

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

**TESIS:
AVANCES EN EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE
RECUBRIMIENTOS GEOPOLIMÉRICOS PARA DISMINUIR LA
CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO,
DE ALTA RESISTENCIA.**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:
EDWIN ROJAS GUTIÉRREZ**

**ASESOR:
M.A. ING. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA**

**COASESOR:
DR. ANDRÉS A. TORRES ACOSTA.**

MORELIA, MICH. AGOSTO DE 2010.

RESUMEN.

Se presentan los resultados obtenidos del diseño de un recubrimiento geopolimérico inorgánico-orgánico cuya finalidad es disminuir la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Se diseñó una mezcla de concreto por el método ACI para lograr una resistencia alta $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$, la cual es utilizada para la elaboración de vigas reforzadas con acero (15cm.x15cm.x30cm.) y cilindros de concreto (10cm.x20cm.) sin refuerzo. Se muestra la caracterización electroquímica de las vigas, con recubrimiento anticorrosivo y sin recubrimiento, basados en la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica. Las vigas, recubiertas y sin recubrir, fueron sometidas a cinco ciclos de ataque de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4), con la finalidad de observar mediante los resultados electroquímicos, como se comporta el acero y el concreto con cada ciclo de ataque. A los cilindros se les midió la resistividad eléctrica con un resistómetro de cuatro puntas (Nilsson 400).

Palabras clave: (Geopolimérico, corrosión, electroquímica, velocidad de corrosión, potencial de corrosión, resistividad eléctrica).



OBJETIVO

Determinar los parámetros electroquímicos en vigas de concreto reforzado de alta resistencia, con y sin recubrimiento, para evaluar la eficacia del recubrimiento a evitar la corrosión después de cinco ciclos de ataques de Sulfato de Sodio. Además medir la resistividad de cilindro de concreto para determinar la resistencia del concreto al paso de corriente eléctrica.

DEDICATORIAS

A mis padres *Ing. José Roberto Rojas Hernández y Profra. Silvia Gutiérrez Pérez*

Con mucho cariño por haberme dado la vida y haber estado a mi lado en todo momento. Por haberme dado una carrera para mi futuro, por creer en mí y por darme todo su amor.

A mis hermanos *Hugo y Roberto*

Quienes siempre me apoyaron, me dieron su confianza y su cariño.

AGRADECIMIENTOS

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán.

Por todo el apoyo que siempre me dio, por haber formado parte de mi formación como estudiante, por su amistad, por su calidad humana y por sus consejos.

M.A. Ing. Wilfrido Martínez Molina

Por haberme dado su apoyo para la elaboración de este trabajo, por su asesoría, por haber formado parte de mi formación como estudiante, por su amistad y por su confianza.

Dr. José Carlos Rubio Avalos.

Por su disposición y apoyo para aportar consejos e ideas para la elaboración de este proyecto.

Ing. Rafael Hurtado Solórzano.

Por el material aportado para la elaboración de este trabajo.

Por su apoyo y comprensión a M. en I. Cindy Lara Gómez, al Tec. Jesús Zauno Zamudio y al Tec. Rubén Hernández Guzmán compañeros del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

INDICE

	PÁGINA
Resumen	I
Objetivo	II
Dedicatorias	III
Agradecimientos	IV
Índice	V
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	IX
1. INTRODUCCION	1
2.- ESTADO-DEL-ARTE	4
2.1- Cemento Portland	5
2.1.1.- Clasificación de los cementos	6
2.2.- Agregados	8
2.3.- Agua	9
2.4.- Aditivos	9
2.5.- Concreto y acero	10
2.6.- Principios generales de corrosión	13
2.6.1.- Celda de corrosión	15
2.6.2.- Potencial electroquímico	17
2.6.3.- Serie electromotriz	18
2.6.4.- Serie galvánica	19
2.6.5.- Diagramas de Pourbaix	20
2.7.- Corrosión en estructuras de concreto reforzado	22
2.7.1.- Factores que afectan y desencadenan la corrosión	26
2.7.2.- Tipos de corrosión	31
2.8.- Geopolímeros	36
3.- MATERIALES PARA LA ELABORACION DE PROBETAS	38
3.1.- Análisis de los materiales.	39
3.1.1.- Humedad superficial y humedad de absorción en arena.	39
3.1.2.- Densidad de la arena.	41
3.1.3.- Peso volumétrico seco y suelto de una arena (P.V.S.S.).	43
3.1.4.- Peso volumétrico seco y varillado de una arena (P.V.S.V.).	44
3.1.5.- Granulometría en arena.	47
3.1.6.- Humedad de absorción en grava.	49
3.1.7.- Densidad en grava.	52
3.1.8.- Peso volumétrico seco y suelto de una arena (P.V.S.S.).	53
3.1.9.- Peso volumétrico seco y varillado de una	55

arena (P.V.S.S.).	
3.1.10.- Granulometría en grava.	57
3.2.- Diseño del concreto de alta resistencia $f'c=250 \text{ Kg/cm}^2$	59
4.- MATERIALES PARA LA ELABORACION DE RECUBRIMIENTO	61
5.- EXPERIMENTACION Y RESULTADOS	64
5.1.- Elaboración de Sulfato de Sodio Anhidro.	65
5.2.- Ataque acelerado a vigas de concreto reforzado $f'c=250 \text{ Kg/cm}^2$ con Sulfato de Sodio.	67
5.2.1.- Peso húmedo y peso seco de las vigas durante las pruebas.	71
5.2.2.- Parámetros obtenidos con el Gcorr durante las pruebas.	73
5.2.2.1.- Intensidad de corrosión.	74
5.2.2.2.- Potencial electroquímico.	76
5.2.2.3.- Resistividad eléctrica.	78
5.3.- Proceso de elaboración de los cilindros de concreto.	81
5.4.- Resistividad eléctrica de cilindros de concreto.	81
6.- CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS	87

INDICE DE TABLAS

TABLA	TITULO	PAGINA
1	Principales componentes del cemento Portland.	5
2	Clasificación de los cementos según su uso.	6
3	Clasificación de los cementos por su tipo.	7
4	Clasificación de los cementos por su resistencia.	7
5	Clasificación por características especiales.	8
6	Posiciones relativas de algunos metales en cuanto a la energía requerida para convertir sus minerales en metales (de mayor requerimiento a menor).	15
7	Serie electromotriz.	18
8	Serie galvánica.	19
9	Valor crítico de cloruros en hormigones reforzados.	29
10	Absorción en arena.	40
11	Densidad de la arena.	42
12	P.V.S.S. en arena.	44
13	P.V.S.V. en arena.	46
14	Granulometría en arena.	48
15	Especificaciones para absorción en grava.	51
16	Absorción en grava.	51
17	Densidad en grava.	53
18	P.V.S.S. en grava.	55
19	P.V.S.V. en grava.	56
20	Granulometría en grava.	58
21	Características de los materiales.	59
22	Estimación del volumen de arena para 1m ³ .	60
23	Proporciones en peso y en volumen para 1m ³ .	60
24	Resumen de las cantidades en peso necesarias para un metro cubico.	60
25	Peso molecular del Sulfato de Sodio.	65
26	Peso de las vigas a temperatura ambiente.	71
27		
28	Peso de las vigas después del segundo ciclo.	71
29		
30	Peso de las vigas después del tercer ciclo.	72
31		
32	Peso de las vigas después del cuarto ciclo.	72
33		
34	Peso de las vigas después del quinto ciclo.	72
35		
36	Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.	74

37	Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.	74
38	Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.	75
39	Promedio de intensidad de corrosión después de 5 ciclos.	75
40	Criterio para intensidad de corrosión.	76
41	Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.	76
42	Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.	76
43	Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.	77
44	Promedio de potencial electroquímico después de 5 ciclos.	77
45	Criterio para el potencial electroquímico.	78
46	Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.	78
47	Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.	79
48	Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.	79
49	Promedio de resistividad eléctrica después de 5 ciclos.	79
50	Criterio de resistividad eléctrica.	80
51	Medidas de resistencia eléctrica de los cilindros de concreto	82
52	Promedio de la resistencia eléctrica de los cilindros de concreto.	83

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	TITULO	PAGINA
1	Poros conectados por un solo lado.	12
2	Poros conectados por varios lados (interconectados).	13
3	Poros aislados.	13
4	Ciclo del acero.	14
5	Celda de corrosión.	16
6	Diagrama de Pourbaix para el Fe con diferentes electrodos de referencia.	21
7	Celda de corrosión en concreto reforzado.	23
8	Espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales.	27
9	Corrosión por picaduras.	32
10	Corrosión galvánica.	32
11	Corrosión uniforme y corrosión generalizada irregular.	33
12	Corrosión localizada.	34
13	Corrosión en espacios confinados.	35
14	Humedad de Absorción en arenas.	40
15	Densidad en arena.	42
16	P.V.S.S. en arena.	44
17	P.V.S.V. en arena.	46
18	Granulometría en arena.	48
19	Gráfica de granulometría en arena.	49
20	Humedad de absorción en grava.	51
21	Densidad en grava.	53
22	P.V.S.S. en grava.	54
23	P.V.S.V. en grava.	56
24	Granulometría en gravas.	58
25	Grafica de granulometria en grava.	59
26	Diagrama ternario.	62
27	Elaboración de la solución saturada de Sulfato de Sodio Anhidro.	
28	Dimensiones de las vigas.	67
29	Fotografía interior de las vigas.	68
30	Estado inicial de las vigas. Sin atacar.	68
31	Estado de las vigas después del segundo ciclo de ataque.	69
32	Estado de las vigas después del tercer ciclo de ataque.	69
33	Estado de las vigas después del cuarto ciclo de ataque.	70
34	Estado de las vigas después del quinto ciclo de ataque.	70
35	Grafica de pesos húmedos y secos después de 5 ciclos de ataque de Sulfato de Sodio.	73
36	Grafica de intensidad de corrosión.	75
37	Grafica de potencial electroquímico.	77

38	Grafica de resistividad eléctrica.	80
39	Elaboración de los cilindros de concreto.	81
40	Medición de la resistividad eléctrica en los cilindros de concreto.	84





El hombre, en su afán de lograr mejores condiciones de vida, ha usado constantemente su ingenio durante su larga historia. Para lograr tal objetivo, mucho lo ha debido al uso de metales que ahora forman parte de nuestra vida cotidiana y, casi sin quererlo, hemos creado una dependencia tal que sería imposible hablar del desarrollo y avance de la civilización moderna sin el uso de metales y aleaciones. [Ávila y Genescá, 1986]

Desde muy temprano por la mañana hacemos uso del metal, en los grifos del agua para asearnos, con sus recubrimientos de níquel y cromo, en los utensilios de la cocina, tales como los sartenes, cuchillos, cucharas, etc. Aun cuando lo olvidemos, sabemos que nuestra casa, así como todos los demás edificios, sean éstos pequeños o impresionantes rascacielos, están estructurados de acero, el cual actúa como un verdadero esqueleto que conforma, soporta y da resistencia a la construcción. Para el traslado a nuestro trabajo, lo hacemos usualmente en un medio de transporte fabricado en su gran totalidad de metal: autobús, coche, tren, etc. Si, mientras viajamos hacia nuestro trabajo, nos detenemos a pensar por un momento en la cantidad de metal que usa el transporte en el que vamos, nos sorprenderíamos al enterarnos de que es inmensa la cantidad de éste empleada en la carrocería, en el motor, con todo y sus componentes; incluso en el sistema de energía, como lo es el acumulador, encontramos metal en forma de láminas de plomo sumergidas en un medio ácido. Lo mismo podemos decir de los aviones que surcan los cielos actualmente, de los medios de transporte espaciales modernos y de los satélites, hechos todos ellos de aleaciones metálicas muy especiales. [Ávila y Genescá, 1986]

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América¹. Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión. [Del Valle et al, 2001]

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 epóxicos fueron adoptadas en 1981 por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos y algunas Direcciones Estatales de Transporte como el principal medio de control de la corrosión en puentes. Consecuentemente, las varillas con recubrimientos epóxicos fueron colocadas en cientos de estructuras a lo largo del territorio norteamericano. Inicialmente, este sistema mostró buenas propiedades anticorrosivas en las cubiertas de los puentes en que se aplicaban sales deshielantes y en la subestructura colocada en medio marino. Sin embargo, después de varios años este material de construcción acusó signos de corrosión y algunas limitaciones, por lo que su empleo se cuestionó severamente. [Del Valle et al, 2001]

Según un estudio realizado por el National Bureau of Standards de los Estados Unidos (*Efectos económicos de la corrosión metálica en los Estados Unidos*, Departamento de Comercio, 1979), en un país de un nivel de desarrollo tecnológico más parecido a México, como Egipto, se evaluaron los efectos económicos provocados por la corrosión de los materiales metálicos, los cuales se estimaron en aproximadamente 475 millones de dólares, un 4.9% del PIB de Egipto. [Del Valle et al, 2001]

Sin embargo más allá de las cifras económicas alarmantes, son todavía más preocupantes las pérdidas humanas derivadas de fallas estructurales en puentes, edificios, escapes en tuberías de líquidos tóxicos, etc. También debemos tomar en cuenta el agotamiento de las reservas naturales.

Es por eso que en México debemos tomar cartas en el asunto porque los gastos económicos producidos por el fenómeno de la corrosión son altos.



**CAPÍTULO 2
ESTADO - DEL - ARTE**

2.1. Cemento Portland

Probablemente los antiguos romanos fueron los primeros que utilizaron el concreto –palabra de origen latín- basados en *cemento hidráulico*, un material que se endurece con el agua. Esta propiedad y el hecho de no sufrir cambio químico por la acción del agua en su vida posterior, son las más importantes y las que contribuyeron a la difusión del empleo del concreto como material de construcción. El cemento romano cayó en desuso y no fue hasta 1824 cuando el cemento moderno, conocido como cemento Portland, fue patentado por Joseph Aspdin, un constructor de Leeds. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

Se da el nombre de *Portland* a un cemento obtenido por la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales asociados con sílice, alúmina y óxido de hierro, que son calentados a temperaturas que provocan que se formen escorias, para posteriormente moler el producto resultante. Las definiciones de las Normas Británicas (BS 12:1978) y Estadounidenses (ASTM C 150-84) coinciden en que ningún otro material aparte de yeso, agua y agentes pulverizantes pueden añadirse después del quemado. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

El cemento Portland esta hecho básicamente de la combinación de un material calcáreo –como piedra caliza y yeso- y una base de sílice y alúmina, como arcilla o esquisto. El proceso de manufactura consiste esencialmente en moler las materias primas hasta lograr un polvo muy fino, mezclarlas perfectamente en proporciones establecidas y quemarlas en un gran horno rotatorio a una temperatura de aproximadamente 1400 °C; el material se incrusta y se funde parcialmente hasta convertirse en escorias (clínker). Cuando la escoria se enfría, se muele hasta convertirla en un polvo fino y se le agrega un poco de yeso. Este producto resultante es el cemento Portland comercial que se usa en todo el mundo. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

Nombre del componente	Composición óxida	Abreviatura
Silicato de tricalcio	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato de bicalcio	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminio de tricalcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrato	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland.
[A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

Los silicatos, C_3S y C_2S , son los componentes más importantes y los causantes de la resistencia de la pasta hidratada de cemento. La presencia de C_3A en el cemento no es deseable, ya que contribuye poco o nada a la resistencia del mismo, excepto en las primeras etapas; y cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por sulfatos, la formación de sulfoaluminato de calcio (estringita) puede causar resquebrajamientos. Sin embargo, el C_3A es benéfico durante la elaboración del cemento, porque favorece la combinación de cal y sílice. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

2.1.1 Clasificación de los cementos.

Existe una gran cantidad de cementos comerciales y se clasifican por sus características como se presenta a continuación.

a) Clasificación según la Norma Americana C 150 de la ASTM.

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y concretos con aguas negras domésticas concentradas.

Tabla 2. Clasificación de los cementos según su uso.

b) Clasificación según la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCEE-2004.

I. Por el tipo de cemento.

CLASIFICACIÓN POR TIPO	
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Húmo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.

Tabla 3. Clasificación de los cementos por su tipo.

II. Por la clase resistente.

a) Resistencia normal.

Es la resistencia a la compresión a los 28 días. La clase resistente de un cemento de acuerdo con la resistencia normal se indica por la designación del tipo de cemento, seguida por los valores 20, 30 ó 40.

b) Resistencia Rápida.

Es la resistencia a la compresión a los 3 días. Para especificar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia rápida se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases 30 R y 40 R.

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN N/mm²		
	3 DÍAS MÍNIMO	28 DÍAS	
		MÍNIMO	MÁXIMO
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

Tabla 4. Clasificación de los cementos por su resistencia.

III. Por características especiales.

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos.
BRA	Baja Reactividad Álcali-Agregado.
BCH	Bajo Calor de Hidratación.
B	Blanco.

Tabla 5. Clasificación por características especiales.

2.2. AGREGADOS

Los agregados usados en el concreto ocupan aproximadamente 3/4 partes del volumen del concreto. Como son menos caros que el cemento, es deseable usar la mayor cantidad de ellos que sea posible. Se emplean tanto agregados finos (arena) como gruesos (usualmente grava o piedra triturada). Cualquier agregado que pasa la malla No. 4 (malla con alambres separados 1/4" entre sí en ambas direcciones) se considera agregado fino. El material de mayor tamaño es agregado grueso. [J.C. McCormack, 2002]

Los agregados deben ser fuertes, durables y limpios. Si se encuentran en ellos polvo u otras partículas, pueden interferir en la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. La resistencia de los agregados tiene un efecto importante en la resistencia del concreto, y las propiedades de los agregados afectan considerablemente la durabilidad del concreto. [J.C. McCormack, 2002]

La limpieza, sanidad, resistencia y forma de las partículas son importantes en cualquier agregado. Los agregados se consideran limpios si están exentos de excesos de arcillas, limo, materia orgánica. [S. Merrit, 1984]

En un principio, al agregado se le considero un material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de concreto. En realidad, el agregado no es inerte, pues sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones, químicas, pueden influir en el desempeño del concreto, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento. Desde el punto de vista económico, es ventajoso emplear una mezcla con el mayor contenido posible de agregado y el menor posible de cemento,

aunque el costo debe balancearse con las propiedades deseadas del concreto en estado fresco y endurecido. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

2.3. Agua.

El agua debe estar suficientemente limpia, libre de aceite, materia orgánica y sustancias que puedan afectar las acciones de endurecimiento, curado o calidad general del acabado del concreto. En general, el agua potable es adecuada. El agua de mar puede utilizarse para fabricar concreto simple (sin refuerzo), ya que provoca corrosión en las varillas de acero del concreto armado. [Parker y Ambrose, 2008]

El agua potable puede no ser adecuada en ciertas ocasiones sobre todo cuando esta contenga altas concentraciones de sodio o potasio, esto debido al peligro de una reacción álcali-agregado. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

El agua de mar (o cualquier agua que contenga grandes cantidades de cloruros) tiende a ocasionar humedad persistente y eflorescencia. Por tanto cuando la apariencia del concreto es importante o se pretenda cubrir el concreto con yeso su uso no es recomendable. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

2.4. Aditivos.

Se llaman aditivos aquellos productos que se incorporan al hormigón fresco con objeto de mejorar alguna de sus características (facilitar su puesta en obra, regular su proceso de fraguado y endurecimiento, aumentar su durabilidad, etc.). Por su importancia creciente, han sido denominados *el cuarto componente del hormigón*. [Montoya et al, 2000]

Algunos de los aditivos más importantes se enlistan a continuación. [Montoya et al, 2000]

- 1. Aceleradores.-** Son productos que, añadidos al hormigón, adelantan el fraguado o el endurecimiento del mismo y, en general, ambos procesos a la vez.

2. **Retardadores.**- Empleados para retardar el fraguado del hormigón. Son de utilidad en tiempo caluroso cuando la distancia del transporte del hormigón fresco es grande.
3. **Plastificantes y Fluidificantes.**- Son aditivos que aumentan la docilidad y trabajabilidad del hormigón, o bien reducir el agua de amasado de los hormigones en beneficio de su resistencia.
4. **Aireantes.**- Ocluyen en la masa del hormigón infinidad de burbujas de aire, de 20 a 200 micras de diámetro, uniformemente repartidas y siguiendo una curva granulométrica continua que se solapa con la del cemento y finos de la arena, las cuales interceptan la red capilar del hormigón endurecido, mejorando así su resistencia a las heladas y a los agentes agresivos.
5. **Impermeabilizantes.**- Utilizado para hacer más pequeña la red capilar del hormigón, es decir, aumentar su compacidad.
6. **Otros:** endurecedores de superficie, colorantes, inhibidores de corrosión, insecticidas, expansivos, etc.

2.5. Concreto y acero.

El *concreto* es una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua. En ocasiones, uno o más aditivos se agregan para cambiar ciertas características del concreto, tales como la ductilidad, la durabilidad y el tiempo de fraguado. [J.C. McCormack, 2002]

Igual que la mayoría de los materiales pétreos, el concreto tiene una alta resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión. El *concreto reforzado* es una combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a tensión de que carece el concreto. [J.C. McCormack, 2002]

El acero de refuerzo, es una aleación hierro/carbono, que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado.

El concreto, en un sentido general, es un producto o masa conformada por un medio aglutinador. Generalmente es el producto de la reacción entre el cemento hidráulico y agua. Hoy en día existe una diversa variedad de concretos los cuales son elaborados con diferentes tipos de cementos: puzolana, ceniza, escoria de alto horno. Ingredientes para mezcla, polímeros y fibras, entre otros. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

A las reacciones químicas que se llevan a cabo entre los componentes del cemento y el agua se les conoce con el nombre de hidratación. Estos productos de hidratación, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura llamada pasta de cemento endurecida. [A. del Valle et al, 2001]

Como muchas reacciones químicas, la hidratación de los compuestos del cemento es una reacción química exotérmica. [A.M. Neville y J.J. Brooks, 1998]

La estructura en la pasta de cemento se desarrolla como resultado de una reacción química generada por la mezcla entre el cemento portland y el agua. El concreto entra en una etapa temprana de hidratación, después que los límites externos de la masa, son más o menos fijos. [Bentur et al.,1997]

La cantidad de agua añadida inicialmente a la mezcla de cemento y agregados para obtener un concreto fresco con trabajabilidad conveniente es siempre superior a la cantidad de agua necesaria para la hidratación completa. Este exceso de agua es el responsable del grado de porosidad y permeabilidad del concreto endurecido. [A. del Valle et al, 2001]

La relación agua/cemento no es otra cosa que la cantidad de agua utilizada con respecto al peso de cemento. Juega un papel muy importante en la preparación del concreto, ya que la mezcla debe ser lo suficientemente semifluida, para manejarla cómodamente. [A. del Valle et al, 2001]

La importancia de la relación agua/cemento radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menos cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) en donde se aloje la humedad, esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de una importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (como el oxígeno) como los agentes iniciadores (ión cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a

través de la masa de concreto. La velocidad de difusión del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por lo tanto la porosidad. [A. del Valle et al, 2001]

La porosidad de la pasta sigue disminuyendo como producto del proceso de hidratación. Sin embargo es habitual ver dos tipos diferentes de poros: los poros más grandes que son llamados “poros capilares” y los poros que son mucho más finos los cuales son llamados “poros de gel”, estos se desarrollan dentro de las partículas que se crean como producto de la hidratación o más bien que se producen entre ellos. [Bentur et al.,1997]

Aparte de los “poros capilares” y los “poros de gel” su puede encontrar un tercer tipo de poros los cuales se producen al momento de la elaboración del concreto son de un tamaño mayor y estos son asociados al contenido de aire atrapado y a una mala compactación durante la colocación del concreto fresco. [A. del Valle et al, 2001]

Los poros de mayor tamaño son los que influyen en la durabilidad del concreto, porque a su través acceden agentes agresivos que pueden iniciar un ataque al elemento metálico embebido y causar corrosión. [A. del Valle et al, 2001]

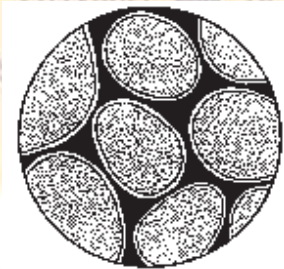


Figura 1. Poros conectados por un solo lado.

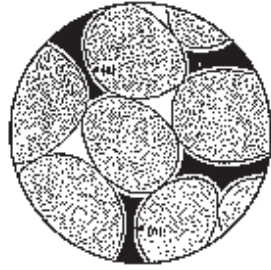


Figura 2. Poros conectados por varios lados (interconectados).

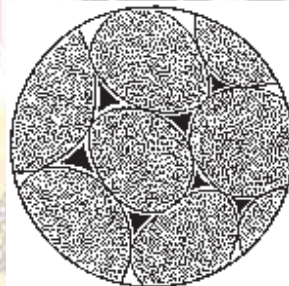


Figura 3. Poros aislados.

2.6. Principios generales de corrosión.

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Si bien existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. La industria de la corrosión, si por ello entendemos todos los recursos destinados a estudiarla y prevenirla, mueve anualmente miles de millones de dólares. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos. Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el 3 y el 5 por ciento del producto interno bruto de los países industrializados; solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión. Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se

mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión. [M.T. Cortés y P. Ortiz, 2004]

El estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o su estado de más bajo de energía, es decir, en forma de óxidos, sulfuros, cloruros, sulfatos o carbonatos. Muchas de las formas combinadas de los metales han permanecido tal y como los encontramos ahora por miles de millones de años. El paso de un metal a su forma combinada se logra a lo largo de millones de años. En el transcurso de este tiempo va pasando de un estado inestable a su forma más estable que es su forma combinada. [Ávila y Genescá, 1986]

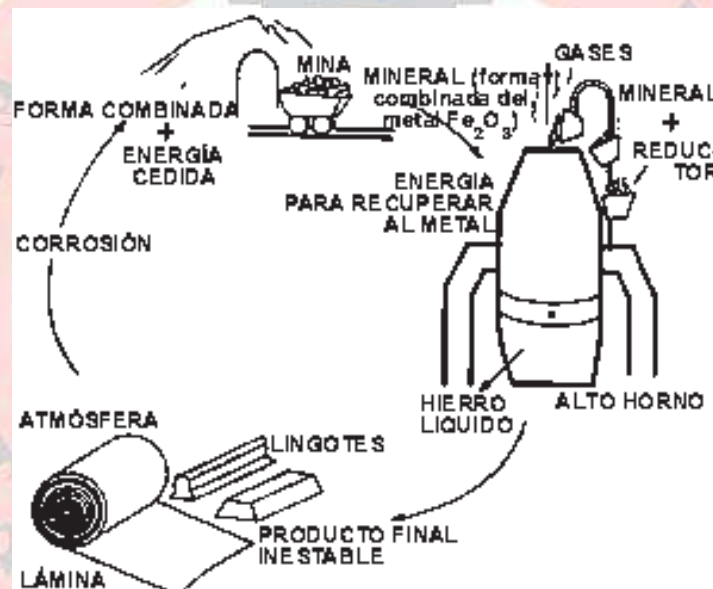


Figura 4. Ciclo del acero.

Cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse. La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro. [Ávila y Genescá, 1986]

Potasio
Magnesio
Berilio
Aluminio
Zinc
Cromo
Hierro
Níquel
Estaño
Cobre
Plata
Platino
Oro

Tabla 6. Posiciones relativas de algunos metales en cuanto a la energía requerida para convertir sus minerales en metales (de mayor requerimiento a menor).

2.6.1. Celda de corrosión

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como *ánodo* y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama *cátodo*; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se conoce como *electrolito*. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones. [M.T. Cortés y P. Ortiz, 2004]

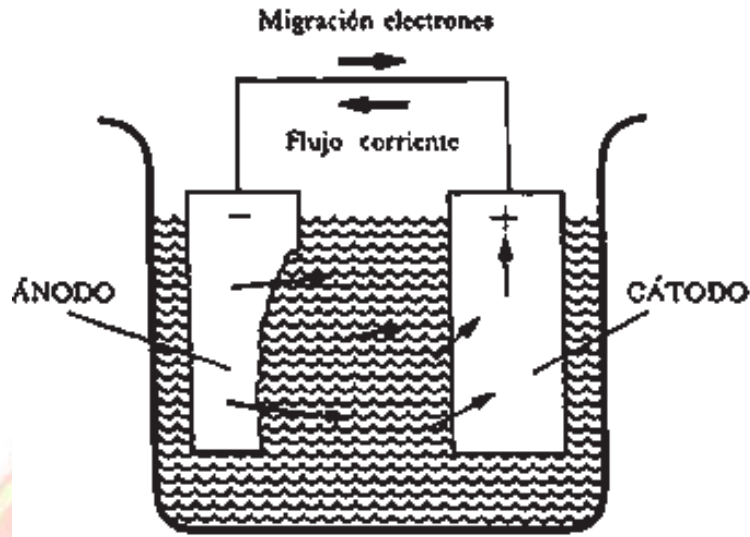
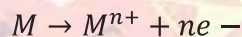


Figura 5. Celda de corrosión.

Los componentes esenciales se presentan en la figura anterior. Las flechas representan corrientes eléctricas (no electrones) fluyendo a la solución desde el ánodo (—) al cátodo (+) y regresando desde el cátodo al ánodo a través de un hilo metálico conductor (cobre por ejemplo).

Como puede apreciarse, en una celda electroquímica son indispensables los siguientes elementos:

- **Ánodo.**- Porción de una superficie metálica en donde se lleva a cabo la reacción de oxidación (proceso de corrosión). En este proceso hay una pérdida o liberación de electrones como consecuencia del paso del metal a su forma iónica, que se representa con la siguiente reacción:



- **Cátodo.** Porción de la superficie metálica donde se lleva a cabo la reacción de reducción, en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito. En este proceso hay una ganancia de electrones.



En el cátodo se cierra el circuito eléctrico a través de un conductor externo.

- *Electrolito*: Sustancia a través de la cual las cargas eléctricas son transportadas por un flujo de iones. *Diferencia de potencial*. Desigualdad en el estado energético entre los dos electrodos que provoca un flujo de electrones desde el ánodo hasta el cátodo.
- *Conductor metálico*. Cable externo que conecta eléctricamente los electrodos (conduce los electrones desde el ánodo hacia el cátodo).

Los electrones que se pierden en el ánodo durante la reacción de oxidación son utilizados en el cátodo para que suceda la reacción de reducción. Durante el proceso de corrosión en estructuras de concreto, la zona anódica y la zona catódica están localizadas en la superficie del acero de refuerzo, mientras que el concreto actúa como el electrolito, completándose así los elementos que se requieren para formar la celda electroquímica. En algunos textos, la celda electroquímica también es llamada "pila de corrosión", "celda electrolítica" o "celda galvánica". [Ávila y Genescá, 1986]

2.6.2. Potencial Electroquímico.

El potencial electroquímico es un parámetro muy importante desde el punto de vista termodinámico, ya que permite conocer qué metal se comporta como ánodo y cuál como cátodo. Aún en situaciones en donde un metal presenta diferencias de potencial debido a heterogeneidades superficiales, algunas veces es posible determinar qué zona se encuentra actuando como cátodo y cuál como ánodo.

Esto es debido a que las zonas que actúan catódicamente presentan un potencial más positivo de acuerdo a la serie electromotriz y las zonas que actúan anódicamente muestran un potencial más negativo. Consecuentemente, el potencial puede ser medido continuamente para detectar si el metal se corroe de acuerdo a la diferencia de potencial entre ambas zonas.

2.6.3. Serie electromotriz.

La serie electromotriz se realiza midiendo el potencial de los metales respecto al electrodo de referencia de hidrógeno. La serie electromotriz toma sólo en cuenta aquellos equilibrios electroquímicos que involucran a los metales y a sus cationes simples, o sea para reacciones que sólo dependen del potencial.

Elemento	Potencial (volts)
Au	+1.70
H ₂ O	+1.23
Pt	+1.20
Hg	+0.85
Ag	+0.80
Cu	+0.34
H	0.00
Pb	-0.13
Ni	-0.25
Cd	-0.40
Fe	-0.44
Cr	-0.70
Zn	-0.76
Ti	-1.63
Al	-1.66
Mg	-2.38

Tabla No. 7. Serie electromotriz. [Ávila y Genescá, 1986]

Para obtener información más completa se puede recurrir a la serie galvánica que no nos da valores de potencial de corrosión pero si nos dice que metales son más susceptibles a la corrosión.

2.6.4. Serie galvánica.

La serie galvánica es una lista de metales y aleaciones ordenadas de acuerdo a su potencial de corrosión relativo en un medio ambiente dado. La serie galvánica está listada de acuerdo a la tendencia que tienen los metales a corroerse en un mismo electrolito, por lo que la secuencia de la lista difiere cuando se utilizan electrolitos diferentes.

De acuerdo a la International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC), los metales “Nobles” son los que tienen un potencial más positivo y por lo tanto sufren un mínimo de corrosión, mientras que los metales “activos” son los que tienen un potencial más negativo (en comparación con los metales nobles) y los que se corroen más fácilmente. Cabe destacar que la serie galvánica es útil cuando se desea elegir un metal o aleación para ser utilizado en un electrolito específico, puesto que se conoce su tendencia a corroerse. [A. del Valle et al, 2001]

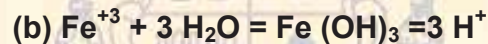
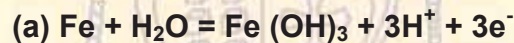
Noble	Oro	Pasivo
	Acero inoxidable	
	Níquel	
	Cobre	
	Bronce al aluminio	↓
	Níquel	Activo
	Latón naval	
	Estaño	
	Acero inoxidable	
	Hierro forjado	
	Aluminio	
	Zinc	
Base	Magnesio	↓

Tabla No. 8. Serie galvánica. [Ávila y Genescá, 1986]

2.6.5. Diagramas de Pourbaix.

La serie electromotriz no considera el efecto que tiene una película de óxido presente en la superficie de un metal, en el potencial de equilibrio de ese sistema, siendo así que estas situaciones prácticas son las que a un ingeniero de planta le gustaría saber. Por ejemplo, la serie considera que tanto el aluminio como el cromo son sumamente reactivos (-1.66 y -0.70 volts respectivamente) y sin embargo, nosotros sabemos que el aluminio, tal como lo conocemos, es muy resistente a la corrosión en condiciones normales y que al cromo incluso se le usa como elemento de aleación en los aceros para imprimirles mayor resistencia a la corrosión. Lo que sucede es que la Serie Electromotriz no considera la condición oxidada tanto del aluminio (Al_2O_3) como del cromo (Cr_2O_3), los cuales son así excepcionalmente resistentes a la corrosión; la serie sólo considera sus estados activos, es decir, no pasivos. [Ávila y Genescá, 1986]

Otras reacciones que la Serie no toma en cuenta son reacciones muy comunes entre un metal y un medio acuoso. Tomemos por ejemplo las reacciones siguientes:



Aquí (a) nos indica la reacción que sufre el hierro en contacto con el agua para formar el hidróxido férrico. El equilibrio de esta reacción ya no depende solamente de un potencial eléctrico que haga mover esos tres electrones por mol de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ formado, sino también del pH, es decir, de la acidez del medio, de la concentración de iones H^+ . (b) no depende del potencial sino sólo del pH del medio. Aquí no hay transferencia de electrones, es una reacción química, no electroquímica. Ambas reacciones y muchas otras son importantes para saber el estado en que se encontrará una estructura de acero, dependiendo del potencial y de la acidez del medio. [Ávila y Genescá, 1986]

Hace algunas décadas, el investigador belga Marcel Pourbaix obtuvo todas las reacciones posibles entre el agua y un metal, y las representó gráficamente como función del potencial y del pH a través de unos diagramas que llevan su nombre. [Ávila y Genescá, 1986]

La figura siguiente nos muestra el diagrama simplificado para el hierro en contacto con agua. Un aspecto importante de los Diagramas de Pourbaix es que contienen una división natural del campo gráfico en tres regiones, las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo a su conducta de corrosión en: pasividad, corrosión e inmunidad. [A. del Valle et al, 2001]

Zona de pasividad. Los hidróxidos de hierro forman una capa protectora en la superficie del metal, que reduce su actividad química y por lo tanto su velocidad de corrosión, por ello se le denomina zona de pasividad.

Zona de inmunidad. En esta región del diagrama la especie termodinámicamente estable es el Fe^0 , por lo tanto el metal es inmune y no sufre corrosión.

Zona de corrosión. Las especies estables del hierro se encuentran como iones, por lo tanto es una condición propicia para la disolución del metal.

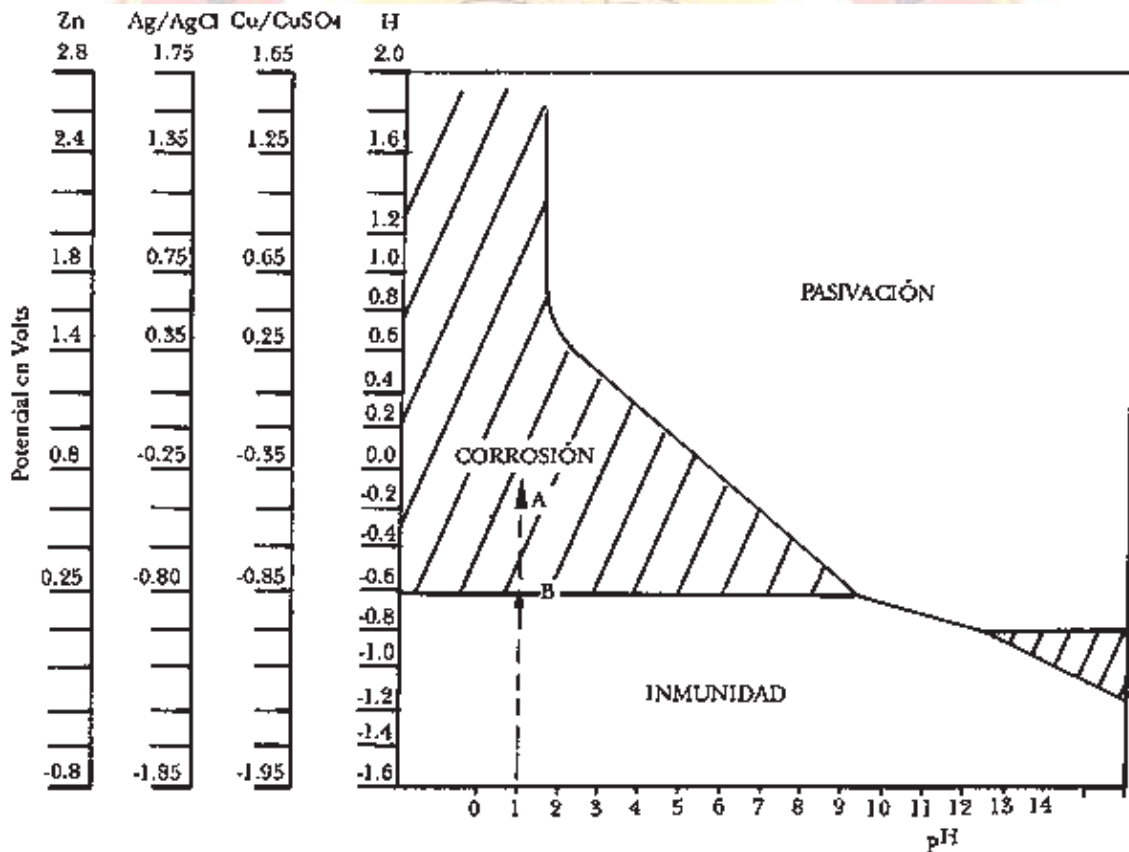


Figura 6. Diagrama de Pourbaix para el Fe con diferentes electrodos de referencia. [Ávila y Genescá, 1986]

2.7. Corrosión en estructuras de concreto reforzado

El concreto posee una característica de gran importancia para la construcción, "protege natural y eficazmente las estructuras de acero contra la corrosión causada por el medio ambiente. Dicha protección se debe, en primer lugar, a que la solución contenida en los poros del concreto tiene un pH fuertemente alcalino y, por ello, mantiene inactivo naturalmente al acero. El hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos y principalmente los óxidos de Na y K (álcalis) presentes en el cemento, hacen posible que el pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto fabricado con cemento Portland fluctúe entre 12.5 - 13.5 de la escala de pH. En dichos valores de pH se forma espontáneamente una capa pasivante de óxidos de hierro-transparente, compacta y continua la cual preserva al acero de la corrosión por períodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el concreto endurecido. [Castro et al, 1998]

Además de la protección por inactividad química, el concreto proporciona al refuerzo una protección física contra los agentes externos causantes de la corrosión del acero ya que limita el acceso del agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias que pueden tomar parte en el proceso de corrosión. Sin embargo debido a su red de poros y fácil tendencia a la formación de grietas, el concreto no constituye una barrera perfecta. La importancia de esta barrera física representada por el espesor de concreto, está relacionada principalmente con la habilidad de preservar las condiciones de elevado pH necesarias para mantener el estado pasivo del refuerzo al limitar la velocidad de penetración de sustancias ácidas desde el exterior. [Castro et al, 1998]

La corrosión del acero que se encuentra embebido en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, llevada a cabo por el medio o ambiente que lo rodea. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica. [Red DURAR, 2000]

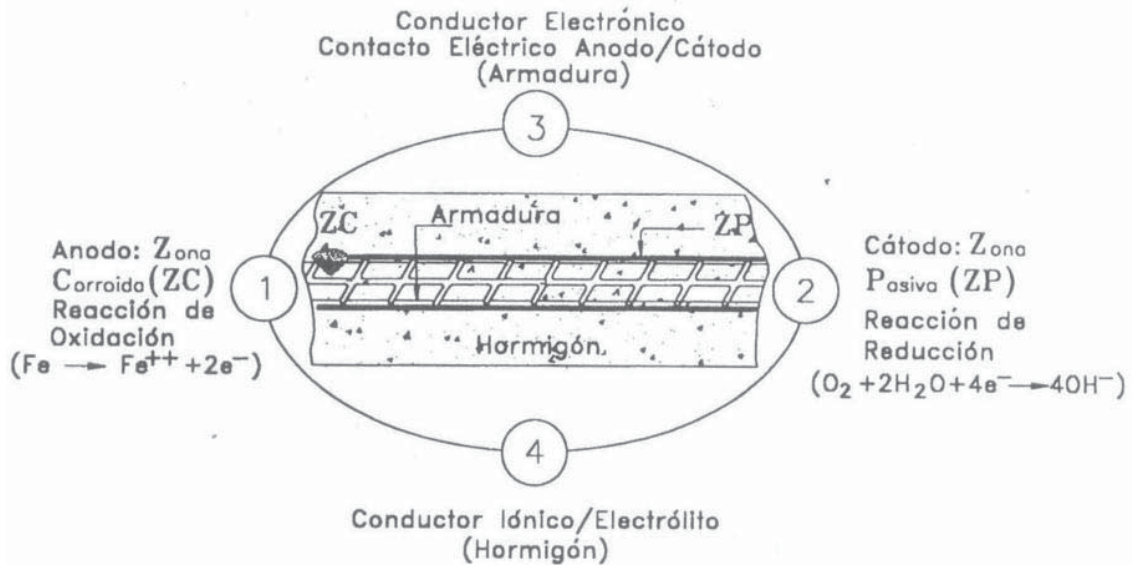
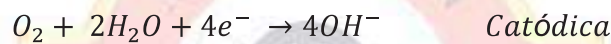


Figura 7. Celda de corrosión en concreto reforzado. [Red DURAR, 2000]

La corrosión electroquímica del acero dentro del concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como también, por las heterogeneidades en el medio químico o físico que rodea el acero, el concreto en nuestro caso. Aunque existe la posibilidad inherente de corrosión electroquímica debido a la falta de uniformidad del acero, se puede prevenir por la formación de la película de óxido de hierro <<pasivante>> mencionada con anterioridad. Pero cuando el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esta película desencadenando las siguientes consecuencias:

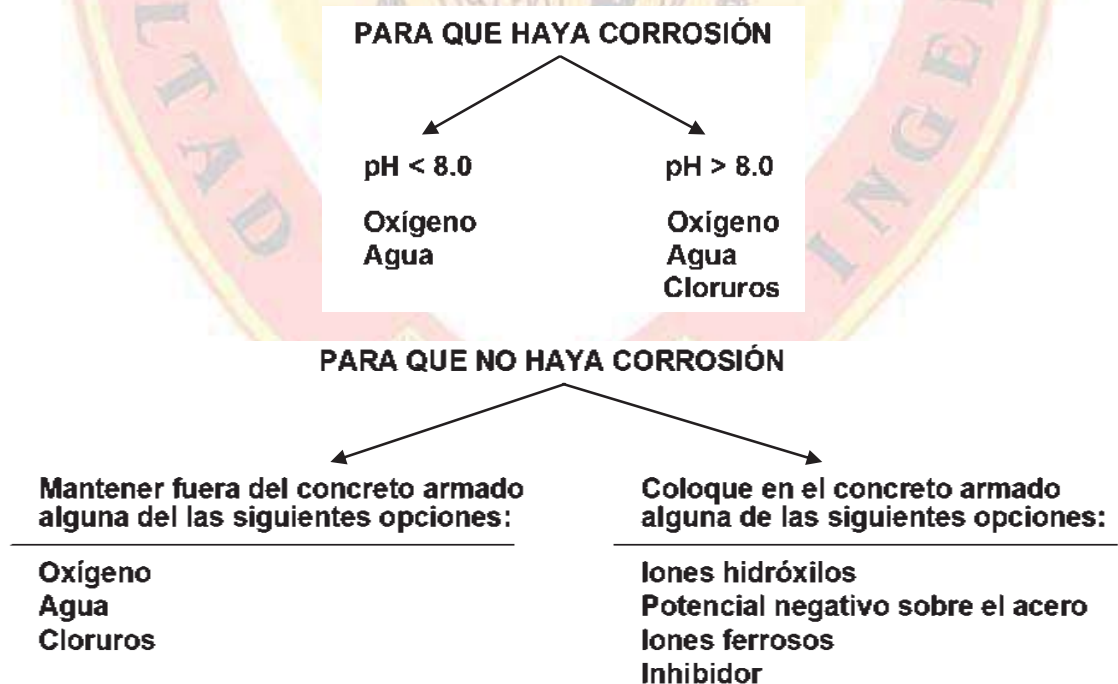
- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido.
- El concreto puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- La adherencia acero-concreto desaparece.

El acero se corroe por la reacción anódica que permite que él se disuelva como ion ferroso. Debe haber una reacción catódica simultánea, como la reducción de oxígeno, todo esto con presencia de agua. [Red DURAR, 2000]



Sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero, cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, lo detienen completamente. [Red DURAR, 2000]

A continuación se muestra un cuadro descriptivo de algunas condiciones para que exista o no corrosión en el acero del concreto.



Así, los problemas de corrosión del acero estructural están íntimamente asociados a la despasivación del mismo, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico sobre las distintas interfaces hormigón/acero y de las diferencias metalúrgicas y mecánicas del metal. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes eléctricas llevando a la formación de áreas anódicas y catódicas que constituyen las celdas de corrosión. [Red DURAR, 2000]

Otra causa aparte de la falta de uniformidad en el acero, son los poros inherentes en el concreto y su contenido (solución de poro): [Castro et al, 1998]

- a) **Composición y cantidad de solución contenida en los poros del concreto:** La composición de la solución del poro es un factor decisivo para determinar si la barra está corroída o no. Varias investigaciones han mostrado que cuando la solución del poro contiene cantidades elevadas de álcalis, como las sales de sodio y potasio, el pH de ésta se mantiene elevado, teniendo de esta manera un ambiente muy alcalino alrededor del refuerzo, que contrarresta la acción de los cloruros.
- b) **Estructura y distribución de la red de poros del concreto:** El tamaño, la distribución y la interconexión de los poros determina la disponibilidad de oxígeno y humedad necesarios para la permanencia de la capa pasivante, así como la tasa de ingreso de iones agresivos y otros agentes iniciadores de la corrosión.
- c) **Presencia de Hidróxido de Calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ precipitado:** Este compuesto tiene una solubilidad limitada en soluciones acuosas y el volumen del producto de la reacción de hidratación permanece como una sustancia sólida embebida en la pasta de cemento. Contribuye muy poco a la resistencia mecánica del concreto, sin embargo, mantiene la solución de poro a un valor alto de pH.

2.7.1. Factores que afectan y desencadenan la corrosión.

Se denomina así a aquel conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el hormigón. Ya se mencionó con anterioridad, que la corrosión sólo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (<8), por lo que serán pues factores que afectan o desencadenan todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del hormigón o bien, como es el caso de las fisuras y coqueas, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el hormigón.

1. Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de éste, como elemento protector del acero de refuerzo.

El hormigón debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos.

La porosidad de la masa del hormigón la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos externos, razón por la cual la relación agua/cemento, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el hormigón.

2. Compacidad y homogeneidad.

La compacidad es función, principalmente, de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, cumpliéndose con esta condición, la compacidad puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del hormigón, propiciando la segregación de los materiales. De igual manera, la segregación puede producirse por un procedimiento deficiente en la colocación del hormigón y / o inadecuado proceso de compactación.

Las mezclas con relación a/c baja ($<0,4$) son usadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad). Sin embargo, un curado deficiente de estas mezclas impide la hidratación del

cemento, principalmente en la superficie del hormigón, lo cual se manifestará en un incremento de la porosidad y por lo tanto en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.

3. Espesor del recubrimiento

El espesor de esta capa de hormigón es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto. Existen normas internacionales en las que se especifican los espesores adecuados de acuerdo con la agresividad ambiental.

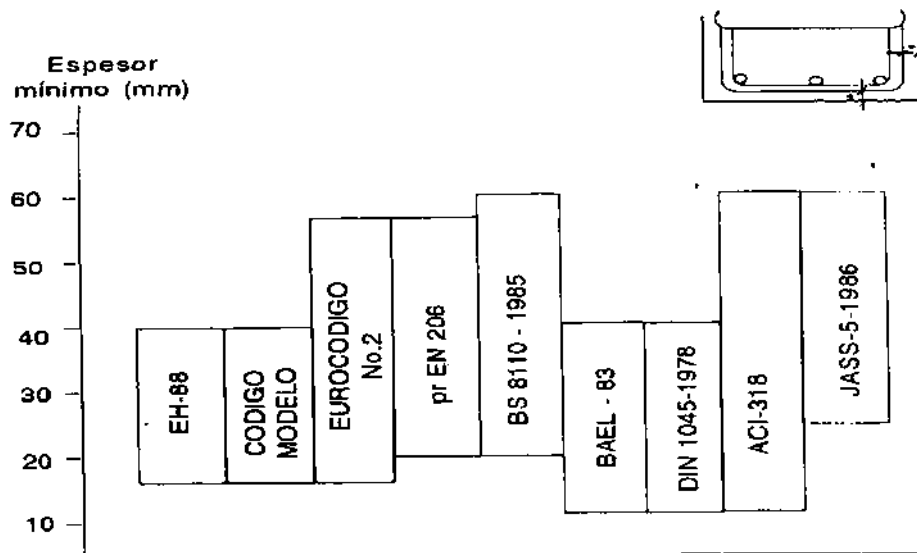


Figura 8. Espesor de recubrimiento de armaduras contemplados en diferentes normas internacionales.

Sin embargo, estructuralmente es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, ya que por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse, afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a esfuerzos de tracción. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de a/c, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas (5,0 - 7,5 cm) permitan una alta durabilidad de la estructura.

4. Humedad ambiental.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno.

Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. En el hormigón seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivante sobre el acero; sólo la existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del hormigón permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad en los poros del hormigón, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión.

5. Efecto del oxígeno.

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta "aireación" de las mismas.

Cuando el hormigón tiene los poros completamente saturados de agua, el oxígeno se tiene que disolver en ella antes de alcanzar las cercanías de la armadura. En este caso el flujo de oxígeno es el factor controlante, ya que la cantidad que fluye es muy limitada. En todos los demás casos, el acceso de oxígeno siempre es suficiente para soportar la velocidad de corrosión que permita la resistividad del hormigón.

6. Efecto de la temperatura.

La temperatura juega también un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.

7. Iones despasivantes.

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del hormigón, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

a) Cloruros.

Provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos.

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del hormigón por dos causas:

- i) porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos), o
- ii) porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el amasado del hormigón, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de hormigón de todos los países limitan su contenido en proporciones variables.

PAIS	NORMA	LIMITE MAX. DE Cl ⁻	REFERIDO A
USA	ACI 318	≤ a 0.15% en ambiente de Cl	Cemento
USA	ACI 318	≤ a 0.3% en ambiente normal	Cemento
USA	ACI 318	≤ a 1% en ambiente seco	Cemento
INGLATERRA	CP-110	≤ a 0.35% al menos en un 95%	Cemento
AUSTRALIA	AS 3600	≤ al 0.22%	Cemento
NORUEGA	NS 3474	≤ al 0.60%	Cemento
ESPAÑA	EH 91	≤ al 0.40%	Cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	≤ al 0.22%	Cemento
JAPON	JSCE-SP 2	≤ al 0.60 Kg/m ³	Hormigón
BRASIL	NBR 6118	≤ al 0.05%	Agua

Tabla No. 9. Valor crítico de cloruros en hormigones reforzados.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del hormigón pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior:

- i. El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura.
- ii. La proporción que induce la despasivación.
- iii. La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

b) Sulfatos.

El ion sulfato (SO_4^{-2}) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos.

El ion sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el hormigón se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, cálcico, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásico, cúprico y aluminico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos báricos y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el hormigón.

Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el anión sulfato del agua con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado por el cemento, el cual se deposita en los poros del hormigón en donde se cristaliza con absorción de dos moléculas de agua. Este proceso de reacción química y cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del hormigón - especialmente en los de las capas superficiales - y termina por lograr su desmoronamiento. Se ha indicado que este aumento de volumen es

del 17,7%. Si existen además iones Mg^{++} , la formación de hidróxido magnésico produce un aumento de volumen del 19,6%, aproximadamente.

c) Carbonatación.

Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del hormigón y da lugar a una neutralización de todo el material. El cambio abrupto de pH que se produce en el interior del hormigón y que es el que da lugar a la aparición de un "frente carbonatado", que se revela muy bien con el indicador fenolftaleína.

Cuando este frente llega hasta la armadura, ésta se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH.

La velocidad de avance de este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará éste en llegar hasta la armadura. La velocidad de avance es función fundamentalmente de: a) el contenido en humedad del hormigón, b) su porosidad (relación a/c) y c) su contenido en materia alcalina carbonatáble.

2.7.2. Tipos de corrosión.

Fontana M. G. ha clasificado los diferentes tipos/ formas de corrosión de acuerdo a la apariencia física del ataque. Según esto, en el caso del acero embebido en hormigón, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes:

a) Corrosión por picaduras.

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa de hormigón.

De esta manera, se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras.

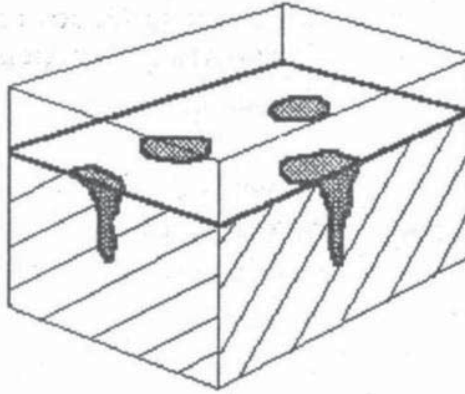


Figura No. 9. Corrosión por picaduras.

b) Corrosión galvánica.

Ocurre cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos expuestos a soluciones corrosivas o atmosféricas húmedas. Uno de ellos se comportará como ánodo y otro como cátodo de acuerdo a la posición que tengan en la serie galvánica. Así el más electronegativo (activo) se corroerá con mayor intensidad mientras más alejado esté del menos electronegativo en la serie galvánica.

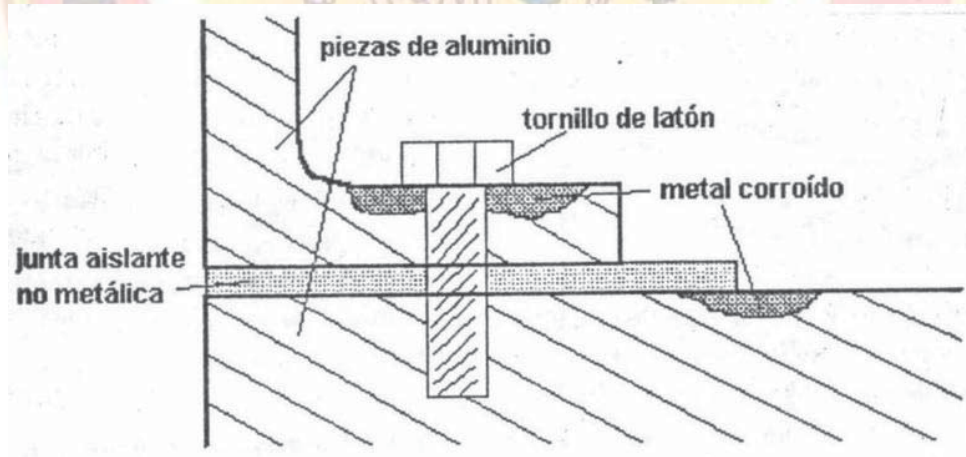


Figura No. 10. Corrosión galvánica.

c) Corrosión uniforme.

Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre la superficie. Ejemplos de este tipo se pueden apreciar cuando se exponen piezas de acero en soluciones diluidas ácidas o expuestas a agentes atmosféricos normales. En el área de la construcción se presenta comúnmente en los marcos de estructuras metálicas. Sin embargo, es también común cuando la capa pasiva del acero de refuerzo ha sido destruida como resultado de la carbonatación del concreto, o cuando hay una cantidad suficiente de cloruros a lo largo de la barra.

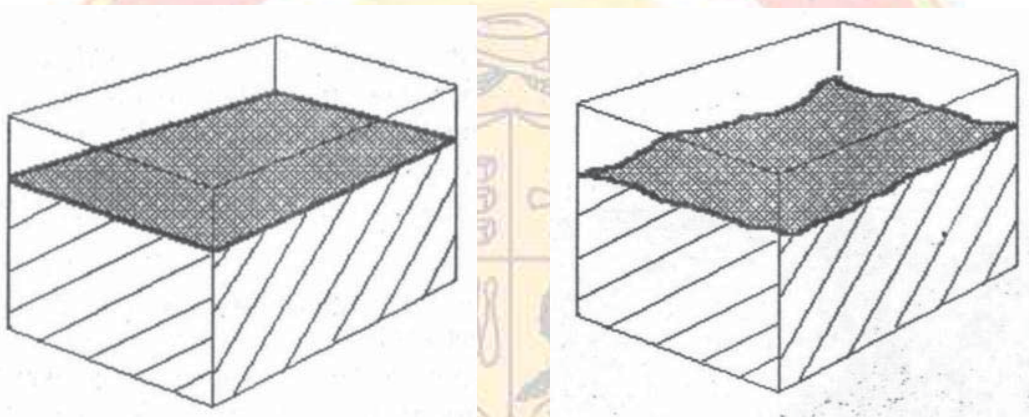


Figura No. 11. Corrosión uniforme y corrosión generalizada irregular.

d) Corrosión localizada.

Este ataque actúa solamente en determinadas áreas de superficie. Tiende a profundizar mucho más rápidamente que la corrosión generalizada, pudiendo ser en extremo peligroso ya que puede conducir al fallo prematuro de una pieza.

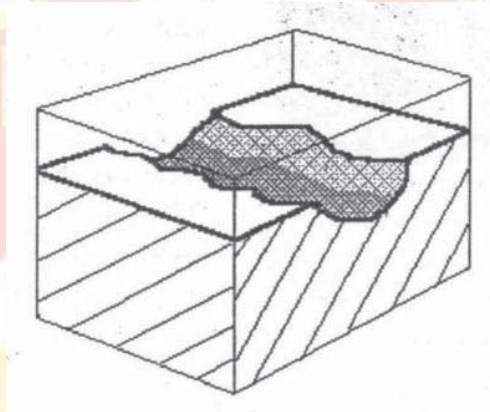


Figura No. 12. Corrosión localizada.

e) Corrosión en espacios confinados.

La corrosión de este tipo puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo del oxígeno a esa zona, pudiendo crearse celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo.

Existen varias situaciones que pueden inducir a este daño. Entre ellas se puede mencionar la inyección de grietas (estructurales o por corrosión) con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al refuerzo, siendo esta zona donde la corrosión se aceleraría por la falta de acceso de oxígeno. Otro ejemplo puede ser la corrosión de acero de refuerzo con revestimientos, como por ejemplo en el caso del uso de epóxicos, cuando la adhesión entre éste y el acero se ha deteriorado.

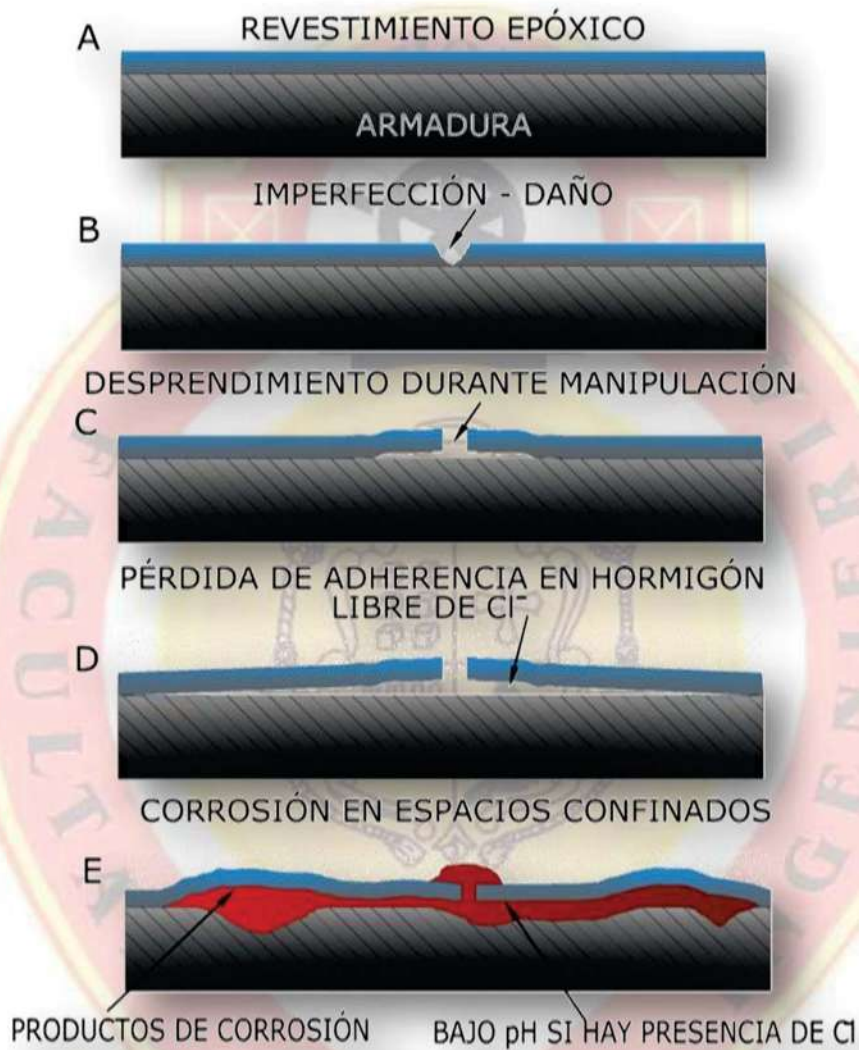


Figura No. 13. Corrosión en espacios confinados.

2.8 Geopolímeros.

Geopolímero es un término acuñado por el investigador francés Joseph Davidovits en la década de los 80's para designar a polímeros inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química (conocida como geopolimerización) bajo condiciones altamente alcalinas entre un material puzolánico activo (como las cenizas volantes o el metacaolín) y una solución activadora (basada en una mezcla molar de hidróxido de sodio y un silicato alcalino, por ejemplo, de sodio o potasio). Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos.

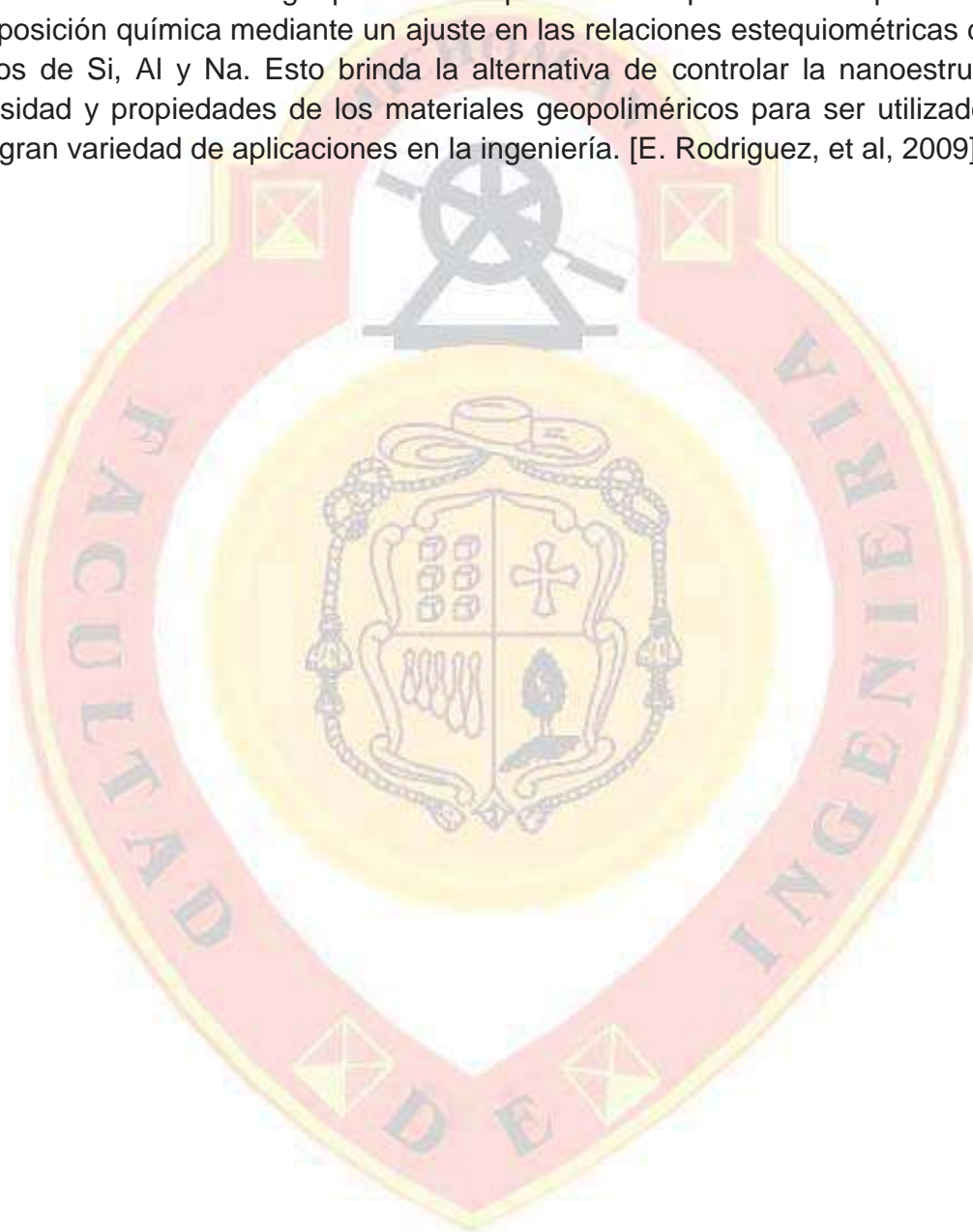
Los materiales geopoliméricos son una nueva clase de materiales cerámicos considerados revolucionarios debido a las ventajas técnicas que exhiben, dentro de las que se destacan: la resistencia mecánica elevada a edades tempranas y una excelente estabilidad frente a medios agresivos. [E. Rodríguez, et al, 2009]

La geopolimerización es una reacción química de minerales (geosíntesis) cuyas composiciones están basadas principalmente en sílice y alúmina (silicoaluminatos), y presentan la habilidad de disolverse en presencia de una solución alcalina (sustancia activante), la cual debe estar constituida por un elemento del primer grupo de la tabla periódica. La alcalinidad de las soluciones activantes induce que cierta cantidad de átomos de Al y Si se disuelvan o se hidrolicen a partir de la fuente primaria de aluminosilicato (MK), para formar geonómeros (monómeros inorgánicos) en la solución y luego ser policondensados, dando lugar a una estructura rígida, con composiciones químicas y características comparables a rocas naturales. [E. Rodríguez, et al, 2009]

La amplia variedad de aplicaciones potenciales incluyen: materiales resistentes al fuego, piedras artificiales decorativas, aislamiento termal, materiales para la construcción, artículos de refracción, usos de fundición, compuestos para la reparación de infraestructuras y el refuerzo, compuestos de alta tecnología para el interior de aviones y autos, resinas de alta tecnología, contenedores de residuos radiactivos y tóxicos, arte y decoración, arqueología y la historia de las ciencias. [Davidovits, 1999]

El mecanismo y cinética de las reacciones de geopolimerización depende de al menos tres factores: 1) Concentración de unidades tetraédricas de sílice, 2) tipo y concentración del metal alcalino y 3) condiciones de curado (temperatura, tiempo y humedad relativa). Se ha encontrado que las propiedades físicas y

características microestructurales de geopolímeros basados en metacaolín (MK) son dependientes de la cantidad de sílice presente en el sistema, la cual es incrementada al incorporar las soluciones activantes. Por tanto, el desempeño mecánico de sistemas geopoliméricos puede ser optimizado a partir de su composición química mediante un ajuste en las relaciones estequiométricas de los óxidos de Si, Al y Na. Esto brinda la alternativa de controlar la nanoestructura, porosidad y propiedades de los materiales geopoliméricos para ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones en la ingeniería. [E. Rodríguez, et al, 2009]





3.1. Análisis de los materiales:

3.1.1 Humedad superficial y humedad de absorción en arena.

Consiste en determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

Equipo.

- Una muestra representativa de aproximadamente de 2 kilogramos.
- Una balanza con aproximación al decimo de gramo.
- Una parrilla eléctrica,
- Charolas metálicas.

Procedimiento.

- I. La muestra de 2 kg. Se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo.
- II. Al término de este tiempo se seca superficialmente, la arena por medio del molde troncocónico como se describe a continuación.
- III. Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.
- IV. Para saber cuando la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pizón, dando 12 golpes a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente después se retira el cono y la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene exceso de agua por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.
- V. Cuando la arena está seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos registrando este peso como peso saturado y superficialmente seco (Ph).
- VI. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta su peso constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua.

Para saber cuando el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrar como peso seco del material (P_s), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.

Calculo.

$$\% \text{ HUMEDAD DE ABSORCIÓN} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$



Figura No. 14. Humedad de Absorción en arenas.

ARENAS		
PESO HÚMEDO	247.30 grs	262.90 grs
PESO SECO	239.50 grs	254.90 grs
AGUA ABS.	7.80 grs	8.00 grs
% ABS.	3.26%	3.14%
PROMEDIO	3.20%	

Tabla 10. Absorción en arena.

3.1.2 Densidad de la arena.

Consiste en determinar el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre otra.

Equipo.

- Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde tronco cónico.
- Pizón.
- Probeta.
- Frasco.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento.

- I. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.
- II. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial (V_i) en cm^3 . Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (P_a) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.
- III. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua porque esto no ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y vamos a registrar este valor como volumen final (V_f).

Cálculos.

$$DA = \frac{P_a}{V_f - V_i}$$

Donde:

DA = densidad de la arena en gr/cm^3 .

Pa = peso de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

(Vf-Vi) = volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 .



Figura No. 15. Densidad en arena.

ARENAS		
VOLUMEN DESALOJADO	130.00 cm^3	128.00 cm^3
PESO HÚMEDO	300.00 grs	300.00 grs
DENSIDAD RELATIVA	2.31 grs/cm^3	2.34 grs/cm^3
PROMEDIO	2.33 grs/cm^3	

Tabla No. 11. Densidad de la arena.

3.1.3 Peso volumétrico seco y suelto de una arena (P.V.S.S.).

Obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Equipo.

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharón
- Una pala.

Procedimiento.

- I. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.
- II. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
- III. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener el peso neto del material.

Cálculos.

$$P.V.S.S. = \frac{P}{V}$$

Donde:

P.V.S.S. =Peso volumétrico seco y suelto (gramos/cm³).

P =Peso de la arena (gramos).

V =Volumen del recipiente (cm³).



Figura No. 16. P.V.S.S. en arena.

DATOS	P.V.S.S.	
Peso Bruto	5,730.00 grs	5,760.00 grs
Tara	1,890.00 grs	1,890.00 grs
Peso Neto	3,840.00 grs	3,870.00 grs
Volumen	2,759.00 cm ³	2,759.00 cm ³
Peso Volumétrico	1,391.81 Kg/m ³	1,402.68 Kg/m ³
PROMEDIO	1,397.25 Kg/m³	

Tabla No. 12. P.V.S.S. en arena.

3.1.4 Peso volumétrico seco y varillado de una arena (P.V.S.V.).

Cosiste en obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Equipo.

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula. Un cucharón y una pala.

Procedimiento.

- I. Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.
- II. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
- III. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener el peso neto del material.

Cálculos.

$$P.V.S.V. = \frac{P}{V}$$

Donde:

P.V.S.V. =Peso volumétrico seco y varillado (gramos/cm³).

P =Peso de la arena (gramos).

V =Volumen del recipiente (cm³).



Figura No. 17. P.V.S.V. en arena.

ARENAS		
DATOS	P.V.S.V.	
Peso Bruto	6,120.00 grs	6,060.00 grs
Tara	1,890.00 grs	1,890.00 grs
Peso Neto	4,230.00 grs	4,170.00 grs
Volumen	2,759.00 cm ³	2,759.00 cm ³
Peso Volumétrico	1,533.16 Kg/m ³	1,511.42 Kg/m ³
PROMEDIO	1,522.29 Kg/m³	

Tabla No. 13. P.V.S.V. en arena.

3.1.5 Granulometría en arena.

Pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

Para lo cual se deberá efectuar el registro correspondiente y el cálculo para comparar los resultados de decidir si es o no aceptable la arena.

Equipo.

- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola con su respectiva tapa.
- Una balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

Procedimiento.

- I. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
- II. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.
- III. Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
- IV. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.
- V. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente.
- VI. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas, para lo cual se invertirá la malla con todo cuidado limpiando con cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.

VII. Se procede a pesar cada uno de los materiales retenidos en las mallas hasta el décimo de gramo anotando los pesos en el registro correspondiente.

Calculo.

$$M.F. = \frac{\text{suma del \% acumulado de la malla 8 hasta la 100}}{100}$$



Figura No. 18. Granulometría en arena.

MUESTRA PROMEDIO EN ARENA			
PESO DE LA MUESTRA:	402.55 grs		
MALLA	PESO RETENIDO PARCIAL (grs)	% RETENIDO PARCIAL %	% RETENIDO ACUMULADO %
8	73.60	18.28	18.28
16	122.30	30.38	48.66
30	93.50	23.23	71.89
50	46.20	11.48	83.37
100	26.10	6.48	89.85
200	19.05	4.73	94.58
CHAROLA	21.80	5.42	100.00
SUMAS	402.55	100.00	---

Tabla No. 14. Granulometría en arena.

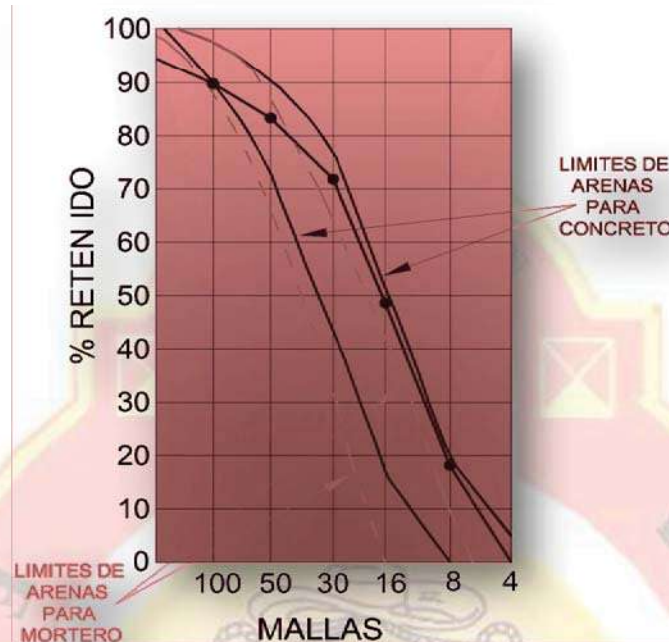


Figura No. 19. Gráfica de granulometría en arena.

Como se puede observar en la grafica anterior la arena se encuentra dentro de los límites para concretos por lo que es adecuada para usarla como agregado fino en la elaboración de concretos.

El modulo de finura obtenido de la muestra representativa de arena es de 3.12.

3.1.6 Humedad de absorción en grava.

Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Equipo.

- Muestra de grava de aproximadamente un kilogramo.
- Franela.
- Charolas metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.

- Vidrio.
- Mallas 3/4 y 3/8".
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento.

- I. De la muestra que se trae de campo se criba a través de las mallas 3/4 y 3/8 y del material que pasa la malla 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola un muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.
- II. Enseguida con una franela se seca la muestra superficialmente de la grava de aproximadamente 300 gramos anotando este valor como (Ph) peso saturado y superficialmente seco.
- III. Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuándo se eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrando este peso como (Ps) peso seco del material.

Cálculos:

$$\% H. ABSORCIÓN = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Donde:

Ph = peso saturado y superficialmente seco de la grava en gramos.

Ps = peso seco de la grava en gramos.



Figura No. 20. Humedad de absorción en grava.

Especificaciones.

TIPO DE ABSORCIÓN	% H. ABSORCIÓN
BAJA	MENOS DEL 2%
MEDIA	ENTRE EL 2% Y EL 4%
ALTA	MÁS DEL 4%

Tabla No. 15. Especificaciones para absorción en grava.

PESO HÚMEDO	305.90 grs	303.10 grs
PESO SECO	296.70 grs	294.40 grs
AGUA ABS.	9.20 grs	8.70 grs
% ABS.	3.10%	2.96%
PROMEDIO	3.10%	

Tabla No. 16. Absorción en grava.

De acuerdo a las especificaciones la absorción en la grava es media.

3.1.7 Densidad en grava.

Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en peso por unidad de volumen.

Equipo.

- Muestra representativa de grava.
- Probeta graduada.
- Picnómetro.
- Franela.
- Charola.

Procedimiento.

- I. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, este peso se registra como el peso de la muestra (P).
- II. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.

Cálculos:

$$D = \frac{P}{V}$$

Donde:

D=densidad en gr/cm³.

P= peso de la grava en gr.

V= volumen de la grava cm³.



Figura No. 21. Densidad en grava.

VOLUMEN DESALOJADO	108.00 cm ³	110.00 cm ³
PESO HÚMEDO	231.90 grs	231.90 grs
DENSIDAD RELATIVA	2.15 grs/cm ³	2.11 grs/cm ³
PROMEDIO	2.13 grs/cm³	

Tabla No. 17. Densidad en grava.

3.1.8 Peso volumétrico seco y suelto en grava (P.V.S.S.).

Determinar el peso por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Equipo.

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente con un volumen de 10 litros.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Rastrillo.

Procedimiento.

- I. Se seca la muestra hasta peso constante, esto se puede realizar extendiendo el material con el rastrillo al sol para lograr el secado.
- II. Cuando el material este completamente seco, se continúa con el siguiente procedimiento.
- III. Primeramente se determina el peso y el volumen del recipiente que vamos a utilizar. Enseguida con el cucharón se va llenando el recipiente, enseguida con el cucharón se va llenando el recipiente dejando caer la grava, a la altura de 5 cm, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto es sin que el recipiente se someta a vibraciones hasta que quede completamente lleno y forme un cono el material.
- IV. Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico ya que esta enrasado se pesa obteniendo así el peso del recipiente más el peso del material.

Cálculos.

$$P.V.S.S. = \frac{\text{Peso de la grava}}{\text{Volumen de la grava}}$$



Figura No. 22. P.V.S.S. en grava.

DATOS	P.V.S.S.	
Peso Bruto	15,100.00 grs	15,100.00 grs
Tara	2,920.00 grs	2,920.00 grs
Peso Neto	12,180.00 grs	12,180.00 grs
Volumen	10,605.00 cm ³	10,605.00 cm ³
Peso Volumétrico	1,148.51 Kg/m ³	1,148.51 Kg/m ³
PROMEDIO	1,148.51 Kg/m³	

Tabla No. 18. P.V.S.S. en grava.

3.1.9 Peso volumétrico seco y varillado en grava (P.V.S.V.).

Obtener el peso de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

Equipo.

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente de 10 litros de volumen.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Varilla punta de bala.

Procedimiento.

- I. Se seca la grava donde quede expuesta a los rayos del sol, se obtiene el peso y el volumen exacto del recipiente que se va utilizar.
- II. Enseguida con el cucharón se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.
- III. Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes distribuyéndolo en toda la superficie, al termino se enrasa el recipiente y se pesa, registrando los datos siguientes.

Cálculos.

$$P.V.S.V. = \frac{\text{Peso de la grava}}{\text{Volumen de la grava}}$$



Figura No. 23. P.V.S.V. en grava.

DATOS	P.V.S.V.	
Peso Bruto	16,200.00 grs	16,200.00 grs
Tara	2,920.00 grs	2,920.00 grs
Peso Neto	13,280.00 grs	13,280.00 grs
Volumen	10,605.00 cm ³	10,605.00 cm ³
Peso Volumétrico	1,252.24 Kg/m ³	1,252.24 Kg/m ³
PROMEDIO	1,252.24 Kg/m³	

Tabla No. 19. P.V.S.V. en grava.

3.1.10 Granulometría en grava.

Obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava.

Equipo.

Muestra aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.

Juego de mallas: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", y N° 4.

Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de la mallas.

Balanza con aproximación al gramo.

Recipiente de 10 litros.

Procedimiento.

- I. Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y este peso se registra como peso de la muestra a realizarse el cribado o granulometría (Pm).
- II. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, agitándolas ya sea de forma manual o con la ayuda de alguna máquina para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla de resultados.



Figura No. 24. Granulometría en gravas.

PESO DE LA MUESTRA:		12,290.00 Kg	
MALLA	PESO RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO
	(grs)	%	%
2 "	0.00	0.00	0.00
1 1/2 "	30.00	0.24	0.24
1 "	505.00	4.11	4.35
3/4 "	1650.00	13.43	17.78
1/2 "	2680.00	21.81	39.59
3/8 "	2615.00	21.28	60.86
No. 4	4195.00	34.13	95.00
PASA No.4	615.00	5.00	100.00
SUMAS	12,290.00	100.0	---

Tabla No. 20. Granulometría en grava.

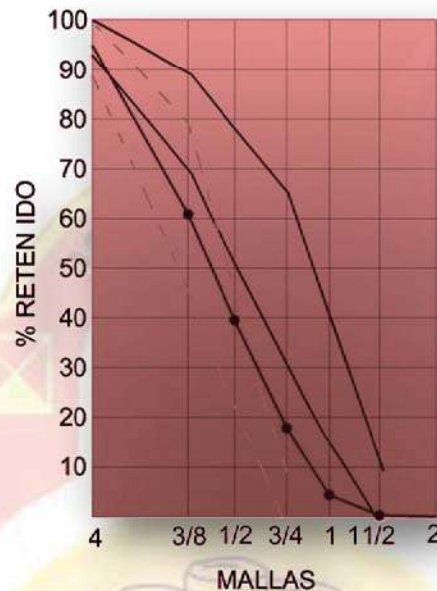


Figura No. 25. Grafica de granulometria en grava.

El tamaño máximo de una grava debe estar entre el 5% de material retenido parcial. Por lo tanto el tamaño máximo es de 1”.

3.2. Diseño del concreto de alta resistencia $f'c = 250\text{Kg/cm}^2$.

El diseño del concreto para las probetas se realizó mediante el uso del método ACI (American Concrete Institute), con un revenimiento de 15 cm. y desperdicio del 15%. Se utilizó cemento tipo CPC-30R.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES						
MATERIAL	P.V.S.S. Kg/m³	P.V.S.V. Kg/m³	DENSIDAD	ABSORCION %	M. F.	T. MAX. Pulgadas
Arena	1397.25	1522.29	2.33	3.20	3.12	-
Grava	1148.51	1252.24	2.13	3.10	-	1
Cemento	-	-	3.10	-	-	-

Tabla No. 21. Características de los materiales.

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ARENA

MATERIAL	PESO (Kg)	DENSIDADES	VOLUMEN (m ³)
Cemento	358.43	3.10	0.116
Agua	202.00	1.0	0.202
Aire	-	-	0.015
Arena	-	-	-
Grava	798.85	2.130	0.375
Suma =			0.708

Tabla No. 22. Estimación del volumen de arena para 1m³.

PROPORCIONES EN PESO Y EN VOLUMEN

MATERIAL	VOLUMEN (lt/m ³)	DENSIDAD	PESO (Kg)	REL. EN PESO
Cemento	115.62	3.10	358.43	1.00
Agua	202.00	1.00	202.00	0.56
Arena	291.92	2.33	678.94	1.89
Grava	375.45	2.13	798.85	2.23
Aire	15.00	-	-	-
Total	1000	-	2038.22	-

Tabla No. 23. Proporciones en peso y en volumen para 1m³.

CANTIDADES EN PESO CON RELACION A/C=0.50

MATERIAL	PESO (Kg)
Cemento	358.43
Agua	202.00
Arena	678.94
Grava	798.85
Total	2038.22

Tabla No. 24. Resumen de las cantidades en peso Necesarias para un metro cubico.



**CAPÍTULO 4
MATERIALES PARA LA
ELABORACION DE RECUBRIMIENTO**

La mezcla base del recubrimiento utilizado se conforma por los siguientes precursores:

- I. Hidróxido de Potasio (KOH).
- II. Puzolana 1: Óxido de Silicio (SiO_2).
- III. Puzolana 2: Óxido de Aluminio (Al_2O_3).
- IV. Agua desionizada.

Estos cuatro precursores son los encargados de que ocurra la “policondensación” en la mezcla, obteniendo un polímero inorgánico.

La proporción utilizada para el recubrimiento es una de las determinadas utilizando el siguiente diagrama ternario:

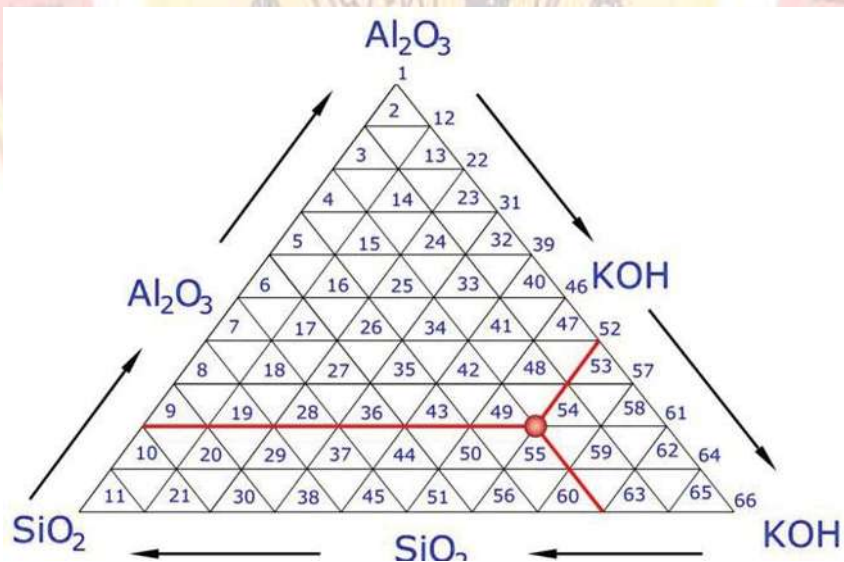
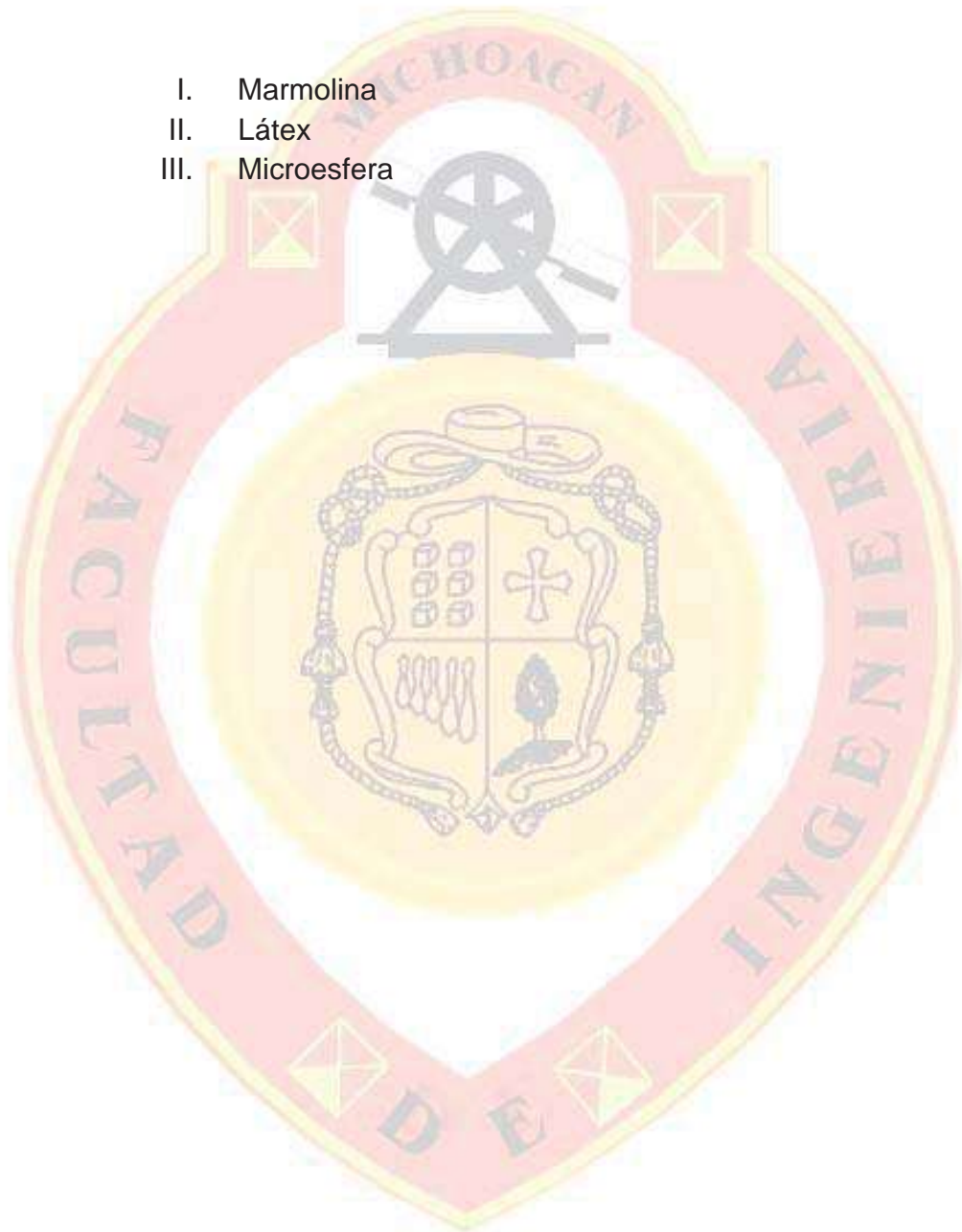


Figura No. 26. Diagrama ternario.

Como activante de la polimerización se utiliza el metacaolín (MK) y actuando como agregados para evitar el agrietamiento, la falta de adherencia y mejorar la manejabilidad de la mezcla se utilizaron:

- I. Marmolina
- II. Látex
- III. Microesfera





**CAPÍTULO 5
EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS**

5.1. Elaboración de Sulfato de Sodio Anhidro.

La solución de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) fue elaborada basándose en la norma ASTM D1411-09 (Standard Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes).

Para su elaboración se utilizaron 350gr. de Sulfato de Sodio para disolver en 1 lt. de agua destilada. Para asegurar la dilución del Sulfato de Sodio, se usaron agitadores eléctricos y se agrego gradualmente el sulfato al agua en un lapso de 10 minutos.

La concentración molar de la solución está regida por el número de moles del soluto y el volumen de solvente.

ELEMENTO	PESO MOLAR (grs/mol)	No. de moléculas	PESO MOLAR TOTAL (grs/mol)
Na (Sodio)	22.9898	2	45.9798
S (Azufre)	32.06	1	32.06
O (Oxigeno)	15.9994	4	63.99976
Na_2SO_4			142.0394

Tabla No. 25. Peso molecular del Sulfato de Sodio.

$$\text{Numero de moles} = \frac{\text{masa}}{\text{peso molecular}}$$

$$\text{Numero de moles} = \frac{350 \text{ grs.}}{142.0394 \text{ grs/mol}}$$

$$\text{Numero de moles} = 2.46 \text{ mol}$$

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{Numero de moles}}{\text{Volumen de solvente}}$$

$$\text{Molaridad} = \frac{2.46 \text{ mol}}{1 \text{ lt}}$$

$$\text{Molaridad} = 2.46 \text{ mol/lt}$$

Se realizaron 220 litros de solución resultado del cálculo del volumen de las tinas en donde se sumergieron las vigas de concreto reforzado, considerando un 10% de desperdicio. Antes de poder utilizar la solución de sulfato se debe dejar reposar un mínimo de 48 horas.



Figura No. 27. Elaboración de la solución de Sulfato de Sodio Anhidro.

5.2. Ataque acelerado a vigas de concreto reforzado $f'c=250 \text{ Kg/cm}^2$ con Sulfato de Sodio.

Después de realizada la solución de sulfato y pasadas las 48 horas mínimas de reposo, se realizó el ataque a las vigas consistente en cinco ciclos de ataque. La metodología utilizada fue la siguiente:

- I. Saturar las vigas durante 17 horas en la solución de sulfato.
- II. Sacar las vigas y secarlas superficialmente para pesarlas y obtener su peso saturado.
- III. Colocar las vigas en el horno a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas.
- IV. Sacar las vigas del horno y dejarlas enfriar.
- V. Pesarlas para obtener su peso seco.

Las vigas para los ensayos fueron elaboradas por el Ing. Rafael Hurtado Solórzano, para su tesis de licenciatura.

Imágenes de las vigas elaboradas:

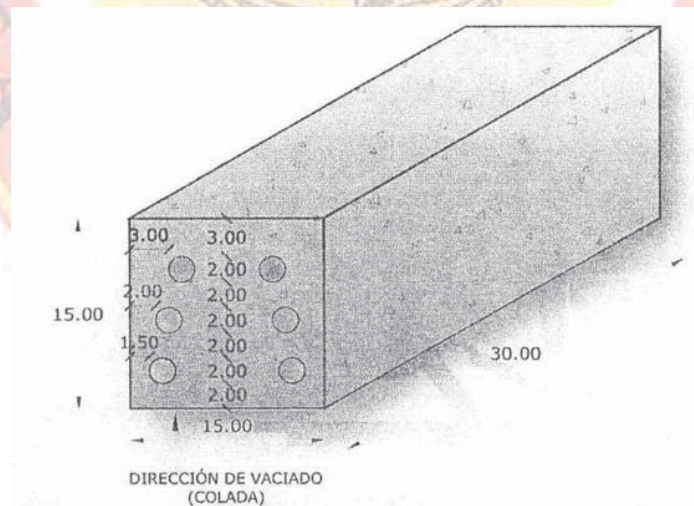


Figura No. 28. Dimensiones de las vigas.

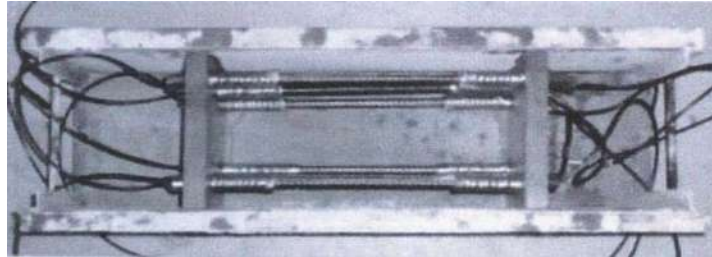


Figura No. 29. Fotografía interior de las vigas.

Como protección para la conexión entre la varilla y el cable se colocaron tubos de plástico a 7.5 cm. de profundidad, el tubo esta relleno con silicón para evitar la entrada de contaminantes. Todo esto con el fin de garantizar la medición correcta del G_{corr} .

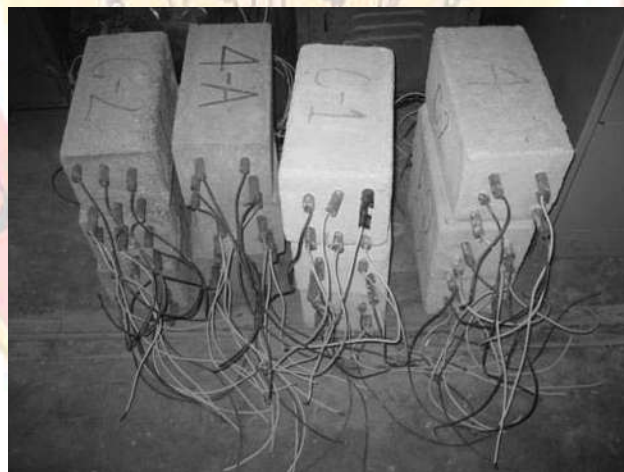


Figura No. 30. Estado inicial de las vigas. Sin atacar.



Figura No. 31. Estado de las vigas después del segundo ciclo de ataque.



Figura No. 32. Estado de las vigas después del tercer ciclo de ataque.

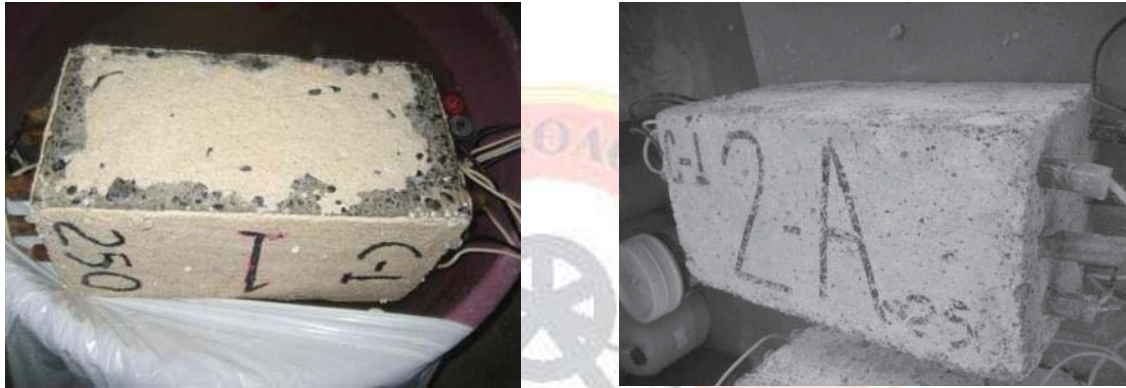


Figura No. 33. Estado de las vigas después del cuarto ciclo de ataque.



Figura No. 34. Estado de las vigas después del quinto ciclo de ataque.

5.2.1 Peso húmedo y peso seco de las vigas durante las pruebas.

SIN RECUBRIMIENTO		CON RECUBRIMIENTO	
VIGA	PESO (Kg)	VIGA	PESO (Kg)
1-A	13.40	1	15.30
2-A	13.80	2	15.30
3-A	13.70	3	15.40
4-A	13.20	4	15.00
5-A	13.60	5	14.90
6-A	13.30	6	15.20

Tablas No. 26 y No. 27. Peso de las vigas a temperatura ambiente.

SIN RECUBRIMIENTO		CON RECUBRIMIENTO	
VIGA	PESO (Kg)	VIGA	PESO (Kg)
SATURADAS		SATURADAS	
1-A	14.10	1	16.10
2-A	14.20	2	15.80
SECAS		SECAS	
1-A	13.80	1	16.00
2-A	14.10	2	15.80

Tablas No. 28 y No. 29. Peso de las vigas después del segundo ciclo.

SIN RECUBRIMIENTO		CON RECUBRIMIENTO	
VIGA	PESO (Kg)	VIGA	PESO (Kg)
SATURADAS		SATURADAS	
1-A	14.20	1	16.30
2-A	14.30	2	16.20
SECAS		SECAS	
1-A	13.80	1	16.00
2-A	14.10	2	15.80

Tablas No. 30 y No. 31. Peso de las vigas después del tercer ciclo.

SIN RECUBRIMIENTO		CON RECUBRIMIENTO	
VIGA	PESO (Kg)	VIGA	PESO (Kg)
SATURADAS		SATURADAS	
1-A	14.20	1	16.20
2-A	14.30	2	16.10
SECAS		SECAS	
1-A	13.70	1	15.70
2-A	13.90	2	15.60

Tablas No. 32 y No. 33. Peso de las vigas después del cuarto ciclo.

SIN RECUBRIMIENTO		CON RECUBRIMIENTO	
VIGA	PESO (Kg)	VIGA	PESO (Kg)
SATURADAS		SATURADAS	
1-A	14.00	1	16.10
2-A	14.20	2	16.10
SECAS		SECAS	
1-A	13.90	1	15.90
2-A	14.00	2	15.80

Tablas No. 34 y No. 35. Peso de las vigas después del quinto ciclo.

PESOS HUMEDOS Y SECOS



Figura No. 35. Grafica de pesos húmedos y secos después de 5 ciclos de ataque de Sulfato de Sodio.

5.2.2 Parámetros obtenidos con el Gcorr durante las pruebas.

El Gcorr, también conocido como potenciostato-galvanostato, es el instrumento utilizado para obtener parámetros termodinámicos de las vigas de concreto reforzado durante los ataques de Sulfato de Sodio. Los parámetros que mide son; intensidad de corrosión, potencial electroquímico y resistividad eléctrica, esenciales para la determinación del tipo y grado de corrosión en una estructura.

5.2.2.1 Intensidad de corrosión.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
3	0.016	3	0.019	3	0.005	3	0.077
2	0.015	2	0.031	2	0.006	2	0.007
1.5	0.070	1.5	0.058	1.5	0.006	1.5	0.013
3	0.035	3	0.017	3	0.007	3	0.010
2	0.017	2	0.043	2	0.005	2	0.010
1.5	0.088	1.5	0.051	1.5	0.004	1.5	0.017

Tabla No. 36. Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
3	0.195	3	0.358	3	0.987	3	0.415
2	1.029	2	0.382	2	0.697	2	0.086
1.5	0.135	1.5	0.144	1.5	0.149	1.5	0.070
3	0.200	3	0.277	3	1.020	3	0.488
2	0.788	2	0.107	2	2.104	2	1.820
1.5	0.180	1.5	0.144	1.5	2.023	1.5	1.664

Tabla No. 37. Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REC. (cm.)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
3	0.063	3	0.461	3	0.162	3	7.109
2	0.062	2	0.259	2	0.324	2	0.082
1.5	2.479	1.5	0.089	1.5	0.067	1.5	1.097
3	0.114	3	1.525	3	4.210	3	0.019
2	2.527	2	0.233	2	0.601	2	0.137
1.5	0.610	1.5	1.421	1.5	0.094	1.5	0.588

Tabla No. 38. Mediciones de intensidad de corrosión obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO	CON RECUBRIMIENTO
	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	I _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
0	0.038	0.014
3	0.328	0.960
5	0.820	1.208

Tabla No. 39. Promedio de intensidad de corrosión después de 5 ciclos.

Intensidad de Corrosión

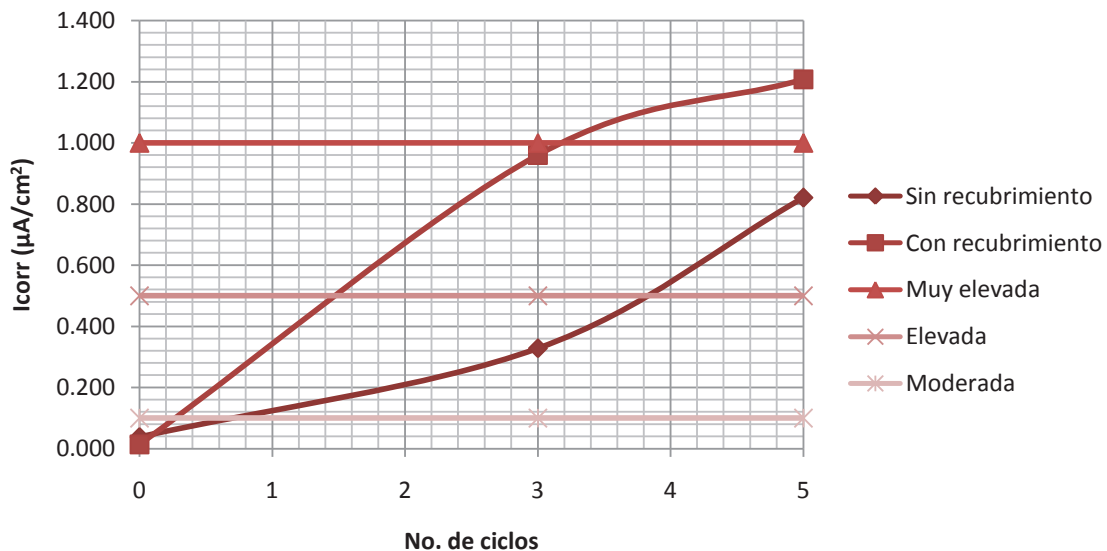


Figura No. 36. Grafica de intensidad de corrosión.

$i_{corr} < 0.1$	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderado
0.1 – 1.0	Elevada
$i_{corr} > 1.0$	Muy elevada

Tabla No. 40. Criterio para intensidad de corrosión. [Red DURAR, 2000]

5.2.2.2. Potencial electroquímico.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)
3	-38.0	3	-144.3	3	-257.0	3	-173.0
2	-111.3	2	-134.5	2	-316.1	2	-171.2
1.5	-147.2	1.5	-113.9	1.5	-186.8	1.5	-191.5
3	-125.1	3	-119.7	3	-268.9	3	-210.1
2	-125.6	2	-131.1	2	-241.1	2	-188.8
1.5	-155.6	1.5	-149.9	1.5	-156.6	1.5	-198.5

Tabla No. 41. Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)
3	-369.8	3	-370.6	3	-566.3	3	-400.3
2	-499.9	2	-299.8	2	-491.5	2	-424.4
1.5	-451.8	1.5	-272.7	1.5	-351.2	1.5	-447.2
3	-351.5	3	-338.7	3	-439.5	3	-376.0
2	-500.4	2	-474.4	2	-543.9	2	-430.6
1.5	-425.1	1.5	-424.8	1.5	-582.3	1.5	-435.9

Tabla No. 42. Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)	REC. (cm.)	Potencial (mV.)
3	-434.5	3	-372.5	3	-460.7	3	-464.0
2	-484.0	2	-389.7	2	-427.5	2	-345.5
1.5	-488.1	1.5	-314.5	1.5	-358.4	1.5	-395.5
3	-410.9	3	-372.9	3	-426.7	3	-351.1
2	-442.5	2	-391.4	2	-387.0	2	-396.7
1.5	-429.2	1.5	-403.7	1.5	-348.4	1.5	-347.2

Tabla No. 43. Mediciones de potencial electroquímico obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO	CON RECUBRIMIENTO
	Potencial (mV.)	Potencial (mV.)
0	-124.7	-213.3
3	-398.3	-457.4
5	-411.2	-392.4

Tabla No. 44. Promedio de potencial electroquímico después de 5 ciclos.

Potencial Electroquímico

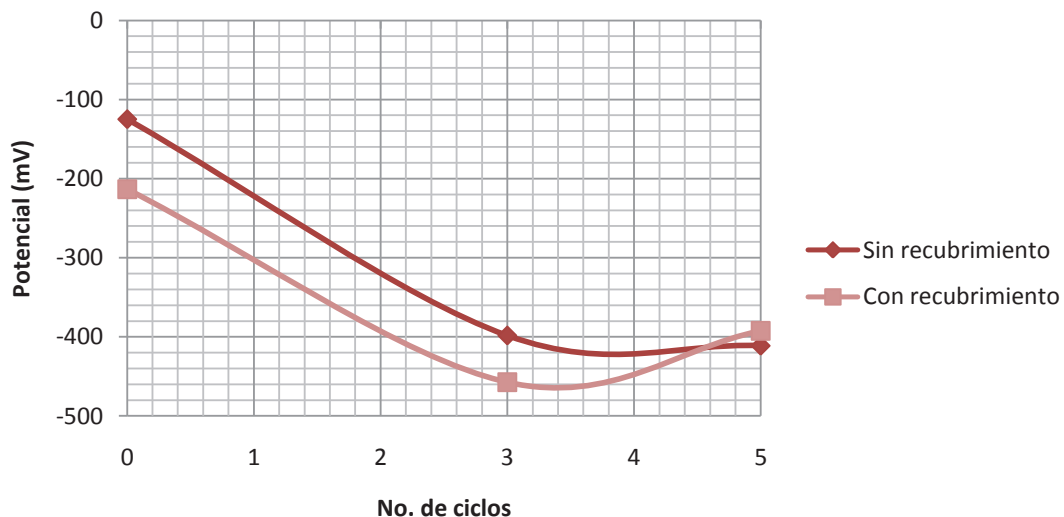


Figura No. 37. Grafica de potencial electroquímico.

Condición	Potencial (E)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado Pasivo	+0.200 a -0.200	Ausencia de Cl pH>12.5 H ₂ O (HR ↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	-0.200 a -0.600	Cl, O ₂ , H ₂ O (HR ↑)	Alto
Corrosión Uniforme	-0.150 a -0.600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O (HR ↑)	Moderado – Alto
	+0.200 a -0.150	Carbonatado O ₂ , seco (HR ↓)	Bajo
	-0.400 a -0.600	Cl elevado, H ₂ O o carbonatado H ₂ O (HR ↑)	Alto
Corrosión Uniforme	< -0.600	↑Cl, ↑ H ₂ O (sin O ₂)	Despreciable

Tabla No. 45. Criterio para el potencial electroquímico. [Red DURAR, 2000]

5.2.2.3. Resistividad Eléctrica.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)
3	1.02	3	1.34	3	8.67	3	1.56
2	1.03	2	0.99	2	11.64	2	1.94
1.5	0.66	1.5	0.89	1.5	18.30	1.5	3.02
3	1.16	3	1.32	3	6.65	3	1.77
2	1.46	2	1.09	2	13.54	2	1.59
1.5	1.28	1.5	0.87	1.5	12.37	1.5	2.90

Tabla No. 46. Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 15 de Julio de 2008 en la sección de corrosión del laboratorio. Vigas sin atacar.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)
3	0.83	3	0.91	3	0.50	3	1.16
2	0.51	2	0.61	2	0.56	2	1.07
1.5	0.71	1.5	0.47	1.5	1.10	1.5	1.20
3	0.67	3	0.69	3	0.52	3	0.89
2	0.32	2	0.61	2	0.32	2	0.21
1.5	0.59	1.5	0.63	1.5	0.36	1.5	0.22

Tabla No. 47. Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 31 de Julio de 2008 en el IMT. Después de 3 ciclos.

SIN RECUBRIMIENTO				CON RECUBRIMIENTO			
VIGA 1-A		VIGA 2-A		VIGA 1		VIGA 2	
REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)	REC. (cm.)	Resist. (KΩ)
3	0.77	3	1.13	3	0.80	3	0.42
2	0.57	2	0.85	2	0.69	2	0.68
1.5	0.89	1.5	0.62	1.5	1.14	1.5	0.90
3	0.77	3	1.07	3	0.68	3	1.12
2	0.50	2	0.60	2	0.60	2	0.42
1.5	0.67	1.5	0.81	1.5	1.10	1.5	0.39

Tabla No. 48. Mediciones de resistividad eléctrica obtenidas el 20 de Agosto de 2008 en el IMT. Después de 5 ciclos.

CICLOS	SIN RECUBRIMIENTO	CON RECUBRIMIENTO
	Resistividad (KΩ.cm)	Resistividad (KΩ.cm)
0	1.09	6.99
3	0.63	0.68
5	0.77	0.75

Tabla No. 49. Promedio de resistividad eléctrica después de 5 ciclos.

Resistividad Eléctrica

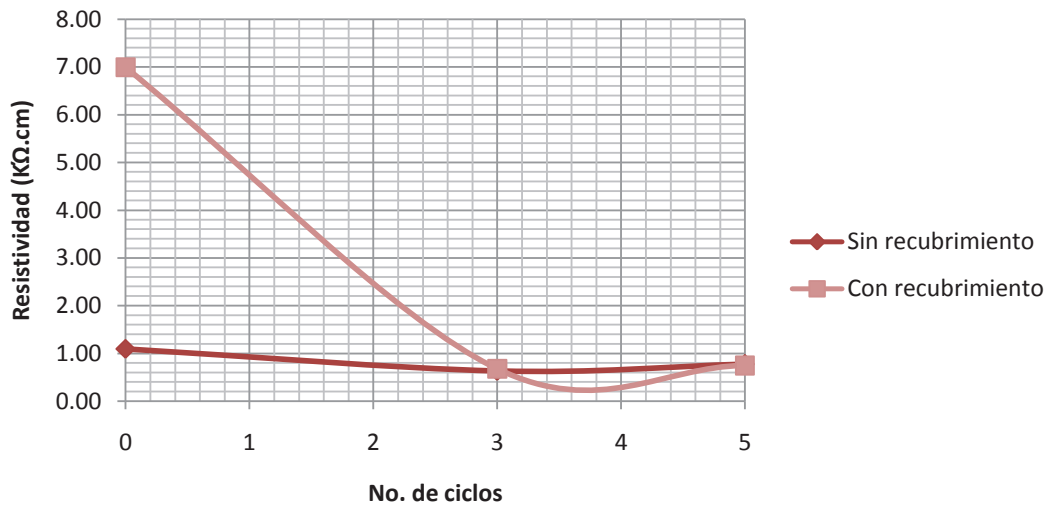


Figura No. 38. Grafica de resistividad eléctrica.

$\rho > 200 \text{ K}\Omega.\text{cm}$	Poco Riesgo
$200 \text{ K}\Omega.\text{cm} > \rho > 10 \text{ K}\Omega.\text{cm}$	Riesgo Moderado
$\rho < 10 \text{ K}\Omega.\text{cm}$	Alto Riesgo

Tabla No. 50. Criterio de resistividad eléctrica. [Red DURAR, 2000]

5.3 Proceso de elaboración de los cilindros de concreto.



Figura No. 39. Elaboración de los cilindros de concreto.

5.4 Resistividad eléctrica de cilindros de concreto.

El objetivo de esta prueba es determinar la resistividad eléctrica de cilindros de concreto con una resistencia a la compresión de $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$. La resistividad nos sirve para conocer la resistencia que opone en este caso el concreto a conducir una corriente eléctrica.

Equipo utilizado:

- 70 cilindros de concreto $f'_c = 250 \text{ Kg/cm}^2$ con 20cm de altura y 10 cm. de diámetro.
- Resistómetro de 4 puntas (Nillson 400)
- Dos placas circulares de cobre de 10 cm. de diámetro.
- Dos esponjas.
- Agua.

Procedimiento:

- I. Saturar 24 hrs. en agua los especímenes.
- II. Hacer un puente en dos de las cuatro puntas del resistómetro para obtener finalmente dos puntas. (Ver manual del aparato).
- III. Conectar a cada punta del resistómetro una placa de cobre.
- IV. Colocar una de las placas sobre la mesa de trabajo, encima de ella una de las esponjas saturada de agua, encima de la esponja se coloca el espécimen, encima del espécimen la otra esponja satura de agua y al final la segunda placa de cobre.
- V. Realizar la medición de resistividad del espécimen utilizando la caratula del resistómetro.

Calculos:

$$\rho = R \frac{L}{A}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica (K Ω).

L= Longitud (cm.).

A= Área (cm²).

R= Resistencia eléctrica (K Ω).

No. Espécimen	Resistencia eléctrica (Ω)	No. Espécimen	Resistencia eléctrica ($K\Omega$)
1	3500	36	3800
2	3600	37	3600
3	3600	38	3400
4	3700	39	3700
5	3600	40	3700
6	3500	41	4000
7	3900	42	3400
8	3700	43	3800
9	3500	44	4200
10	3500	45	3500
11	3400	46	3400
12	3800	47	3700
13	3500	48	3500
14	3200	49	3600
15	3600	50	3600
16	3400	51	3200
17	3700	52	3300
18	3200	53	3200
19	3400	54	4200
20	3500	55	4400
21	3300	56	3500
22	3300	57	3700
23	3000	58	3900
24	3700	59	3200
25	3100	60	3800
26	3300	61	3500
27	3600	62	4000
28	3300	63	3900
29	3800	64	3600
30	3600	65	3700
31	3400	66	3300
32	3000	67	3600
33	3700	68	3700
34	3200	69	3200
35	4000	70	4000

Tabla No. 51. Medidas de resistencia eléctrica de los cilindros de concreto.

AREA (cm²)	LONGITUD (cm.)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (Ω.cm)
78.54	20	909.09

Tabla No. 52. Promedio de la resistencia eléctrica de los cilindros de concreto.



Figura No. 40. Medición de la resistividad eléctrica en los cilindros de concreto.



**CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES**

La velocidad de corrosión como es de esperarse, en las vigas sin atacar se mantuvo en un nivel despreciable de corrosión con y sin recubrimiento, gracias a que el pH del concreto hace que se forme la capa de pasivación en la interface acero-concreto. Para el tercer ciclo de ataque se observa un incremento en la velocidad de corrosión en las vigas recubiertas debida a la perdida de la película pasivante y a la formación de una diferencia de potencial que da forma a la celda de corrosión y comienza el proceso de oxidación y reducción del Fe. Este resultado es contrario al pretendido ya que la probabilidad de corrosión en las vigas sin recubrir es elevada mientras que en las vigas recubiertas la probabilidad es muy elevada. Para el quinto ciclo continúa elevándose la intensidad de corrosión de la misma manera, no teniendo mucha diferencia entre vigas recubiertas y sin recubrir.

Otra medida de la probabilidad de corrosión es el potencial electroquímico. Antes de ser atacadas con el sulfato de sodio, las vigas, recubierta y sin recubrir, tienen un potencial alto por lo que la probabilidad de que exista corrosión es muy baja. Para el tercer ciclo se comportan de manera proporcional las dos vigas, pero para el quinto ciclo la viga recubierta tiene menor probabilidad de corrosión que la viga no recubierta. Este resultado nos muestra que el recubrimiento retarda el inicio de la corrosión.

En cuanto a la resistividad eléctrica, la viga sin recubrimiento siempre se mantiene en un alto riesgo de corrosión, mientras que la viga recubierta comienza con un riesgo de corrosión menor antes del ataque. Para el tercer ciclo las dos vigas muestran un alto riesgo de corrosión. Ya para el quinto ciclo las dos vigas tienen casi el mismo riesgo de corrosión. Este comportamiento respalda el resultado anterior debido a que el recubrimiento si concede una barrera protectora al concreto y ofrece resistencia al paso de los iones despasivantes.

La resistividad eléctrica resultante de los cilindros de concreto muestra que el concreto ofrece facilidades para el flujo de los iones despasivantes gracias a la porosidad del mismo. Por eso es necesaria la creación de un recubrimiento que retarde los efectos de la corrosión en el acero.

Referencias.

- [1] American Society for Testing and Materials. ASTM C150/C150M – 09.
- [2] American Society for Testing and Materials. ASTM D1411 – 09.
- [3] Angélica del Valle Moreno, Tezozómoc Pérez López, Miguel Martínez Madrid. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación técnica No. 182. Sanfandila, Queretaro. 2001. ISSN 0188-7297.
- [4] Ávila Javier, Genescá Joan. Mas allá de la herrumbe. Fondo de cultura económica. Tercera edición, 2002. México, D.F. ISBN 968-16-2396-7.
- [5] Bentur Arnor, Diamond Sidney y Berke S. Neal. Steel corrosión in concrete: Fundamentals and civil engineering practice. Taylor & Francis Group. Primera edición, 1977. ISBN 0-419-22530-7.
- [6] Cortes M. María Teresa, Ortiz H. Pablo. Corrosión. Apuntes científicos uniandinos No. 4. Diciembre, 2004.
- [7] Castro Borges Pedro, Castillo René M. Carpio Juan J., Genescá Juan, Helene Paulo, López Waltter, Pazini Enio J., Sanjuán Miguel A., Véleva Lucién. Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, vida útil y reparaciones. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C. Primera edición, 1998. ISBN 968-464-085-4.
- [8] Davidovits Joseph, Chemistry of geopolymetric systems. Presented at the Geopolymer '99 international conference. Francia, 1999.
- [9] Davidovits Joseph, Geopolymer chemistry and applications. A practical and scientific approach to sustainable development. Segunda edición, 2008 ISBN 2-9514920-1-9.
- [10] Davidovits Joseph, soft mineralurgy and geopolymers in: Proceedings of the 1st. international conference on Geopolymer '88. Vol. 1, Compiègne, France.
- [11] Gonzáles Cuevas Oscar M., Robles F. Francisco. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. LIMUSA. Cuarta edición, 2005. ISBN 968-18-6446-8.

- [12] MacCormack Jack C. Diseño de concreto reforzado. Alfaomega. Cuarta edición, 2002. ISBN 970-15-0633-2.
- [13] Navarro Sánchez Luis Manuel, Martínez Molina Wilfrido, Espinoza Mandujano José Antonio. Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Primera edición, Julio de 2000.
- [14] Neville A. M. y Brooks J. J., Tecnología del concreto. Trillas, 1998. ISBN 9682494614.
- [15] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-414-ONNCCE-2004. "Industria de la construcción –Cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba. Febrero, 2005.
- [16] Parker Harry, James Ambrose. Diseño simplificado de concreto reforzado. LIMUSA. México, D.F., 2008. ISBN 13-978-968-18-5190-3
- [17] Red iberoamericana XV.B. "DURAR" (Durabilidad de la armadura) Manual de inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras de hormigón armado. Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Tercera edición, Agosto de 2000. ISBN 980-296-541-3.
- [18] Rodríguez Erich, de Gutiérrez Ruby Mejía, Bernal Susan, Gordillo Marisol. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. Cartagena de Indias, Colombia. Octubre, 2008.
- [19] Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Madrid Miguel. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Sanfandila, Queretaro. 2001. ISSN 0188-7297.
- [20] Torres Acosta Andrés Antonio, Ramírez Rentería Augusto Jorge, Martínez Madrid Miguel. Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales. Publicación técnica No. 287, 2006. ISSN 0188-7297.