medio de los siguientes métodos: Difracción de rayos X, se realizó en un Difractómetro PHILIPS, modelo X'PERT para este análisis fue necesario preparar la muestra a – 200+270 mallas (74-53 μm). La Microscopía Electrónica de barrido con microanálisis por dispersión de energía de Rayos X (SEM-EDS), se utilizó para realizar el estudio de morfología y compacidad de las partículas de las escombreras, así como el estudio del microanálisis con el objeto de determinar la naturaleza del material estudiado. Se utilizó SEM, marca Jeol, modelo JSM 6300, equipado con EDS. El análisis granulométrico se realizó por vía húmeda, Este análisis se llevó a cabo con tamices estándar (serie Tyler MR.), No. 80,100, 140, 200, 270, 400. Se

tamizó una muestra de 100 g, las fracciones obtenidas se secaron al medio ambiente y posteriormente se pesaron.

3.1.1 Escombreras Dos Carlos

En la tabla 4 se muestra la composición química promedio de la escombrera de Dos Carlos del distrito Pachuca, donde se aprecia que su contenido de sílice es superior al 70 % y su contenido de aluminio es bajo.

Tabla 4. Composición química promedio de la escombrera Dos Carlos.

Elemento	%	Elemento	%
SiO ₂	70.43	P ₂ O ₅	0.12
TiO ₂	0.53	K ₂ O	0.08
Al ₂ O ₃	7.32	CaO	0.69
Fe ₂ O ₃	2.80	Na ₂ O	2.32
MnO	0.73	Ag	55 g Ag /Ton
MgO	0.54	Au	0.58 g Au / Ton

Fuente: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/viewFile/4180/4005>

En la figura 20 se presentan los resultados obtenidos por Difracción de Rayos X, en donde se puede observar la presencia Cuarzo, Argentita, Albita, Berlinita, Ortoclasa, Jarosita de Potasio, Natrojarosita.

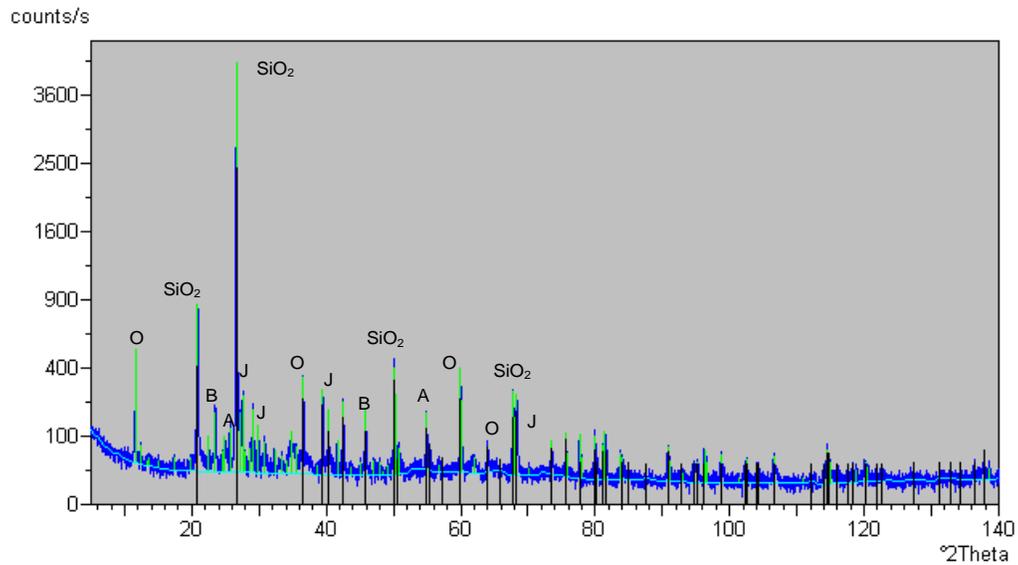


Figura 20. Difractograma de rayos X de las escombreras, cuyas especies minerales principales son: cuarzo (SiO_2), Ortoclasa (O) y albita (A), Berlinita (B) y Jarosita (J).

En la figura 21, se puede apreciar una imagen general de las escombreras las cuales se analizaron por SEM - EDS, en donde se puede observar la presencia de elementos mayoritarios de silicio, azufre, aluminio, potasio, hierro, así como elementos minoritarios plata, magnesio, manganeso y como elementos traza cobre, zinc y plomo.

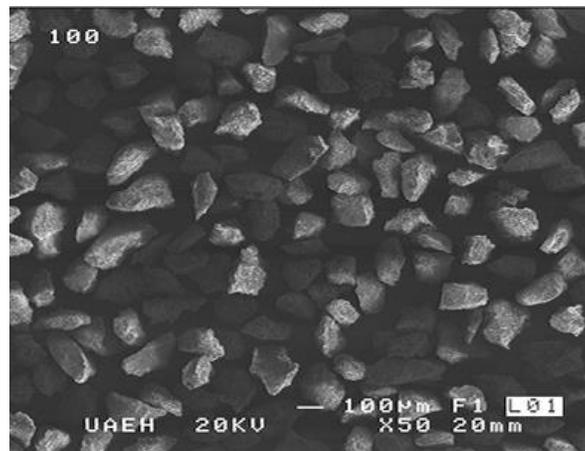


Figura 21. Microfotografía de las escombreras.

3.2 Pulverización

Es una operación consistente en la reducción de tamaño de partícula, los principales objetivos de la pulverización es dotar a los sólidos de una granulometría similar para evitar la segregación de las mezclas y asegurar la distribución homogénea de las partículas (Ver figura 22).



FIGURA 22. Proceso de pulverización mediante la máquina de desgaste de los Ángeles.

3.3 Tamizado

Operación unitaria que tiene por objeto separar las distintas fracciones de una mezcla pulverulenta o granulado en función de su tamaño (ver figura 23).



FIGURA 23. Proceso de tamizado

3.4 Caracterización física de agregados pétreos

Para el diseño de las mezclas de concreto utilizadas en la presente investigación se utilizó el método del ACI 211.1, en el cual se necesita en la primera etapa llevar a cabo una caracterización de las propiedades físicas de los agregados pétreos (finos y gruesos) que se van a utilizar, es muy importante que estos materiales sean de buena calidad ya que ocupan aproximadamente del 60 % a 75 % del volumen del concreto y del 70 % a 85 % en peso, y además influyen considerablemente en las propiedades del concreto tanto en estado fresco (recién mezclado) como endurecido, en las proporciones de la mezcla, y en la economía. Estas características físicas son indispensables para poder utilizar este método y llegar a la dosificación (cantidad de materiales a utilizar) ideal para obtener un concreto de acuerdo a los requerimientos específicos solicitados [52].

Entre las características físicas más importantes que contribuyen a definir la calidad intrínseca de los agregados, destacan los que se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Normativa correspondiente a la caracterización física de agregados.

Características físicas de los agregados	Normativa
Análisis granulométrico	NMX-C-077-ONNCCE-2004
Masa específica y absorción de agua del agregado grueso	NMX-C-164-ONNCCE-2004
Masa específica y absorción de agua del agregado fino	NMX-C-165-ONNCCE-2004
Masa volumétrica	NMX-C-073-ONNCCE-2004

Fuente: NMX-C-111-ONNCCE-2004, “Industria de la construcción–agregados para concreto hidráulico-especificaciones y métodos de prueba”, Mexico, 2004.

Para la determinación de las características físicas de los agregados utilizados en este proyecto, todos las pruebas de laboratorio se realizaron conforme a la normativa ONNCCE y al manual de prácticas de laboratorio de materiales de construcción como se indica en los siguientes párrafos [53].

3.5 Medio Corrosivo

Los especímenes de concreto fueron expuestos a un medio corrosivo (5% NaCl) utilizando una cámara aspersión salina a diferentes tiempos de exposición en los cuales se monitorearon los especímenes (5, 10,15 y 20, días). Se analizó su

comportamiento electroquímico mediante potenciales de corrosión y diagramas de Nyquist. (ASTM B117 Standar practice for operating salt spray (Fog) Apparatus).

3.6 Elaboración de especímenes

Se elaboraron especímenes de concreto con medidas de 15*15*15 cm y que fueron previamente diseñados como se muestra en la figura 24.

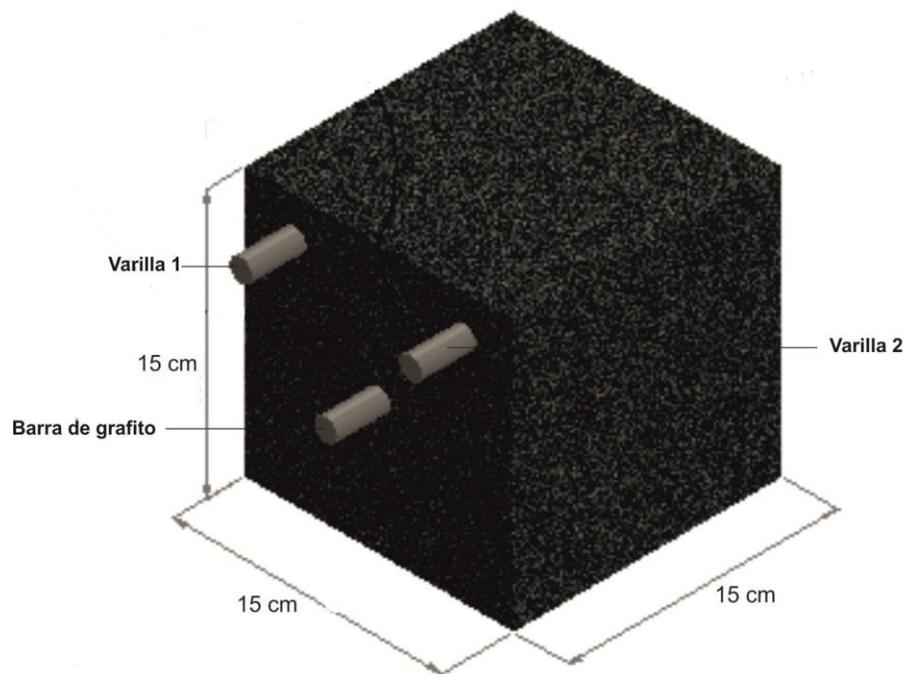


FIGURA 24. Arreglo experimental de los especímenes de concreto.

El acomodo de los especímenes consta de 2 varillas de acero y una barra de grafito, necesarias para las pruebas electroquímicas, entre dos tablas de madera, que posteriormente son ajustadas a una distancia de 15 cm entre ellas dentro de los moldes, como se muestra en la figura 25.



FIGURA 25. Acomodo de las varillas de acero y la barra de grafito para los especímenes.

El residuo minero se utilizó como cementante pasando por la malla 200 con una dosificación de 5 %, 10 % y 15 % en sustitución del cemento portland ordinario para elaborar los especímenes cúbicos realizados con la misma configuración de los electrodos de trabajo y contra- electrodo con cemento ordinario sin ningún agregado puzolánico (ver tablas 6, 7 y 8).

La dosificación y proporcionamiento para la mezcla de concreto con y sin aditivo se realizó a través del programa Concret Union Mix Design que se basa en las normas internacionales establecidas por el Instituto Americano del Concreto (ACI 211.1-91, Reapproved 2009).

TABLA 6. Dosificación de concreto con 5 % de jal.

Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Jal kg/m ³	Relación agua cemento
214.9	309.2	1148.7	439.9	21.5	0.61

Fuente: <http://concrete.union.edu/design.htm>

TABLA 7. Dosificación de concreto con 10 % de jal.

Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Jal kg/m ³	Relación agua cemento
214.88	284.3	1148.7	437.2	41.6	0.61

Fuente: <http://concrete.union.edu/design.htm>

TABLA 8. Dosificación de concreto con 15 % de jal.

Agua kg/m ³	Cemento kg/m ³	Agregado grueso kg/m ³	Agregado fino kg/m ³	Jal kg/m ³	Relación agua cemento
214.88	260.3	1148.7	437.2	60.53	0.61

Fuente: <http://concrete.union.edu/design.htm>

Posteriormente se llevó a cabo la mezcla tomando en cuenta las dosificaciones de los aditivos y los agregados correspondientes como se muestra en la figura 26. Finalmente la mezcla se vierte sobre los moldes antes mencionados (ver figura 27).



FIGURA 26. Revoltura de la mezcla para elaborar especímenes.



FIGURA 27. Especímenes colados.

3.7 Determinación de parámetros de corrosión

Para la determinación de la resistencia a la polarización, el sistema experimental se construyó de la siguiente forma; se utilizó un electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre, como electrodo de referencia, una barra de grafito como contra electrodo, varilla de acero al carbono AISI 1018 como electrodo de trabajo y con un grosor de recubrimiento de 2.5 cm, asegurando la conductividad iónica por medio de una esponja humedecida. El monitoreo se realizó por medio de un potencióstato galvanostato Autolab Mod. PGSTAT30.

3.8 Cámara de aspersion de cloruros

Los cloruros, al igual que los sulfatos, son sales inorgánicas que abundan en la naturaleza, y por ello suelen hallarse presentes en los componentes del concreto, en las aguas y suelos que tienen contacto con las estructuras, e incluso en ciertos ambientes atmosféricos. La influencia del ión cloruro como agente impulsor de la corrosión del acero de refuerzo, deriva de dos efectos principales:

- La adición de cloruros a la solución de poro del concreto que actúa como electrólito, incrementa la conductividad de éste y facilita el movimiento de los iones de hidroxilo (OH)⁻ entre el cátodo y el ánodo.
- Si la cantidad de cloruros alcanza un alto grado de concentración, se producen reacciones químicas que originan puntos de deterioro en la película de pasivación, los cuales al funcionar como ánodos dan lugar a la formación de celdas de corrosión electrolítica.

Los medios más comunes donde se pueden encontrar los iones cloruro, el cual puede desencadenar el proceso de corrosión y por tanto generar grandes pérdidas tanto humanas como económicas, se encuentra principalmente en medios marinos y en los suelos que están en contacto con el agua de mar (costas marinas), sin embargo, en países como Estados Unidos y Canadá, es muy frecuente la corrosión causada por las sales de deshielo utilizadas en las autopistas para retirar la nieve [54].

3.8.1 Diseño y manufactura de la cámara

A los materiales se les realizan diferentes estudios y análisis para determinar sus características y propiedades y así identificar su resistencia a la atmósfera o medio ambiente de trabajo que producen y aceleran su degradación, desgaste, cambios en su estructura y propiedades mecánicas afectando su calidad y desempeño para una aplicación específica. La resistencia a la corrosión es una propiedad de mucha importancia, ya que debido a ella se presentan muchas fallas, como inicios de fracturas, fugas en tanques o conducciones, disminución de resistencia mecánica en estructuras o en partes de máquinas, desviaciones del funcionamiento normal de equipos, contaminación debida a los productos derivados de la corrosión, entre otras [55].

Con base a lo anterior se llevó a cabo el diseño y fabricación de la cámara de aspersión de cloruros; se emplearon diversos materiales de construcción no conductores eléctricos, con buena resistencia mecánica para soportar golpes, lavables, resistentes al agente corrosivo y comerciales para reducir los costos de producción, se empleó MDF (*Medium Density Fibreboard*, tablero de fibra de densidad media) de 9mm con el cual se construyó el contenedor de 120 x 50 x 60 cm, después se le aplicó un recubrimiento interno de resina poliéster ($C_{10}H_8O_4$) con fibra de vidrio clase E (E-glass: vidrio de aluminio-borosilicato con menos de 1% peso/peso de óxidos alcalinos), a la resina poliéster se le agregó un tinte para darle un color blanco. Posteriormente, se realizó la instalación hidráulica de CPVC (Policloruro de vinilo clorado) y se le colocaron los aspersores ubicados al alcance del operador para regular la cantidad de aspersión, el agua se condujo a los aspersores mediante una bomba sumergible con capacidad de 800 litros por hora (ver figura 28), se eligió esta bomba ya que está fabricada de materiales poliméricos y el eje es de cerámica, evitando así que por efecto de los cloruros también sufra el fenómeno de la corrosión. Las bases para la colocación de los especímenes fueron fabricadas de un material polimérico (ver figura 29).

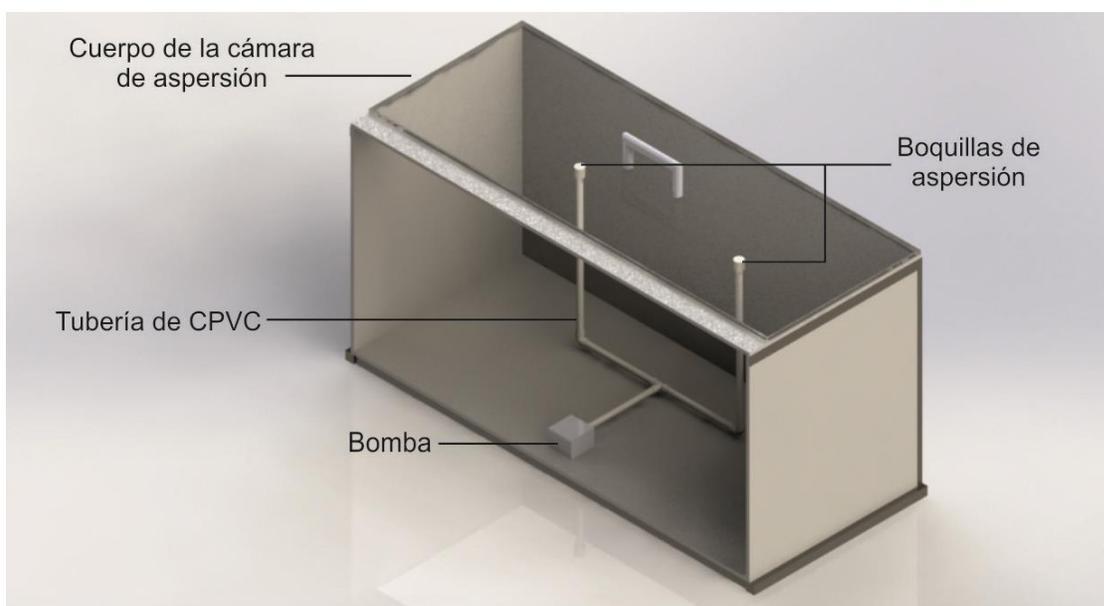


FIGURA 28. Primer vista seccional del diseño de la cámara de aspersión de cloruros.

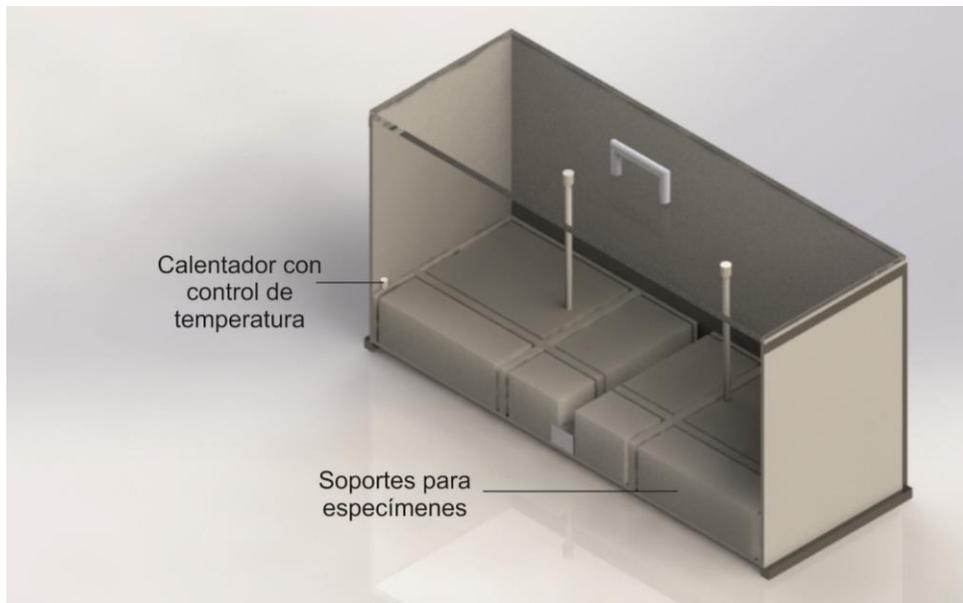


FIGURA 29. Segunda vista seccional del diseño de la cámara de aspersion de cloruros.

El diseño se basó en equipos del mismo tipo disponibles en el mercado, empleando los parámetros establecidos en la norma ASTM B117 (1997) "Salt Spray (fog) Test". Esta cámara de aspersion cumple con los requisitos de las pruebas básicas y continuas de aspersion realizados en una sola temperatura (ver figura 30) [56].



FIGURA 30. Cámara de aspersion de cloruros en funcionamiento.

3.9 Inmersión de especímenes dentro de la cámara de penetración de cloruros.

La figura 31 muestra el momento en que los especímenes de concreto reforzado, que se elaboraron para este trabajo, fueron colocados dentro de la cámara de aspersion para las pruebas electroquímicas posteriores.



FIGURA 31. Especímenes dentro de la Cámara de aspersion de cloruros

3.10 Efecto del ion cloruro sobre la protección que brinda el concreto al acero.

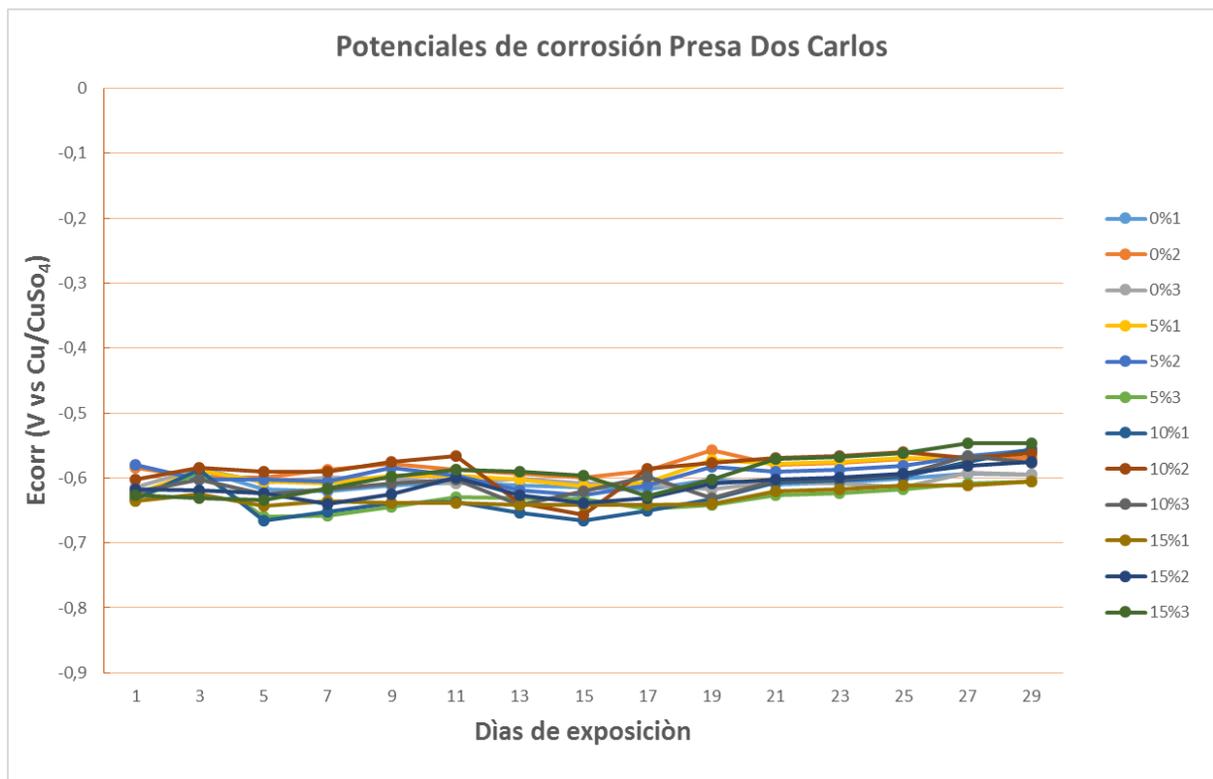
El pH fuertemente básico del concreto (aproximadamente 12,5) conduce a la formación de un "film protector" sobre las armaduras y, en estas condiciones, se dice que el acero está "pasivado"; esto es, aun en presencia de oxígeno y humedad, no se oxida. Los iones cloruro son capaces de "romper" este film pasivante y dejar al acero sin protección, dado que forman un compuesto soluble, el cloruro ferroso (FeCl_2) con los óxidos de hierro que constituyen el film. Una vez que se ha perdido la pasivación, el acero es susceptible de corroerse si están presentes todos los elementos necesarios: oxígeno, humedad y un medio (el concreto) de baja resistividad eléctrica [57].

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Potenciales de Corrosión presa Dos Carlos

4.1.1 Monitoreo de especímenes con jal-varilla 1

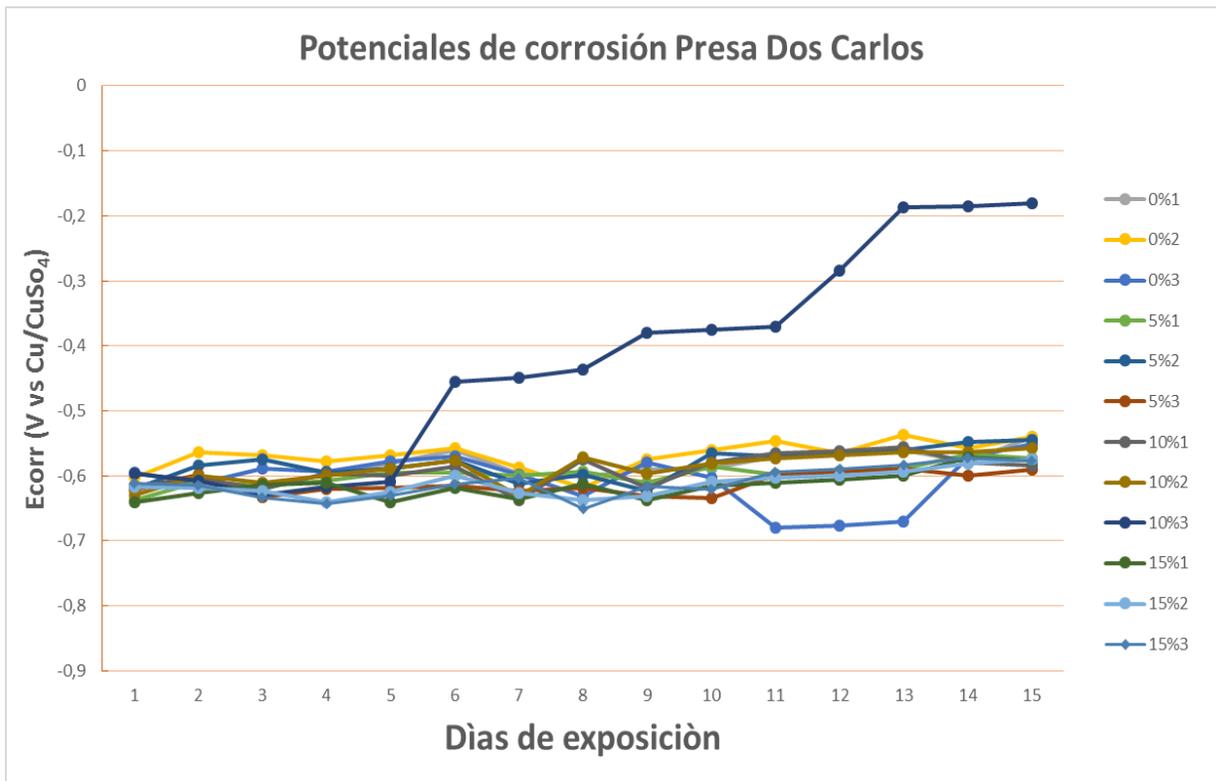
La gráfica 1 muestra los valores de E_{corr} para los distintos sistemas con aditivo de jal Dos Carlos y al evaluar la varilla 1 (0 %, 5 %, 10 % y 15 %) con una repetitividad de tres especímenes, los potenciales no sufren un cambio significativo en comparación del concreto convencional (0 % de jal) y en función del tiempo de exposición (30 días) para los diferentes sistemas en estudio. Por lo que la resistencia a la corrosión al usar jal en distintas proporciones como cementante es similar en comparación a un concreto convencional obteniendo potenciales de $-0.6 \text{ V} \pm 0.05$.



Gráfica 1. Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con Jal Dos Carlos (varilla 1) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersión salina.

4.1.2 Monitoreo de especímenes con jal-varilla 2

En la gráfica 2 se muestran potenciales de corrosión para los distintos sistemas con jal Dos Carlos y al evaluar la varilla 2 (0 %, 5 %, 10 % y 15 %) se realizó un muestreo en tres especímenes para corroborar resultados, los potenciales no sufren un cambio significativo en comparación del concreto convencional en comparación a la varilla 1 y en función del tiempo de exposición para los diferentes sistemas en estudio excepto para el espécimen número 3 con 10% de jal donde se observa un aumento en E_{corr} . Se observa que la resistencia a la corrosión no sufre un cambio significativo en comparación al monitoreo de la varilla 1.

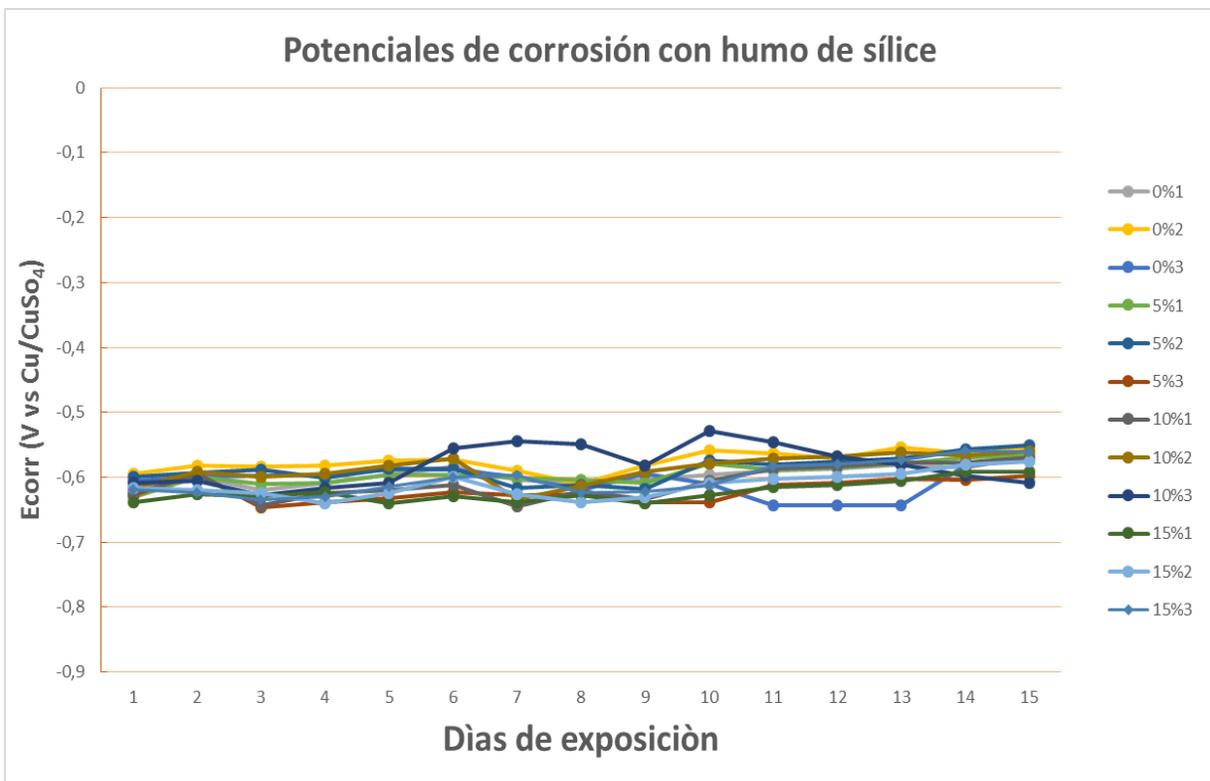


Gráfica 2. Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con Jal Dos Carlos (varilla 2) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersión salina.

4.2 Potenciales de Corrosión humo de sílice

4.2.1 Monitoreo de especímenes con humo de sílice-varilla 1

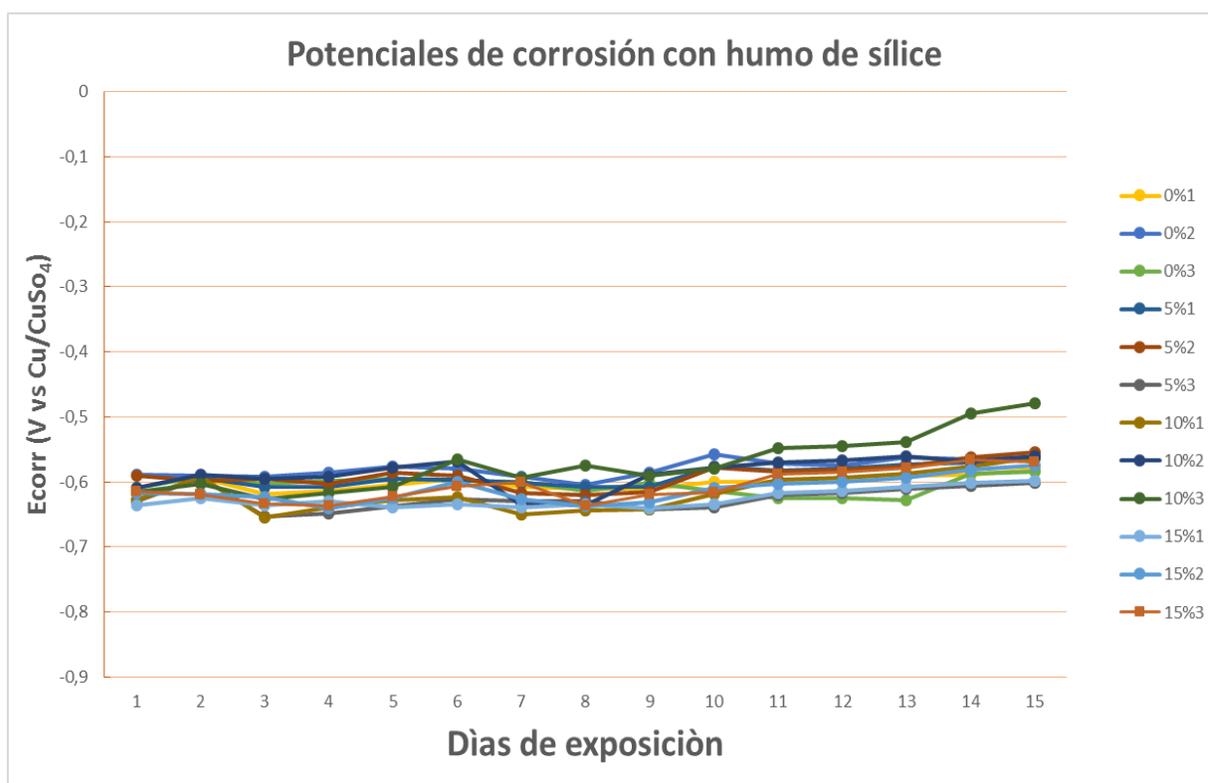
En la gráfica 3 se muestran los valores de E_{corr} para sistemas con humo de sílice, de la misma forma que para los sistemas con jal Dos Carlos se usaron los siguientes porcentajes de sustitución de cementante (0 %, 5 %, 10 % y 15 %) y al evaluar la varilla 1 con una repetitividad de tres especímenes, los potenciales no sufren un cambio significativo en comparación del concreto convencional y en función del tiempo de exposición (30 días). Por lo que la resistencia a la corrosión al usar humo de sílice como cementante es similar en comparación a un concreto convencional obteniendo potenciales de $-0.6 \text{ V} \pm 0.05$.



Gráfica 3. Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con humo de sílice (varilla 1) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersión salina.

4.2.2 Monitoreo de especímenes con humo de sílice-varilla 2

En la gráfica 4 se observa un comportamiento similar de los potenciales de corrosión al evaluar los distintos sistemas con adición de humo de sílice como cementante y al monitorear la varilla 2, ya que los potenciales de corrosión muestran un valor de $-0.6V \pm 0.03$ el cual es similar para todos los sistemas en estudio (0 %, 5 %, 10 % y 15 %) y al evaluar los 3 especímenes.



Gráfica 4. Potenciales de Corrosión obtenidos para sistema con humo de sílice (varilla 2) en función del tiempo de exposición mediante la cámara de aspersion salina.

Con base a los parámetros de corrosión obtenidos de los distintos sistemas podemos determinar que el uso de un aditivo en sustitución del cementante no modifica la resistencia a la corrosión y por lo tanto no hay un aumento en la velocidad de corrosión.

4.3 Impedancia electroquímica

4.3.1 Comportamiento Electroquímico para los sistemas con jal y humo de sílice como aditivo cementante (5 días de exposición).

En la Gráfica 5 se muestran los diagramas de Nyquist de los resultados de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para los sistemas en estudio en ausencia y presencia de aditivo cementante con un tiempo de 5 días de exposición en el ambiente corrosivo. Los espectros muestran un comportamiento similar ya que los valores de impedancia reales e imaginarios no sufren un cambio significativo en comparación con el sistema elaborado como concreto convencional. Los procesos difusivos están presentes, ya que mostraron semicírculos con una tendencia lineal hacia frecuencias más bajas. Esto se puede atribuir, en primer lugar, por transferencia de carga y posteriormente a la difusión de agentes corrosivos en el concreto.

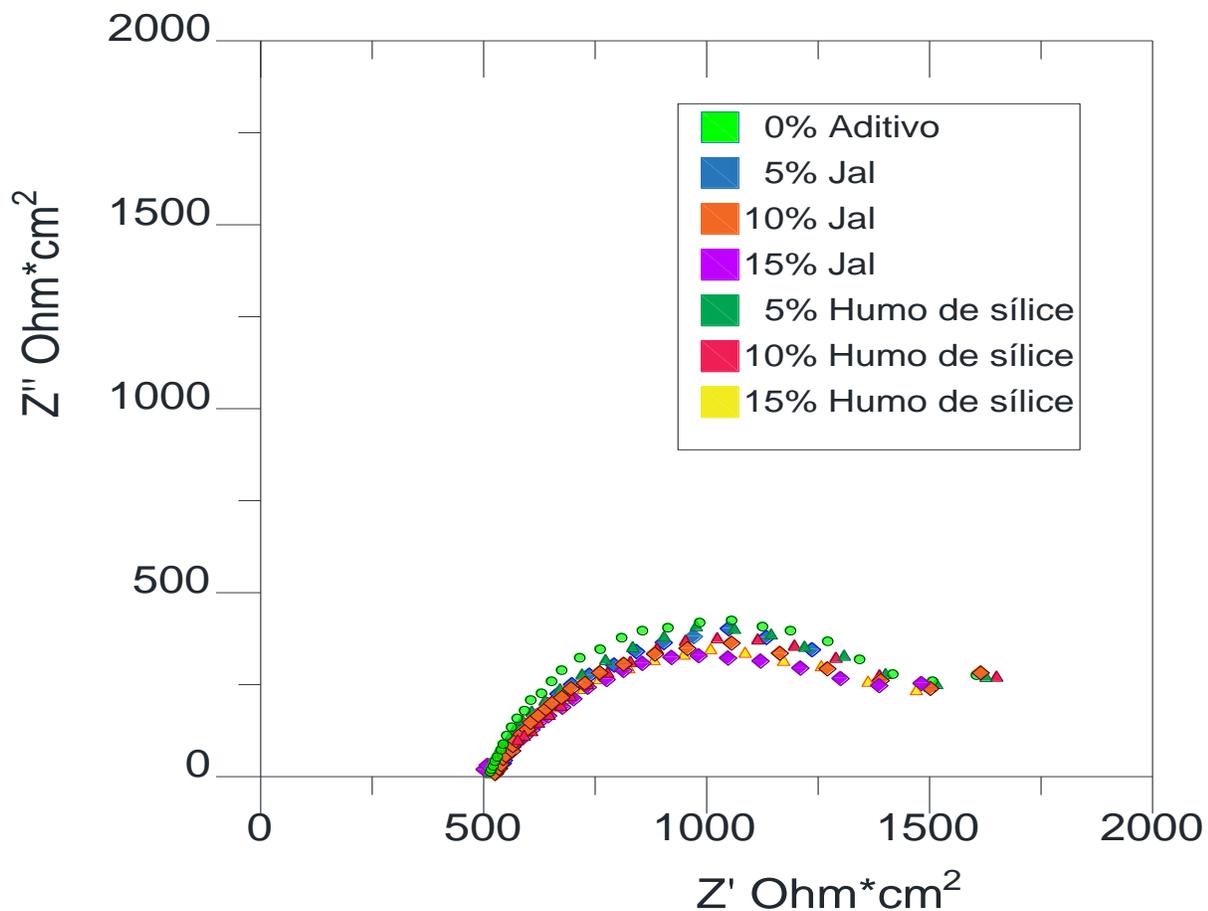


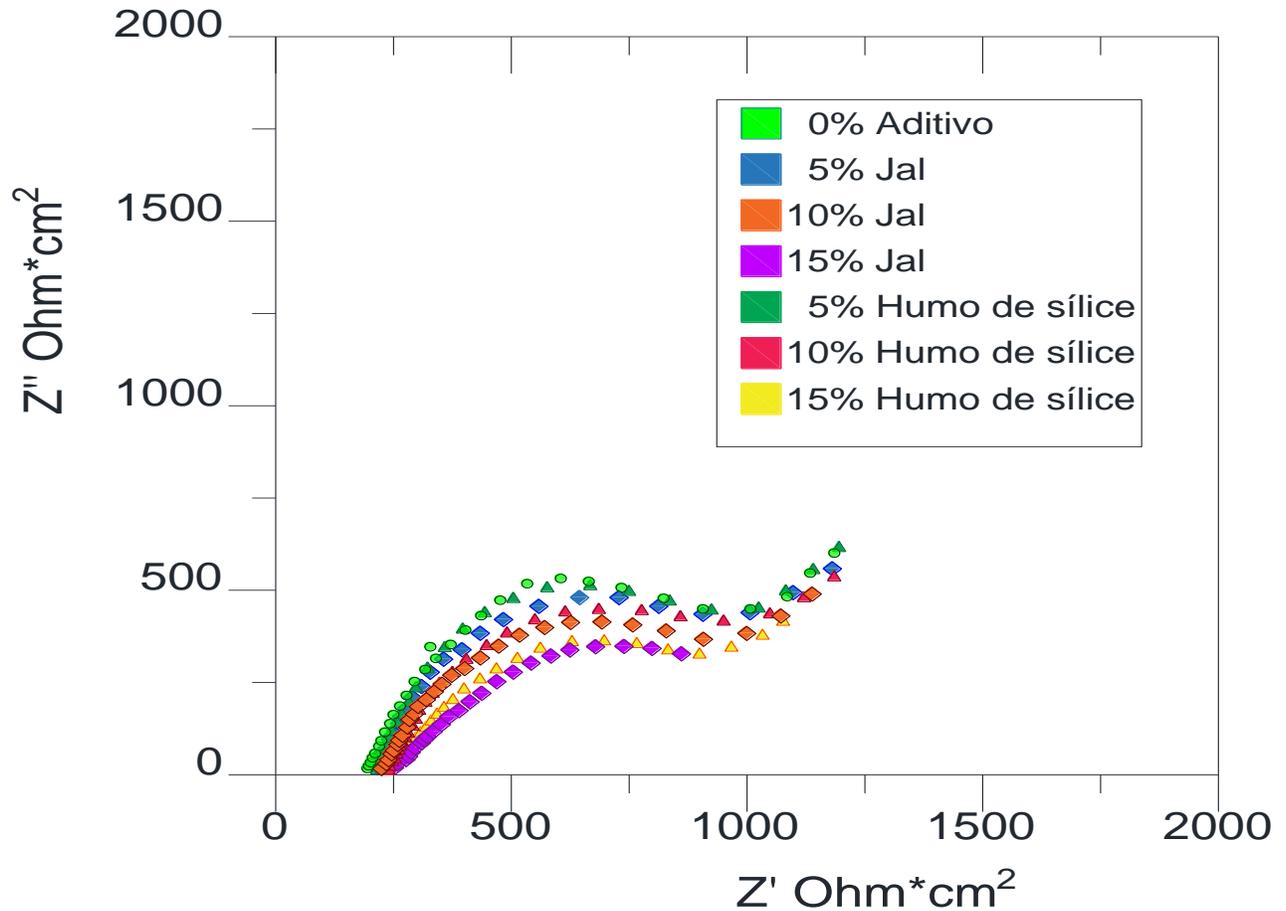
Gráfico 5. Diagramas de Nyquist para los sistemas de acero - concreto en ausencia y presencia de aditivo, con una exposición de 5 días.

4.3.2 Comportamiento Electroquímico para los sistemas con jal y humo de sílice como aditivo cementante (30 días de exposición).

La Gráfica 6 muestra los diagramas de Nyquist de los sistemas estudiados en presencia y ausencia de aditivo cementante con un tiempo de exposición de 30 días. Se observa que los espectros cambian respecto a los sistemas con exposición de 5 días, ya que muestran la formación de semicírculos y a bajas frecuencias una tendencia lineal más marcada, que se atribuye a la difusión de especies en el proceso de corrosión. Por otro lado los valores de impedancia totales disminuyen en comparación con los sistemas con exposición de 5 días indicando que la resistencia

a la corrosión es menor, es decir hay un aumento en la velocidad de corrosión para cada uno de los sistemas monitoreados. La presencia de aditivo cementante (jal y humo de sílice) no modifica el proceso de corrosión en comparación del concreto convencional al estar expuesto a estas condiciones de corrosión acelerada.

Gráfico 6. Diagramas de Nyquist para los sistemas de acero - concreto en ausencia y presencia de aditivo, con una exposición de 30 días.



CONCLUSIONES

- En el diseño de la cámara de aspersión de cloruros se logró cumplir con las necesidades establecidas por la norma NACE B117 (temperatura, concentración de NaCl y control de aspersión), lo que permitió reproducir un ambiente agresivo a nivel laboratorio para obtener un proceso de corrosión acelerado.
- En el diseño de los especímenes de concreto para monitoreo de corrosión, se logró hacer un arreglo experimental que permitió obtener la medición de parámetros electroquímicos para mantener la reproducibilidad, repetitividad y confiabilidad en los resultados.
- Los potenciales de corrosión muestran un comportamiento muy similar, en función del tiempo de exposición, para los distintos sistemas en comparación al concreto sin la presencia de aditivo como cementante.
- En la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica los resultados muestran que el uso de residuo minero como cementante, no cambia el proceso de corrosión ni tampoco la velocidad de corrosión en comparación a los sistemas con la presencia y ausencia de humo de sílice. Por lo tanto se considera viable la reutilización de los residuos mineros en la elaboración de concreto reforzado ya que no muestra un cambio significativo en los parámetros de corrosión comparado a los distintos sistemas estudiados.
- La dosificación de 15 % es la recomendada como reemplazo de cementante, ya que no disminuye la resistencia a la corrosión en comparación con el humo de sílice y con el concreto convencional, además que cumple con la dosificación límite de aditivo de cementante según el documento de Tecnología Avanzada en Concreto para aditivos minerales.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio con mayor tiempo de exposición de los especímenes dentro de la cámara de aspersion de cloruros para obtener parámetros más significativos.
- Realizar una optimización en el diseño de la cámara de aspersion adicionando un control de humedad relativa y mejorar el instrumento de aspersion para que sea más homogéneo, ya que durante esta investigación se tuvieron que ajustar los aspersores para lograr que todos los especímenes tuvieran un rocío uniforme.
- Realizar un estudio de pruebas mecánicas en los especímenes de concreto.
 - a. Resistencia de compresión
 - b. Adherencia pasta - agregado
 - c. Dureza
 - d. Resistencia a la tensión
 - e. Deformabilidad bajo carga
 - f. Modulo de elasticidad
- Realizar un estudio con dosificaciones más altas de aditivo como cementante que las propuestas en este trabajo y con una mezcla de aditivo comercial (humo de sílice) y jal.
- Utilizar un equipo de pulverización con alta eficiencia de reducción de tamaño para bajar los tiempos de molienda.
- Manufacturar los moldes para la fabricación de especímenes con un arreglo electroquímico para facilitar su desmolde.
- Realizar pruebas de caracterización superficial en el acero de refuerzo para validar los resultados.

REFERENCIAS

1. Olguín, L., Gaona, R., Martínez, M., Almeraya, C. (2011). Corrosion Fatigue of Road Bridges: a review, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6, 3438-3451.
2. Rangel Martínez, Y. (2011). Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de la minería: desarrollo de agregados pétreos. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
3. Zamora, B., Gaona, S., Maldonado, B., Barrios, D., Núñez, J., Pérez, Z., Almeraya, C. (2005) Evaluation of the Corrosion at Early Age in Reinforced Concrete Exposed to Sulfates.
4. Reyez, D., Maldonado, A., Bastidas, B., Chacón, M., Bastidas, G. (2011). Corrosion Behavior of Steel Embedded in Ternary Concrete Mixtures. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6. 1892-1905.
5. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1989). A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation. *AIChE Journal*, Vol. 35, No. 10. P 639-1650.
6. Consejo de Recursos Mineros. (1990). Monografía geológico- minera del estado de hidalgo. Primera edición. CRM: Estado de Hidalgo.
7. Maldonado, B., Olguín, F., Zamora, B., Ortiz, C., Zambrano, G. (2011). Electrochemical Characterization of Modified Concretes with Sugar Cane Bagasse Ash. *Int. J. Electrochem, Sci.*, 6. 4915-4926.
8. Maldonado, B. (2008). Estudio electroquímico del acero embebido en concreto con mezclas ternarias, centro de investigaciones de materiales avanzados.
9. Millard, S.G., Gowers K.R., and Bungey, J.H. (1995). Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures, *Corrosion* 95, P 525.
10. Moreno, E.I. (1999). "Carbonation of Blended Cement Concretes", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa.
11. <http://binational.pharmacy.arizona.edu/content/jales-mineros>

12. González, J. A., Andrade, C. (1980). Relaciones Cuantitativas entre la Carbonatación del Hormigón y la Corrosión de las Armaduras. *Corrosion Protection*, Vol 11. P 15-24.
13. Sanchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*, quinta edición. P 341.
14. Alonso, C., Andrade, C. (1987). Corrosion Behavior of Steel During Accelerated Carbonation of Solutions which Simulate the Pore Concrete Solution. *Mat. Constr.*, Vol. 37, No. 206, Madrid. P 5-16.
15. Alonso, C., and Andrade, C. (1993). Life Time of Rebars in Carbonated Concrete. 10th European Corrosion Congress, Barcelona. P 165.
16. Payá J., Monzó J, Borrachero M.V., Serna P. (2002). El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas, Cuba, VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía 2002. Pág. 591-600
17. E. E. Maldonado Bandala y et al., "Electrochemical Characterization of Modified Concretes with Sugar Cane Bagasse Ash", *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol.6, pp. 4915–4926, 2011.
18. <http://www.ecosur.org/index.php/ecomateriales/cemento-puzol%C3%A1nico>
19. UNE-EN 197-1:2000. "Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes".
20. Massazza, F., "Pozzolana and pozzolanic cements". En "Lea's Chemistry of Cement and Concrete" IV Edition. Ed. P.C. Hewlett, pp. 471-631, 1998.
21. Elias, X., *Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A. Madrid, 2da edición. (2012), P. 294.
22. <http://www.imcyc.com/revistacyt/sep11/artingenieria.html>
23. Treybal, R. (2000). *Operaciones de Transferencia de Masa*. McGraw–Hill 2da Edición, México D.F.
24. FDOT "Section 400–Concrete Structures". Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Tallahassee, (1996), P 302-333.

25. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1989). A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation. *AIChE Journal*, Vol. 35, No. 10. P 639-1650
26. Maldonado, B. (2008). Estudio electroquímico del acero embebido en concreto con mezclas ternarias, centro de investigaciones de materiales avanzados.
27. De Ceukelaire, L., Van Nieuwenburg, D. (1993). Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete. *Cem. Concur. Res.*, Vol. 23. P 442-452.
28. Treybal, R. (2000). Operaciones de Transferencia de Masa. McGraw-Hill 2da Edición, México D.F.
29. FDOT "Section 400-Concrete Structures". Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Tallahassee, (1996), P 302-333.
30. Dhir, R. K., Jones, M. R., McCarthy, M. J. (1992). Pulverized-Fuel Ash Concrete: Carbonation-Induced Reinforcement Corrosion Rates." *Proc. Instn. Civ. Engrs Structs & Bldgs.* P 335-342.
31. Chisholm, H. (1911). "Hormigòn (material)". *Enciclopedia Britanica* 11ª edición. Cambridge University Press.
32. Millard, S.G., Gowers K.R., and Bungey, J.H. (1995). Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures, *Corrosion* 95, P 525.
33. Moreno, E.I. (1999). Carbonation of Blended Cement Concretes", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa.
34. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Mats. J.*, Vol. 88 No. 4. P 363-373.
35. Ohga, H., Nagataki, S. (1989). Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, *ACI SP-114*, American Concrete Institute, Vol. 1. Detroit. P 275-294.

36. Reyez, D., Maldonado, A., Bastidas, B., Chacón, M., Bastidas, G. (2011). Corrosion Behavior of Steel Embedded in Ternary Concrete Mixtures. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6. 1892-1905.
37. Ohga, H., Nagataki, S. (1989). Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash. *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-114, American Concrete Institute, Vol. 1. Detroit. P 275-294.
38. Millard, S.G., Gowers K.R., and Bungey, J.H. (1995). Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures, *Corrosion* 95, P 525.
39. Andrade, M. C. *Corrosión y protección metálica*. P. 11-1 Einar Mattson, *Basic corrosion technology for scientists and engineers*. Pp. 20-22
40. ASTM C876-91 (1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
41. H.H. Uhlig and R.W. Revie, *Corrosion and Corrosion Control, An introduction to Corrosion Science and Engineering*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ. Table 2 Electromotive Force Series, used with permission. 1985, p. 28
42. Maldonado, B. (2008). Estudio electroquímico del acero embebido en concreto con mezclas ternarias, centro de investigaciones de materiales avanzados.
43. Millard, S.G., Gowers K.R., and Bungey, J.H. (1995). Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures, *Corrosion* 95, P 525.
44. Lj. Vracar, D. M. Drazic. (1992). Influence of chloride ion adsorption on hydrogen evolution reaction on iron, *J. Electro. Chem.*, 339 269 p.
45. Macdonald, R., Wiley, J. *Impedance Spectroscopy*. 15 a 16 p.
46. Bard A.J., Faulkner, L. (1990). *Electrochemical Methods, Fundamentals and Applications*. Singapore. 34 p.
47. Moreno, E.I. (1999). "Carbonation of Blended Cement Concretes", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa.

48. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Mats. J.*, Vol. 88 No. 4. P 363-373.
49. Singh, M., Gupta, A. (2000) *Corrosion*. 371 p.
50. Rius, J., Piniella, F., Miravittles. (1992). Caracterización de materiales: avances teóricos y experimentales de la metodología de la difracción. Ed. CSIC.
51. <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>
52. Proporciónamiento de mezclas, concreto normal, pesado y masivo (ACI 211.1), Instituto Mexicano del cemento y del concreto, A.C. Primera Edición, México.
53. NMX-C-111-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción-agregados para concreto hidráulico-especificaciones y métodos de prueba", Mexico, 2004.
54. Dan M. Frangopol, y et al., "Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges", *Journal of Computing in Civil Engineering*, (2001).
55. E. Calvo, C. A. Arias, J. I. Ochoa, "Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión," proyecto para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, (2007).
56. ASTM B-117 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus", ASTM International, (1997).
57. *Revista Cemento* Año 6, N° 27, Durabilidad de las estructuras: corrosión inducida por el ión cloruro.



Concrete Mix Design
Absolute Volume Method
SI Units

Non-Air-Entrained

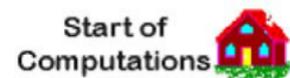
1) SLUMP

Recommended slumps for various types of construction		
Types of construction	Maximum Slump (mm)	Minimum Slump (mm)
Reinforced foundation walls and footings	75	25
Plain footings, caissons, and substructure walls	75	25
Beams and reinforced walls	100	25
Building columns	100	25
Pavements and slabs	75	25
Mass concrete	75	25

Enter (from Table above) slump values:

maximum = mm

minimum =



2) MAXIMUM AGGREGATE SIZE

Enter the nominal maximum size of coarse aggregate = mm

3) MIXING WATER & AIR CONTENT

NON-AIR-ENTRAINED CONCRETE								
Approximate mixing water (kg/m ³) for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	$\frac{1}{5}$
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	11
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	12
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	-
More than 175	-	-	-	-	-	-	-	-
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete (%)								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	$\frac{1}{5}$
All	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Enter (from Table above) water weight for non-air-entrained concrete = kg/m³

Enter (from Table above) amount of entrapped air = %

Volume of water = m³

Volume of air = m³

4) WATER-CEMENT RATIO

Relationship between water-cement or water-cementitious materials ratio and compressive strength of concrete	
Compressive strength at 28 days (MPa)	Water-cement ratio by weight (Non-air-entrained concrete)
40	0.4
35	0.4
30	0.5
25	0.6
20	0.6
15	0.79

Enter compressive strength at 28 days = MPa

Enter (from Table above) water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Important! Check the maximum permissible water-cement ratio from the Table below and revise the water-cement ratio entered in the box above accordingly.

Maximum permissible water-cement or water-cementitious materials ratios for concrete in severe exposure		
Type of Structure	Structure wet continuously and exposed to frequent freezing and thawing	Structure exposed to sea water or sulfates
Thin section (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) and sections with less than 25 mm cover over steel	0.45	0.4 0
All other structures	0.50	0.4

Enter the specific gravity of the cement (if unknown, use 3.15) =

Compute

Weight of cement = kg/m³
Solid volume of cement = m³

Are pozzolanic materials [such as Fly Ash, Silica Fumes, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS)] used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select desired calculation method, and make input in one of the Tables below:

Weight Equivalency Method	Volume Equivalency Method
If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %
If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input checked="" type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text" value="5"/> %

Enter specific gravity of pozzolanic material (if unknown, use 2.4) =

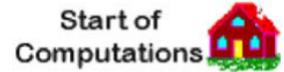
Compute

Adjusted water-cementitious materials ratio (only for volume equivalency method) =

Weight of pozzolanic materials = kg/m³

Weight of cement = kg/m³

Solid volume of cement plus pozzolanic materials = m³



5) COARSE AGGREGATE

Volume of oven-dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate				
Nominal maximum size of aggregate (mm)	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Display Nominal maximum size of aggregate = mm

Enter unit weight of coarse aggregate (if unknown, use 1500 to 1900 kg/m³ for normal weight aggregate) = kg/m³

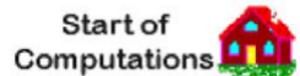
Enter fineness modulus of fine aggregate =

Enter (from Table above) volume of coarse aggregate per unit volume of concrete =

Enter specific gravity (Saturated Surface Dry, SSD) of coarse aggregate (if unknown, use 2.55 to 2.75 for normal weight aggregate) =

Weight of coarse aggregate = kg/m³

Solid volume of coarse aggregate = m³



6) FINE AGGREGATE

Enter specific gravity of fine aggregate (if unknown, use 2.55 to 2.75 for normal weight aggregate) =

Weight of fine aggregate = kg/m³

Solid volume of fine aggregate = m³



7) ADJUSTMENT FOR MOISTURE IN AGGREGATE

Design mix water = kg/m³

Enter total moisture content in coarse aggregate = %

Enter total moisture content in fine aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of coarse aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of fine aggregate = %

Net mix water = kg/m³

Wet weight of coarse aggregate = kg/m³

Wet weight of fine aggregate = kg/m³

Is water reducer (chemical admixture) used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select appropriate input from Table below:

If dosage of water reducer is applied as percentage of cement weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %
If dosage of water reducer is applied as percentage of cementitious materials (cement plus pozzolanic materials) weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %

Enter percent of reduction in water (as given by the manufacturer) due to applied dosage of water reducer = %

Adjusted mix water = kg/m³

Weight of water reducer = kg/m³



8) SUMMARY OF MIX DESIGN

Enter batch percentage = %

Compressive strength at 28 days = MPa

Slump:

maximum = mm

minimum = mm

Nominal maximum size of aggregate = mm

Water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Concrete type is

Air content = %

Unit weight of coarse aggregate = kg/m³

Ingredients of Concrete Mixture

Water kg/m³	Cement kg/m³	Coarse Aggregate kg/m³	Fine Aggregate kg/m³	Pozzolanic Materials kg/m³	Water Reducer kg/m³
<input type="text" value="214.938"/>	<input type="text" value="309.19"/>	<input type="text" value="1148.672"/>	<input type="text" value="439.904"/>	<input type="text" value="21.46"/>	<input type="text"/>

Ingredients of % Concrete Batch

Water kg	Cement kg	Coarse Aggregate kg	Fine Aggregate kg	Pozzolanic Materials kg	Water Reducer kg
<input type="text" value="1.139"/>	<input type="text" value="1.639"/>	<input type="text" value="6.088"/>	<input type="text" value="2.331"/>	<input type="text" value="0.114"/>	<input type="text" value="0"/>



Concrete Mix Design

Absolute Volume Method

SI Units



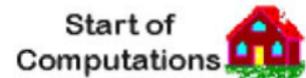
1) SLUMP

Recommended slumps for various types of construction		
Types of construction	Maximum Slump (mm)	Minimum Slump (mm)
Reinforced foundation walls and footings	75	25
Plain footings, caissons, and substructure walls	75	25
Beams and reinforced walls	100	25
Building columns	100	25
Pavements and slabs	75	25
Mass concrete	75	25

Enter (from Table above) slump values:

maximum = mm

minimum =



2) MAXIMUM AGGREGATE SIZE

Enter the nominal maximum size of coarse aggregate = mm

NON-AIR-ENTRAINED CONCRETE								
Approximate mixing water (kg/m ³) for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	-
More than 175	-	-	-	-	-	-	-	-
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete (%)								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
All	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Enter (from Table above) water weight for non-air-entrained concrete = kg/m³

Enter (from Table above) amount of entrapped air = %

Volume of water = m³

Volume of air = m³



4) WATER-CEMENT RATIO

Relationship between water-cement or water-cementitious materials ratio and compressive strength of concrete	
Compressive strength at 28 days (MPa)	Water-cement ratio by weight (Non-air-entrained concrete)
40	0.42
35	0.47
30	0.54
25	0.61
20	0.69
15	0.79

Enter compressive strength at 28 days = MPa

Enter (from Table above) water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Important! Check the maximum permissible water-cement ratio from the Table below and revise the water-cement ratio entered in the box above accordingly.

Maximum permissible water-cement or water-cementitious materials ratios for concrete in severe exposure		
Type of Structure	Structure wet continuously and exposed to frequent freezing and thawing	Structure exposed to sea water or sulfates
Thin section (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) and sections with less than 25 mm cover over steel	0.45	0.40
All other structures	0.50	0.45

Enter the specific gravity of the cement (if unknown, use 3.15) =

Weight of cement = kg/m³

Solid volume of cement = m³

Are pozzolanic materials [such as Fly Ash, Silica Fumes, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS)] used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select desired calculation method, and make input in one of the Tables below:

Weight Equivalency Method	Volume Equivalency Method
If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %
If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input checked="" type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text" value="10"/> %

Enter specific gravity of pozzolanic material (if unknown, use 2.4) =

Adjusted water-cementitious materials ratio (only for volume equivalency method) =

Weight of pozzolanic materials = kg/m³

Weight of cement = kg/m³

Solid volume of cement plus pozzolanic materials = m³



5) COARSE AGGREGATE

Volume of oven-dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate				
Nominal maximum size of aggregate (mm)	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Display Nominal maximum size of aggregate = mm

Enter unit weight of coarse aggregate (if unknown, use 1500 to 1900 kg/m³ for normal weight aggregate) = kg/m³

Enter fineness modulus of fine aggregate =

Enter (from Table above) volume of coarse aggregate per unit volume of concrete =



6) FINE AGGREGATE

Enter specific gravity of fine aggregate (if unknown, use 2.55 to 2.75 for normal weight aggregate) =

Weight of fine aggregate = kg/m³

Solid volume of fine aggregate = m³

7) ADJUSTMENT FOR MOISTURE IN AGGREGATE

Design mix water = kg/m³

Enter total moisture content in coarse aggregate = %

Enter total moisture content in fine aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of coarse aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of fine aggregate = %

Net mix water = kg/m³

Wet weight of coarse aggregate = kg/m³

Wet weight of fine aggregate = kg/m³

Is water reducer (chemical admixture) used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select appropriate input from Table below:

If dosage of water reducer is applied as percentage of cement weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %
If dosage of water reducer is applied as percentage of cementitious materials (cement plus pozzolanic materials) weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %

Enter percent of reduction in water (as given by the manufacturer) due to applied dosage of water reducer = %

Compute

Adjusted mix water = kg/m³

Weight of water reducer = kg/m³



8) SUMMARY OF MIX DESIGN

Enter batch percentage = %

Summarize

Compressive strength at 28 days = MPa

Slump:

maximum = mm

minimum = mm

Nominal maximum size of aggregate = mm

Water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Concrete type is

Air content = %

Unit weight of coarse aggregate = kg/m³

Ingredients of Concrete Mixture

Water kg/m^3	Cement kg/m^3	Coarse Aggregate kg/m^3	Fine Aggregate kg/m^3	Pozzolanic Materials kg/m^3	Water Reducer kg/m^3
<input type="text" value="214.882"/>	<input type="text" value="284.3"/>	<input type="text" value="1148.672"/>	<input type="text" value="437.206"/>	<input type="text" value="41.61"/>	<input type="text"/>

Ingredients of % Concrete Batch

Water kg	Cement kg	Coarse Aggregate kg	Fine Aggregate kg	Pozzolanic Materials kg	Water Reducer kg
<input type="text" value="1.139"/>	<input type="text" value="1.507"/>	<input type="text" value="6.088"/>	<input type="text" value="2.317"/>	<input type="text" value="0.221"/>	<input type="text" value="0"/>



Concrete Mix Design

Absolute Volume Method

SI Units



Non-Air-Entrained

1) SLUMP

Recommended slumps for various types of construction		
Types of construction	Maximum Slump (mm)	Minimum Slump (mm)
Reinforced foundation walls and footings	75	25
Plain footings, caissons, and substructure walls	75	25
Beams and reinforced walls	100	25
Building columns	100	25
Pavements and slabs	75	25
Mass concrete	75	25

Enter (from Table above) slump values:

maximum = mm
 minimum =



2) MAXIMUM AGGREGATE SIZE

Enter the nominal maximum size of coarse aggregate = mm

3) MIXING WATER & AIR CONTENT

NON-AIR-ENTRAINED CONCRETE								
Approximate mixing water (kg/m ³) for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	-
More than 175	-	-	-	-	-	-	-	-
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete (%)								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
All	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Enter (from Table above) water weight for non-air-entrained concrete = kg/m³

Enter (from Table above) amount of entrapped air = %

Volume of water = m³

Volume of air = m³

4) WATER-CEMENT RATIO

Relationship between water-cement or water-cementitious materials ratio and compressive strength of concrete	
Compressive strength at 28 days (MPa)	Water-cement ratio by weight (Non-air-entrained concrete)
40	0.42
35	0.47
30	0.54
25	0.61
20	0.69
15	0.79

Enter compressive strength at 28 days = MPa

Enter (from Table above) water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Important! Check the maximum permissible water-cement ratio from the Table below and revise the water-cement ratio entered in the box above accordingly.

Maximum permissible water-cement or water-cementitious materials ratios for concrete in severe exposure		
Type of Structure	Structure wet continuously and exposed to frequent freezing and thawing	Structure exposed to sea water or sulfates
Thin section (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) and sections with less than 25 mm cover over steel	0.45	0.40
All other structures	0.50	0.45

Enter the specific gravity of the cement (if unknown, use 3.15) =

Weight of cement = kg/m³

Solid volume of cement = m³

Are pozzolanic materials [such as Fly Ash, Silica Fumes, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS)] used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select desired calculation method, and make input in one of the Tables below:

Weight Equivalency Method	Volume Equivalency Method
If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by weight of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %
If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text"/> %	If pozzolanic materials percentage by volume of cementitious material is known, click here <input checked="" type="radio"/> , and Enter this percentage <input type="text" value="15"/> %

Enter specific gravity of pozzolanic material (if unknown, use 2.4) = 2.39

Adjusted water-cementitious materials ratio (only for volume equivalency method) =

Weight of pozzolanic materials = kg/m³

Weight of cement = kg/m³

Solid volume of cement plus pozzolanic materials = m³

5) COARSE AGGREGATE

Volume of oven-dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate				
Nominal maximum size of aggregate (mm)	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Display Nominal maximum size of aggregate = mm

Enter unit weight of coarse aggregate (if unknown, use 1500 to 1900 kg/m³ for normal weight aggregate) = kg/m³

Enter fineness modulus of fine aggregate =

Enter (from Table above) volume of coarse aggregate per unit volume of concrete =

Enter specific gravity (Saturated Surface Dry, SSD) of coarse aggregate (if unknown, use 2.55 to 2.75 for normal weight aggregate) =

Compute

Weight of coarse aggregate = kg/m³

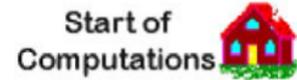
Solid volume of coarse aggregate = m³



Next
Step



Previous
Step



Start of
Computations

6) FINE AGGREGATE

Enter specific gravity of fine aggregate (if unknown, use 2.55 to 2.75 for normal weight aggregate) =

Weight of fine aggregate = kg/m³

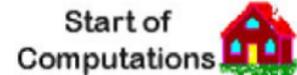
Solid volume of fine aggregate = m³



Next
Step



Previous
Step



Start of
Computations

7) ADJUSTMENT FOR MOISTURE IN AGGREGATE

Design mix water = kg/m³

Enter total moisture content in coarse aggregate = %

Enter total moisture content in fine aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of coarse aggregate = %

Enter the degree of moisture absorption of fine aggregate = %

Net mix water = kg/m³

Wet weight of coarse aggregate = kg/m³

Wet weight of fine aggregate = kg/m³

Is water reducer (chemical admixture) used in the mix?

* NO, [click heretoproceedwithregularmixdesign.](#)

* YES, select appropriate input from Table below:

If dosage of water reducer is applied as percentage of cement weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %
If dosage of water reducer is applied as percentage of cementitious materials (cement plus pozzolanic materials) weight, click here <input type="radio"/>	Enter this percentage <input type="text"/> %

Enter percent of reduction in water (as given by the manufacturer) due to applied dosage of water reducer = %

Adjusted mix water = kg/m³

Weight of water reducer = kg/m³



8) SUMMARY OF MIX DESIGN

Enter batch percentage = %

Compressive strength at 28 days = MPa

Slump:

maximum = mm

minimum = mm

Nominal maximum size of aggregate = mm

Water-cement (or water-cementitious materials) ratio =

Concrete type is

Air content = %

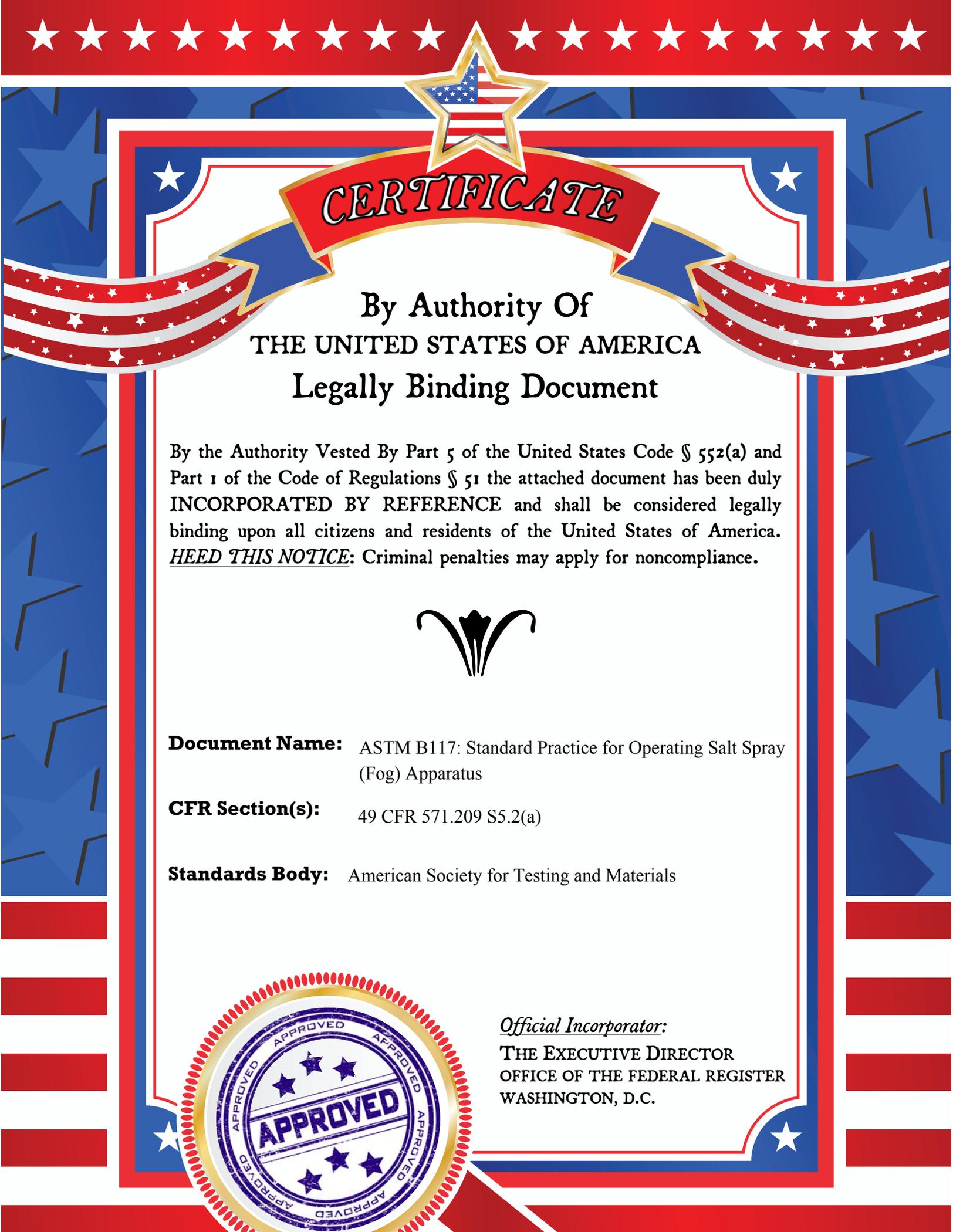
Unit weight of coarse aggregate = kg/m³

Ingredients of Concrete Mixture

Water kg/m³	Cement kg/m³	Coarse Aggregate kg/m³	Fine Aggregate kg/m³	Pozzolanic Materials kg/m³	Water Reducer kg/m³
<input type="text" value="214.882"/>	<input type="text" value="260.28"/>	<input type="text" value="1148.672"/>	<input type="text" value="437.206"/>	<input type="text" value="60.53"/>	<input type="text"/>

Ingredients of % Concrete Batch

Water kg	Cement kg	Coarse Aggregate kg	Fine Aggregate kg	Pozzolanic Materials kg	Water Reducer kg
<input type="text" value="1.139"/>	<input type="text" value="1.379"/>	<input type="text" value="6.088"/>	<input type="text" value="2.317"/>	<input type="text" value="0.321"/>	<input type="text" value="0"/>



CERTIFICATE

By Authority Of THE UNITED STATES OF AMERICA Legally Binding Document

By the Authority Vested By Part 5 of the United States Code § 552(a) and Part 1 of the Code of Regulations § 51 the attached document has been duly **INCORPORATED BY REFERENCE** and shall be considered legally binding upon all citizens and residents of the United States of America. ***HEED THIS NOTICE:*** Criminal penalties may apply for noncompliance.



Document Name: ASTM B117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus

CFR Section(s): 49 CFR 571.209 S5.2(a)

Standards Body: American Society for Testing and Materials



Official Incorporator:

THE EXECUTIVE DIRECTOR
OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER
WASHINGTON, D.C.



Standard Method of SALT SPRAY (FOG) TESTING¹

This Standard is issued under the fixed designation B 117; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval.

This method has been approved by the Department of Defense to replace method 811.1 of Federal Test Method Standard No. 151b and for listing in DoD Index of Specifications and Standards. Future proposed revisions should be coordinated with the Federal Government through the Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, Mass. 02172.

1. Scope

1.1 This method sets forth the conditions required in salt spray (fog) testing for specification purposes. Suitable apparatus which may be used to obtain these conditions is described in Appendix A1. The method does *not* prescribe the type of test specimen or exposure periods to be used for a specific product, nor the interpretation to be given to the results. Comments on the use of the test in research will be found in Appendix A2.

NOTE 1—This method is applicable to salt spray (fog) testing of ferrous and non-ferrous metals, and is also used to test inorganic and organic coatings, etc., especially where such tests are the basis for material or product specifications.

2. Apparatus

2.1 The apparatus required for salt spray (fog) testing consists of a fog chamber, a salt solution reservoir, a supply of suitably conditioned compressed air, one or more atomizing nozzles, specimen supports, provision for heating the chamber, and necessary means of control. The size and detailed construction of the apparatus are optional, provided the conditions obtained meet the requirements of this method.

2.2 Drops of solution which accumulate on the ceiling or cover of the chamber shall not be permitted to fall on the specimens being tested.

2.3 Drops of solution which fall from the specimens shall not be returned to the solution reservoir for respraying.

2.4 Material of construction shall be such that it will not affect the corrosiveness of the fog.

3. Test Specimens

3.1 The type and number of test specimens to be used, as well as the criteria for the evaluation of the test results, shall be defined in the specifications covering the material or product being tested or shall be mutually agreed upon by the purchaser and the seller.

4. Preparation of Test Specimens

4.1 Metallic and metallic-coated specimens shall be suitably cleaned. The cleaning method shall be optional depending on the nature of the surface and the contaminants, except that it shall not include the use of abrasives other than a paste of pure magnesium oxide nor of solvents which are corrosive or will deposit either corrosive or protective films. The use of a nitric acid solution for the chemical cleaning, or passivation, of stainless steel specimens is permissible when agreed upon by the purchaser and the seller. Care shall be taken that specimens are not recontaminated after cleaning by excessive or careless handling.

4.2 Specimens for evaluation of paints and other organic coatings shall be prepared in accordance with applicable specification(s) for the material(s) being tested, or as agreed upon by the purchaser and supplier. Otherwise, the test specimens shall consist of steel meeting the requirements of ASTM Methods D 609 for Preparation of Steel Panels for Testing

¹ This method is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals, and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved March 29, 1973. Published June 1973. Originally published as B 117 - 39 T. Last previous edition B 117 - 64.

Paint, Varnish, Lacquer, and Related Products,² and shall be cleaned and prepared for coating in accordance with applicable procedure of Method D 609.

4.3 Specimens coated with paints or nonmetallic coatings shall not be cleaned or handled excessively prior to test.

4.4 Whenever it is desired to determine the development of corrosion from an abraded area in the paint or organic coating, a scratch or scribed line shall be made through the coating with a sharp instrument so as to expose the underlying metal before testing. The conditions of making the scratch shall be as defined in ASTM Method D 1654, Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments,² unless otherwise agreed upon between the purchaser and seller.

4.5 Unless otherwise specified, the cut edges of plated, coated, or duplex materials and areas containing identification marks or in contact with the racks or supports shall be protected with a suitable coating stable under the conditions of the test, such as ceresin wax.

NOTE 2—Should it be desirable to cut test specimens from parts or from preplated, painted, or otherwise coated steel sheet, the cut edges shall be protected by coating them with paint, wax, tape, or other effective media so that the development of a galvanic effect between such edges and the adjacent plated or otherwise coated metal surfaces, is prevented.

5. Position of Specimens During Test

5.1 The position of the specimens in the salt spray chamber during the test shall be such that the following conditions are met:

5.1.1 Unless otherwise specified, the specimens shall be supported or suspended between 15 and 30 deg from the vertical and preferably parallel to the principal direction of horizontal flow of fog through the chamber, based upon the dominant surface being tested.

5.1.2 The specimens shall not contact each other or any metallic material or any material capable of acting as a wick.

5.1.3 Each specimen shall be so placed as to permit free settling of fog on all specimens.

5.1.4 Salt solution from one specimen shall not drip on any other specimen.

NOTE 3—Suitable materials for the construction or coating of racks and supports are glass, rubber, plastic, or suitably coated wood. Bare metal shall not be used. Specimens shall preferably be supported from the bottom or the side. Slotted wooden

strips are suitable for the support of flat panels. Suspension from glass hooks or waxed string may be used as long as the specified position of the specimens is obtained, if necessary by means of secondary support at the bottom of the specimens.

6. Salt Solution

6.1 The salt solution shall be prepared by dissolving 5 ± 1 parts by weight of sodium chloride in 95 parts of distilled water or water containing not more than 200 ppm of total solids. The salt used shall be sodium chloride substantially free of nickel and copper and containing on the dry basis not more than 0.1 percent of sodium iodide and not more than 0.3 percent of total impurities. Some salts contain additives that may act as corrosion inhibitors; careful attention should be given to the chemical content of the salt. By agreement between purchaser and seller, analysis may be required and limits established for elements or compounds not specified in the chemical composition given above.

6.2 The pH of the salt solution shall be such that when atomized at 35 C (95 F) the collected solution will be in the pH range of 6.5 to 7.2 (Note 4). Before the solution is atomized it shall be free of suspended solids (Note 5). The pH measurement shall be made electrometrically at 25 C (77 F) using a glass electrode with a saturated potassium chloride bridge in accordance with Method E 70, Test for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode³; or colorimetrically using bromothymol blue as indicator, or short range pH paper which reads in 0.2 or 0.3 of a pH unit (Note 6).

NOTE 4—Temperature affects the pH of a salt solution prepared from water saturated with carbon dioxide at room temperature and pH adjustment may be made by the following three methods:

(1) When the pH of a salt solution is adjusted at room temperature, and atomized at 35 C (95 F), the pH of the collected solution will be higher than the original solution due to the loss of carbon dioxide at the higher temperature. When the pH of the salt solution is adjusted at room temperature, it is therefore necessary to adjust it below 6.5 so the collected solution after atomizing at 35 C (95 F) will meet the pH limits of 6.5 to 7.2. Take about a 50-ml sample of the salt solution as prepared at room temperature, boil gently for 30 s, cool, and determine the pH. When the pH of the salt solution is adjusted to 6.5 to 7.2 by this procedure, the pH of the atomized and collected solution at 35 C (95 F) will come within this range.

² 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 27.

³ 1973 Annual Book of ASTM Standards, Parts 16, 22, 30.

(2) Heating the salt solution to boiling and cooling to 95 F or maintaining it at 95 F for approximately 48 h before adjusting the pH produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35 C (95 F).

(3) Heating the water from which the salt solution is prepared to 35 C (95 F) or above, to expel carbon dioxide, and adjusting the pH of the salt solution within the limits of 6.5 to 7.2 produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35 C (95 F).

NOTE 5—The freshly prepared salt solution may be filtered or decanted before it is placed in the reservoir, or the end of the tube leading from the solution to the atomizer may be covered with a double layer of cheesecloth to prevent plugging of the nozzle.

NOTE 6—The pH can be adjusted by additions of dilute cp hydrochloric acid or cp sodium hydroxide solutions.

7. Air Supply

7.1 The compressed air supply to the nozzle or nozzles for atomizing the salt solution shall be free of oil and dirt (Note 7) and maintained between 69 and 172 kN/m² (10 and 25 psi) (Note 8).

NOTE 7—The air supply may be freed from oil and dirt by passing it through a water scrubber or at least 610 mm (2 ft) of suitable cleaning material such as asbestos, sheep's wool, excelsior, slag wool, or activated⁴ alumina.

NOTE 8—Atomizing nozzles may have a "critical pressure" at which an abnormal increase in the corrosiveness of the salt fog occurs. If the "critical pressure" of a nozzle has not been established with certainty, control of fluctuation in the air pressure within plus or minus 0.7 kN/m² (0.1 psi), by installation of a suitable pressure regulator valve⁵ minimizes the possibility that the nozzle will be operated at its "critical pressure."⁶

8. Conditions in the Salt Spray Chamber

8.1 *Temperature*—The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at 35 + 1.1 - 1.7 C (95 + 2 - 3 F). The temperature within the exposure zone of the closed cabinet shall be recorded at least twice a day at least 7 h apart (except on Saturdays, Sundays, and holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir).

NOTE 9—A suitable method to record the temperature is by a continuous recording device or by a thermometer which can be read from outside the closed cabinet. The recorded temperature must be obtained with the salt spray chamber closed to avoid a false low reading because of wet-bulb effect when the chamber is open.

8.2 *Atomization and Quantity of Fog*—At least two clean fog collectors shall be so

placed within the exposure zone that no drops of solution from the test specimens or any other source shall be collected. The collectors shall be placed in the proximity of the test specimens, one nearest to any nozzle and the other farthest from all nozzles. The fog shall be such that for each 80 cm² of horizontal collecting area there will be collected in each collector from 1.0 to 2.0 ml of solution per hour based on an average run of at least 16 h (Note 10). The sodium chloride concentration of the collected solution shall be 5 ± 1 weight percent (Note 11). The pH of the collected solution shall be 6.5 to 7.2. The pH measurement shall be made electrometrically or colorimetrically using bromothymol blue as the indicator.

NOTE 10—Suitable collecting devices are glass funnels with the stems inserted through stoppers into graduated cylinders, or crystallizing dishes. Funnels and dishes with a diameter of 10 cm have an area of about 80 cm².

NOTE 11—A solution having a specific gravity of 1.0255 to 1.0400 at 25 C (77 F) will meet the concentration requirement. The concentration may also be determined as follows: Dilute 5 ml of the collected solution to 100 ml with distilled water and mix thoroughly; pipet a 10-ml aliquot into an evaporating dish or casserole; add 40 ml of distilled water and 1 ml of 1 percent potassium chromate solution (chloride-free) and titrate with 0.1 N silver nitrate solution to the first appearance of a permanent red coloration. A solution that requires between 3.4 and 5.1 ml of 0.1 N silver nitrate solution will meet the concentration requirements.

8.3 The nozzle or nozzles shall be so directed or baffled that none of the spray can impinge directly on the test specimens.

9. Continuity of Test

9.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, the test shall be continuous for the duration of the entire test period. Continuous operation implies that the chamber be

⁴ Registered U. S. Patent Office.

⁵ The Nullmatic pressure regulator (or equivalent) manufactured by Moore Products Co., H and Lycoming Sts., Philadelphia, Pa. 19124, is suitable for this purpose.

⁶ It has been observed that periodic fluctuations in air pressure of ±3.4 kN/m² (0.5 psi) resulted in about a two-fold increase in the corrosivity of the fog from a nozzle which was being operated at an average pressure of 110 kN/m² (16 psi). Controlling the fluctuations within ±0.7 kN/m² (0.1 psi), however, avoided any increase in the corrosivity of the salt fog. See Darsey, V. M. and Cavanagh, W. R., "Apparatus and Factors in Salt Fog Testing," *Proceedings, ASTEA, Am. Soc. Testing Mats.*, Vol. 48, 1948, p. 153.



closed and the spray operating continuously except for the short daily interruptions necessary to inspect, rearrange, or remove test specimens; to check and replenish the solution in the reservoir, and to make necessary recordings as described in Section 8. Operations shall be so scheduled that these interruptions are held to a minimum.

10. Period of Test

10.1 The period of test shall be as designated by the specifications covering the material or product being tested or as mutually agreed upon by the purchaser and the seller.

NOTE 12—Recommended exposure periods are to be as agreed upon by the purchaser and seller, but exposure periods of multiples of 24 h are suggested.

11. Cleaning of Tested Specimens

11.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, specimens shall be treated as follows at the end of the test:

11.1.1 The specimens shall be carefully removed.

11.1.2 Specimens may be gently washed or dipped in clean running water not warmer than 38 C (100 F) to remove salt deposits from their surface, and then immediately dried. Drying shall be accomplished with a stream of clean, compressed air.

12. Evaluation of Results

12.1 A careful and immediate examination shall be made for the extent of corrosion of the dry test specimens or for other failure as required by the specifications covering the

material or product being tested or by agreement between the purchaser and the seller.

13. Records and Reports

13.1 The following information shall be recorded, unless otherwise prescribed in the specifications covering the material or product being tested:

13.1.1 Type of salt and water used in preparing the salt solution,

13.1.2 All readings of temperature within the exposure zone of the chamber,

13.1.3 Daily records of data obtained from each fog-collecting device including the following:

13.1.3.1 Volume of salt solution collected in milliliters per hour per 80 cm²,

13.1.3.2 Concentration or specific gravity at 35 C (95 F) of solution collected, and

13.1.3.3 pH of collected solution.

13.4 Type of specimen and its dimensions, or number or description of part,

13.5 Method of cleaning specimens before and after testing,

13.6 Method of supporting or suspending article in the salt spray chamber,

13.7 Description of protection used as required in 4.5,

13.8 Exposure period,

13.9 Interruptions in test, cause and length of time, and

13.10 Results of all inspections.

NOTE 13—If any of the atomized salt solution which has not contacted the test specimens is returned to the reservoir, it is advisable to record the concentration or specific gravity of this solution also.

APPENDICES

A1. CONSTRUCTION OF APPARATUS

A1.1 Cabinets

A1.1.1 Standard salt-spray cabinets are available from several suppliers, but certain pertinent accessories are required before they will function according to this method and provide consistent control for duplication of results.

A1.1.2 The salt spray cabinet consists of the basic chamber, an air-saturator tower, a salt solution reservoir, atomizing nozzles, specimen supports, provisions for heating the chamber, and suitable controls for maintaining the desired tempera-

ture.

A1.1.3 Accessories such as a suitable adjustable baffle or central fog tower, automatic level control for the salt reservoir, and automatic level control for the air-saturator tower are pertinent parts of the apparatus.

A1.1.4 The cabinet should be of sufficient size to test adequately the desired number of parts without overcrowding. Small cabinets have been found difficult to control and those of less than 0.43-m³ (15-ft³) capacity should be avoided.

A1.1.5 The chamber may be made of inert materials such as plastic, glass, or stone, but most preferably is constructed of metal and lined with impervious plastics, rubber, or epoxy-type materials or equivalent.

A1.2 Temperature Control

A1.2.1 The maintenance of temperature within the salt chamber can be accomplished by several methods. It is generally desirable to control the temperature of the surroundings of the salt spray chamber and to maintain it as stable as possible. This may be accomplished by placing the apparatus in a constant-temperature room, but may also be achieved by surrounding the basic chamber of a jacket containing water or air at a controlled temperature.

A1.2.2 The use of immersion heaters in an internal salt-solution reservoir or of heaters within the chamber is detrimental where heat losses are appreciable, because of solution evaporation and radiant heat on the specimens.

A1.2.3 All piping which contacts the salt solution or spray should be of inert materials such as plastic. Vent piping should be of sufficient size so that a minimum of back pressure exists and should be installed so that no solution is trapped. The exposed end of the vent pipe should be shielded from extreme air currents that may cause fluctuation of pressure or vacuum in the cabinet.

A1.3 Spray Nozzles

A1.3.1 Satisfactory nozzles may be made of hard rubber, plastic, or other inert materials. The most commonly used type is made of plastic. Nozzles calibrated for air consumption and solution atomized are available. The operating characteristics of a typical nozzle are given in Table A1.

A1.3.2 It can readily be seen that air consumption is relatively stable at the pressures normally used, but a marked reduction in solution sprayed occurs if the level of the solution is allowed to drop appreciably during the test. Thus, the level of the solution in the salt reservoir must be maintained automatically to ensure uniform fog delivery during the test.⁷

A1.3.3 If the nozzle selected does not atomize the salt solution into uniform droplets, it will be necessary to direct the spray at a baffle or wall to pick up the larger drops and prevent them from impinging on the test specimens. Pending a complete understanding of air-pressure effects, etc., it is important that the nozzle selected shall produce the desired condition when operated at the air pressure

selected. Nozzles are not necessarily located at one end, but may be placed in the center and can also be directed vertically up through a suitable tower.

A1.4 Air for Atomization

A1.4.1 The air used for atomization must be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. Room air may be compressed, heated, humidified, and washed in a water-sealed rotary pump, if the temperature of the water is suitably controlled. Otherwise cleaned air may be introduced into the bottom of a tower filled with water, through a porous stone or multiple nozzles. The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. A chamber operated according to this method and Appendix will have a relative humidity between 95 and 98 percent. Since salt solutions from 2 to 6 percent will give the same results (though for uniformity the limits are set at 4 to 6 percent), it is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog. Table A2 shows the temperatures, at different pressures, that are required to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

A1.4.2 Experience has shown that most uniform spray chamber atmospheres are obtained by increasing the atomizing air temperature sufficiently to offset heat losses, except those that can be replaced otherwise at very low-temperature gradients.

A1.5 Types of Construction

A1.5.1 A modern laboratory cabinet is shown in Fig. A1. Walk-in chambers are not usually constructed with a sloping ceiling due to their size and location. Suitably located and directed spray nozzles avoid ceiling accumulation and drip. Nozzles may be located at the ceiling, or 0.91 m (3 ft) from the floor directed upward at 30 to 60 deg over a passageway. The number of nozzles depends on type and capacity and is related to the area of the test space. A 11 to 19-dm³ (3 to 5-gal) reservoir is required within the chamber, with the level controlled. The major features of a walk-in type cabinet, which differs significantly from the laboratory type, are illustrated in Fig. A2. Construction of a plastic nozzle, such as is furnished by several suppliers, is shown in Fig. A3.

⁷ A suitable device for maintaining the level of liquid in, either the saturator tower, or reservoir of test solution may be designed by a local engineering group, or may be purchased from manufacturers of test cabinets as an accessory.

A2. USE OF THE SALT SPRAY (FOG) TEST IN RESEARCH

A2.1 The detailed requirements of this method are primarily for quality acceptance and should not be construed as the optimum conditions for research studies. The test has been used to a considerable extent for the purpose of comparing different materials or finishes with an acceptable standard. The recent elimination of many cabinet variables and the improvement in controls have made the three

ASTM Salt Spray Tests: Method B 117, Method B 287, Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing,^{2, 8} and Method B 368, for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS),^{2, 8} into useful tools for many industrial and military production

⁸ 1973 Annual Book of ASTM Standards, Part 7.



and qualification programs.

A2.2 The test has been used to a considerable extent for the purpose of comparing different materials or finishes. It should be noted that there is seldom a direct relation between salt spray (fog) resistance and resistance to corrosion in other media, because the chemistry of the reactions, including the formation of films and their protective value, frequently varies greatly with the precise conditions encountered. Informed personnel are aware of the erratic composition of basic alloys, the possibility of wide variations in quality and thickness of plated items produced on the same racks at the same time, and the consequent need for a mathematical determination of the number of specimens required to constitute an adequate sample for test purposes. In this connection it is well to point out that Method B 117 is not applicable to the study or testing of decorative chromium plate (nickel-chromium or copper-nickel-chromium) on steel or on zinc-base die castings or of cadmium plate on steel. For this purpose Methods B 287 and B 368 are available, which are also considered by some to be superior for comparison of chemically-treated aluminum

(chromated, phosphated, or anodized), although final conclusions regarding the validity of test results related to service experience have not been reached. Method B 117 is considered to be most useful in estimating the relative behavior of closely related materials in marine atmospheres, since it simulates the basic conditions with some acceleration due to either wetness or temperature or both.

A2.3 When a test is used for research, it may prove advantageous to operate with a different solution composition or concentration or at a different temperature. In all cases, however, it is desirable to control the temperature and humidity in the manner specified, and to make certain that the composition of the settled fog and that of the solution in the reservoir are substantially the same. Where differences develop, it is necessary to control conditions so that the characteristics of the settled fog meet the specified requirements for the atmosphere.

A2.4 Material specifications should always be written in terms of the standard requirements of the appropriate salt-spray method, thereby making it possible to test a variety of materials from different sources in the same equipment.

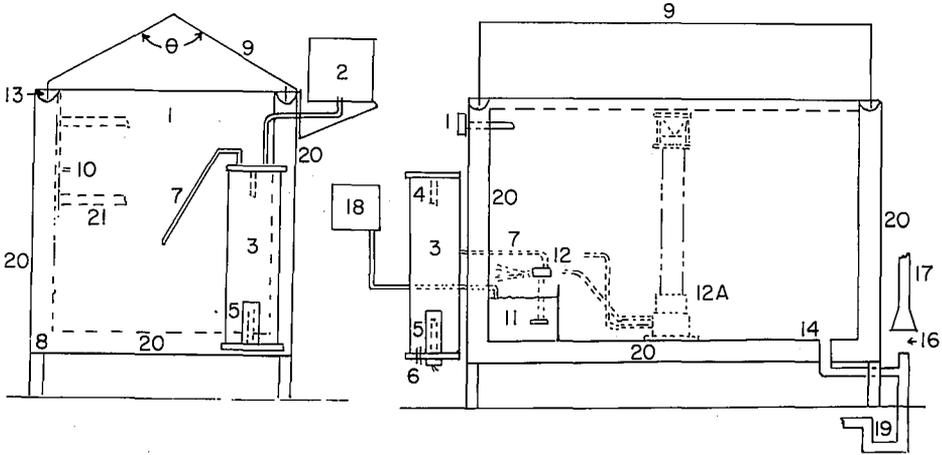
TABLE A1 Operating Characteristics of Typical Spray Nozzle

Siphon Height, in.	Air Flow, liters/min				Solution Consumption, ml/h			
	Air Pressure, psi				Air Pressure, psi			
	5	10	15	20	5	10	15	20
4	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
8	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
12	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
16	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904

TABLE A2 Temperature and Pressure Requirements for Operation of Test at 95 F

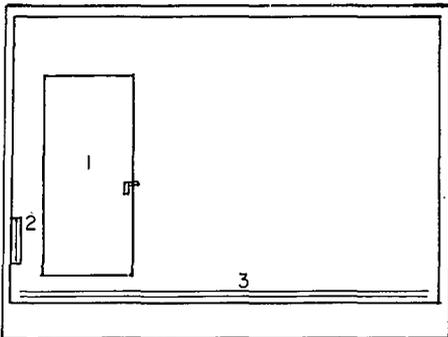
	Air Pressure, psi			
	12	14	16	18
Temperature, deg F	114	117	119	121
	Air Pressure, kN/m ²			
	83	96	110	124
Temperature, deg C	46	47	48	49

Siphon Height cm	Air Flow, dm ³ /min				Solution Consumption, cm ³ /h			
	Air Pressure, kN/m ²				Air Pressure, kN/m ²			
	34	69	103	138	34	69	103	138
10	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
20	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
30	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
40	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904



- θ — Angle of lid, 90 to 125 deg
- 1 — Thermometer and thermostat for controlling heater (Item No. 8) in base
- 2 — Automatic water levelling device
- 3 — Humidifying tower
- 4 — Automatic temperature regulator for controlling heater (Item No. 5)
- 5 — Immersion heater, non-rusting
- 6 — Air inlet, multiple openings
- 7 — Air tube to spray nozzle
- 8 — Strip heater in base
- 9 — Hinged top, hydraulically operated, or counterbalanced
- 10 — Brackets for rods supporting specimens, or test table
- 11 — Internal reservoir
- 12 — Spray nozzle above reservoir, suitably designed, located, and baffled
- 12A — Spray nozzle housed in dispersion tower located preferably in center of cabinet
- 13 — Water Seal
- 14 — Combination drain and exhaust. Exhaust at opposite side of test space from spray nozzle (Item 12), but preferably in combination with drain, waste trap, and forced draft waste pipe (Items 16, 17, and 19).
- 16 — Complete separation between forced draft waste pipe (Item 17) and combination drain and exhaust (Items 14 and 19) to avoid undesirable suction or back pressure.
- 17 — Forced draft waste pipe.
- 18 — Automatic levelling device for reservoir
- 19 — Waste trap
- 20 — Air space or water jacket
- 21 — Test table or rack, well below roof area

FIG. A1 Typical Salt Spray Cabinet.



NOTE—The controls are the same, in general as for the laboratory cabinet (Fig. A1), but are sized to care for the larger cube. The chamber has the following features:

- (1) Heavy insulation,
- (2) Refrigeration door with drip rail, or pressure door with drip rail, inward-sloping sill,
- (3) Low-temperature auxiliary heater, and
- (4) Duck boards on floor, with floor sloped to combination drain and air exhaust.

FIG. A2 Walk-in Chamber, 1.5 by 2.4 m (5 by 8 ft) and Upward in Over-all Size.

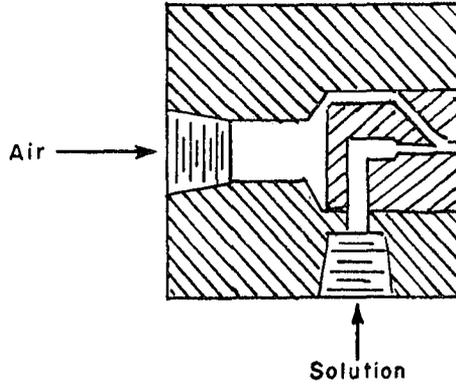


FIG. A3 Typical Spray Nozzle.

By publication of this standard no position is taken with respect to the validity of any patent rights in connection therewith, and the American Society for Testing and Materials does not undertake to insure anyone utilizing the standard against liability for infringement of any Letters Patent nor assume any such liability.