



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y  
APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS  
APLICADAS**

**“EVALUACIÓN EN LA CORROSIÓN Y PROTECCIÓN  
DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDAS DE  
CONCRETO EN PRESENCIA DE GRAFITO Y SU  
EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS-  
ELECTROQUÍMICAS”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**PRESENTA:**

**ARQ. URB. ALEJANDRO FLORES NICOLÁS**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN**

**SINODALES: DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
DR. ISAÍ ROSALES CADENA  
DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS  
DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**DICIEMBRE 2020**

Cuernavaca, Morelos, a 19 de noviembre de 2020.

**DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO EN**  
**INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “EVALUACIÓN EN LA CORROSIÓN Y PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDAS DE CONCRETO EN PRESENCIA DE GRAFITO Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS-ELECTROQUÍMICAS”, que presenta el alumno **ALEJANDRO FLORES NICOLÁS**, para obtener el título de **MAestrÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*  
*Una universidad de excelencia*

**DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**DR. ISAÍ ROSALES CADENA**

**DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS**

**DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ**

**DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN**

Se adiciona efirma UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JORGE URUCHURTU CHAVARIN | Fecha:2020-11-19 14:31:55 | Firmante**

Sw6BOO21Clp493F1AIIURYTheElwrjszfDFoNVof71duLIQBtDdz4R1HDXJsl3sZcMwxYRpUs0ro+Ql2WuxErrn0eLw94pPegE7mf8LVBKH0/soXAMgJlzb6nbv5Ihw3saORV4E3Jd6gJblo+L29D7bi3byk8ZbQEMd0gG4cyRa3w4iUDQMLYwybneFVfoszsoyMLBlu8AC2wAtyK51/aR6I3RvbYF/Ek3CS9dyCiQF0aJriRlB0J/yi0DGaDwOs2djLsEfUt+0xewYDY7UG4qBKzPRHaPvWTSdK0iWq9biphWK40NhYee2Yay9VGWE17h8Sw6Fg1WNY7iXw==

**JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2020-11-21 12:20:15 | Firmante**

ORgqQ+hFaXvd6XTcQf3sbU+aei3V/T4htcZmXNzDkbEgQ+5T3dqlZBh5e/JXmDhC/JuLpKKNYLZPGFiQr3RSieUnCNaAzakMCw2TkWANKF1OwAESkYQzY464wywgrjERIGT1EVUUN8gU3mZ3/EOHQStvXhFefs+sAQlqC2P+8o3bHKhARciloNwSr8iXh5oVXJzftu+514A8fb8blBjb2qrZ87XMd6nWr0wA4FXsyoHaKulMI7dbRy6b/NFomScEtEw6ZTD6BB5maCw25TWqQzWvRRiJ9/Wzz+uggHFxlZnpJ+oQtWCQOqvXclL2jn1fNZbnatDN3QnBGJcw==

**ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS | Fecha:2020-11-22 21:18:03 | Firmante**

RWIMFMPiInqtXrTQ1Tr9DvQoyc+0bhuouyoMS+D2bEai+b8sN0DiKgYXgFAwYPh20Rj8bHeByNUhArO2QRAb9fcoA6DTLj6E4p2gjJu/Qyp5EF9PHuu+rnqqBUjKR0aswLGrj9zxCzMUe8HszwFBBFvvh2yMuOSgHPDGLLziOljiGehZh0IS5NrqsvsbG5d8lkQBcl41TFbLk4qWTPPNvU6j65FYtRSbglprboHk2yeRKd0HDLG8hDkuosgVPx47Sal/BbwnFO3QU2KbUQhm9dw6t5tAVECSAd2Fyy+abjxlCenb7Nel7P0V/v1OiX3XITD6rZty34hSHUNQ==

**ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2020-11-30 11:18:21 | Firmante**

k9olms2al9gOJXPVvXZ9Ak9sl6movhQWG8P2kuEPzRnXpSEdUoCVkxhdVatRXwHljzCY1/Z45tPayiqsX03uO2IWWamruR8ejDhmDsoFdj+nhe3ti902F78mCUO8bvy4wvY+AllmSzUHw61mSbVqTEkNWQW7TzOpLr0i+RS9eLknZ9bbPPQjglBclt4LOTbGm/kxuBX69321hd7+zS+NevRNOyk3JplLavOzEd5UoODqLKlejTlxFsYDkRgQgw/hBpx/igUajAeGw1DWR+i+m8fsGoaPUYETO2SfBVUN36bTWxXn+KmEV/KBJEhWlj9QR+ia+yyqdU1nPtTcoJg==

**MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ | Fecha:2020-12-04 11:37:32 | Firmante**

Jc0MdR93PZXdj1Khy/Qyg7NjYDMK2TEzrCcEK4v4HdunlcofKQfjOcsz4nzeopawzRwyHXyV6ZoP8P0B0awRjnpZrHjdy7sE7q+Yf+j2gB43KKuY/QyqAPaFfcwUKhwTA7fN5JGVCzgXyzl4nBSwa2q6jvce+m7BdHXvAY+3Dg8XsZrWGP2Ejy68OeqTEDOiXzMIa39tiC7DlIlxCHUPaiBkAbb3w3e+KYpJrxx53FQcqHXnbUbdYa2tN4We3W4jeEcUranCEAU BzkVS9HTZCqwWs39aXz5QvL83GDT5xcA74zhWSL+EdBBjY3ER2HJGXAtnyCnflWGuGqA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



IBdVm5

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/P8OqBs47fpCsSacn2HKD5ocqdThZE7cj>



---

## RESUMEN

En esta presente investigación se estudió el uso del material de carbono en su forma alotrópica de grafito, como adición en el concreto reforzado, evaluando su efecto en las propiedades físicas y electroquímicas. Se elaboraron 4 diferentes calidades de concreto reforzado, con porcentaje de grafito 2.5 %, 7.5% y 15 % como sustitución parcial del cemento, para su evaluación en la resistencia a la compresión y su resistencia a la corrosión del acero de refuerzo. Se realizaron las pruebas físicas de los materiales de agregado fino y agregado grueso para el diseño de mezcla como: peso volumétrico seco y suelto, peso volumétrico seco compacto, granulometría del agregado, densidad y absorción. Al concreto recién mezclado se realizaron las pruebas físicas como: revenimiento, temperatura, masa unitaria, contenido de aire. En las pruebas de resistencia a compresión ( $F'c$ ) los especímenes se curaron a 28 días y se ensayaron durante 7, 14 y 28 días. En el ensayo de técnicas electroquímicas las muestras estuvieron inmersas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3 %, simulando un ambiente agresivo, durante 168 días de exposición. Se realizaron las técnicas electroquímicas como: potencial de media celda (H.C.P.), ruido electroquímico (E.N.) y resistencia a la polarización lineal (R.P.L.). Asimismo, se estudiaron los componentes químicos de la pasta de concreto; empleando las técnicas de difracción de rayos-X (D.R.X.) y microscopio electrónico de barrido (M.E.B.). Se observó que las muestras con adición de 2.5 % y 7.5% de grafito obtuvieron un  $F'c$  mayor comparado con la muestra control. Se apreciaron cloruros dentro de la matriz del concreto derivado de la contaminación de los agregados, afectando las propiedades electroquímicas del acero. En las técnicas electroquímicas, todas las muestras con y sin adición de grafito, adquirieron valores muy negativos de potencial de corrosión, y bajos valores de resistencia al ruido electroquímico ( $R_n$ ) y resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ), demostrando alta corrosión en el metal.

## ABSTRACT

In this present investigation, the use of carbon material in its allotropic form of graphite was studied, as an addition to reinforced concrete, evaluating its effect on the physical and electrochemical properties. Four different qualities of reinforced concrete were made, with 2.5%, 7.5% and 15% graphite percentage as partial cement replacement, for evaluation of compression resistance and its resistance to corrosion of reinforcing steel. Physical tests of fine aggregate and coarse aggregate materials were performed for your mix design as; loose and dry volumetric weights, compact dry volumetric weights, aggregate granulometry, density and absorption. To the recently mixed concrete the physical tests were used as; slump, temperature, unit mass, air content. In the compression resistance ( $F'c$ ) tests, the samples were cured at 28 days and tested for 7, 14, and 28 days. In electrochemical tests the samples were exposed in a 3% sodium chloride (NaCl) solution, simulating an aggressive environment, during 168 days. Different electrochemical techniques were performed such as: half-cell potential (H.C.P.), electrochemical noise (E.N.), and linear polarization resistance (L.P.R.), the chemical components of the concrete paste were also studied; using the techniques of X-ray diffraction (X.R.D.) and scanning electron microscope (S.E.M.). It was observed that the sample with the addition of 2.5% and 7.5% graphite obtained a higher  $F'c$  compared to the control simple. Chlorides were appreciated at the start of the concrete paste, derived from the contamination of the aggregates, affecting the electrochemical properties of steel. On the electrochemical properties with the additions of graphite, acquired very negative corrosion potential values, and low values of resistance to electrochemical noise ( $R_n$ ), and resistance to linear polarization ( $R_p$ ), demonstrating high corrosion in the metal.

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), por formar parte de esta institución y fortalecer mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante el inicio y término de este proyecto de investigación.

A mi asesor de tesis, el Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín, quisiera agradecer por permitirme la oportunidad de ser parte de sus asesorados; así mismo, por su apoyo, orientación, consejos y conocimientos brindados a lo largo de estos años de maestría.

A mis sinodales, el Dr. José Gonzalo González Rodríguez, el Dr. Isaí Rosales Cadena, a la Dra. Elsa Carmina Menchaca Campos y a la Dra. Miriam Flores Domínguez, por cada uno de sus comentarios y revisiones que en conjunto fortalecieron el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis amigos, Jaime Alonso, Jorge Sánchez, Antonio Morales, Moctezuma Medina y Antonio Rodríguez, por el apoyo mostrado en la elaboración de los especímenes de concreto.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional como familia que me han manifestado. Me permitió alcanzar este objetivo, seguiré aprendiendo de ustedes.

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto:

A mi padre Rogelio Flores, quien es una persona que admiro mucho por los valores inculcados hacia mí. Además, de sus consejos, apoyo y orientación.

A mi madre María Nicolás, una persona humilde que siempre se caracteriza por sus consejos y palabras alentadoras en momentos complicados, junto con mi padre este objetivo no habría sido posible.

A mis hermanos Fabiola, Pedro, Mario, Rutila, Juan, Marisol y Edgar, he aprendido mucho de ustedes y me han dado valiosas lecciones.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	3
1.2 Justificación .....	4
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivo general.....	5
1.4.1 Objetivos específicos .....	5
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	6
2.1 Fundamentos teóricos del concreto .....	6
2.2 Concreto .....	6
2.3 Componentes del concreto .....	7
2.3.1 Cemento .....	8
2.3.2 Agua.....	8
2.3.3 Agregados.....	9
2.3.3.1 Clasificación según su tamaño.....	9
2.4 Agentes adicionales en el concreto hidráulico .....	10
2.4.1 Grafito .....	10
2.4.2 Estructura cristalina.....	11
2.4.3 Grafito natural .....	11
2.4.4 Características físicas y químicas .....	12
2.5 Diseño de mezcla de concreto.....	13
2.5.1 Elección del asentamiento o revenimiento .....	14
2.5.2 Contenido de agua .....	15
2.5.2.1 Por resistencia .....	16
2.5.3 Cálculo del contenido del cemento.....	16
2.5.4 Estimación del contenido de agregado grueso y agregado fino	17
2.6 Concreto en estado fresco.....	19

2.6.1	Asentamiento o revenimiento .....	19
2.6.2	Temperatura del concreto .....	19
2.6.3	Masa volumétrica unitaria.....	20
2.6.4	Contenido de aire por el método de presión .....	20
2.6.5	Elaboración de especímenes de concreto .....	21
2.6.6	Resistencia a la compresión.....	21
2.7	Mecanismos de corrosión .....	21
2.7.1	Corrosión en el acero de refuerzo del concreto .....	22
2.7.1.1	Durabilidad del concreto reforzado.....	23
2.7.1.2	Factores de la corrosión en el concreto reforzado.....	24
2.7.2	Difracción de rayos X .....	25
2.7.3	Microscopia electrónica de barrido (MEB) .....	26
2.7.4	Indicador de PH fenolftaleína .....	26
2.8	Técnicas electroquímicas .....	27
2.8.1	Método potencioestático .....	27
2.8.2	Potencial de media celda .....	28
2.8.3	Ruido electroquímico.....	29
2.8.3.1	Análisis de datos visuales y estadísticos.....	29
2.8.4	Resistencia a la polarización lineal.....	32
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>		<b>33</b>
3.1	Nomenclatura .....	33
3.2	Especímenes.....	35
3.2.1	Materiales para elaboración de mezcla de concreto.....	35
3.2.2	Caracterización física de los materiales para el diseño de mezcla. 37	
3.2.2.1	Pruebas físicas de los materiales.....	37
3.2.2.2	Peso volumétrico suelto y varillado de los agregados .....	38
3.2.2.3	Densidad y absorción del agregado fino .....	40
3.2.2.4	Densidad y absorción del agregado grueso .....	42
3.2.2.5	Granulometría del agregado fino y grueso .....	44
3.3	Diseño de concreto .....	45

3.4	Elaboración de mezcla de concreto .....	46
3.4.1	Prueba de consistencia o revenimiento .....	48
3.4.2	Medición temperatura del concreto .....	49
3.4.3	Prueba de masa unitaria .....	49
3.4.4	Determinación del contenido de aire en el concreto .....	50
3.4.5	Elaboración de especímenes .....	52
3.5	Curado.....	54
3.6	Pruebas de resistencia a compresión .....	55
3.7	Caracterización química.....	57
3.7.1	Difracción de rayos-X al concreto con adición de grafito. ....	57
3.7.2	Técnica microscopía electrónica de barrido (MEB) al concreto y acero de refuerzo. ....	58
3.8	Técnicas electroquímicas .....	58
3.8.1	Potencial de media celda .....	58
3.8.1.1	Electrodo de referencia. ....	59
3.8.2	Ruido electroquímico.....	59
3.8.3	Resistencia a la polarización lineal.....	60
3.9	Indicador de pH técnica de fenoltaleína .....	61
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>		<b>62</b>
4.1	Resultados de las técnica sde caracterización.....	62
4.1.1	Difracción de rayos-X.....	62
4.1.2	Microscopio electrónico de barrido. ....	65
4.1.2.1	Análisis de los componentes químicos en la técnica MEB ....	68
4.2	Resultado pruebas físicas de los componentes del concreto. ....	70
4.2.1	Granulometría de los Agregados.....	70
4.2.2	Revenimiento .....	71
4.2.3	Temperatura del concreto .....	72
4.2.4	Contenido de aire .....	72
4.2.5	Porosidad de la pasta de concreto. ....	73

---

4.2.6	Resultado de ensayo a compresión para el concreto con adición de grafito. ....	74
4.2.6.1	Fallo por compresión de los especímenes. ....	77
4.3	Técnicas electroquímicas .....	78
4.3.1	Resultado Potencial de Media celda. ....	78
	□ Probetas con 2.5% de grafito .....	80
	□ Probetas con 7.5% de grafito .....	82
	□ Probetas con 15% de grafito .....	84
4.3.2	Ruido electroquímico.....	86
	□ Probetas con 2.5% de grafito .....	89
	□ Probetas con 7.5% de grafito .....	91
	□ Probetas con 15% de grafito .....	93
4.3.3	Resistencia a la polarización lineal.....	98
4.4	Indicador con fenolftaleína.....	101
4.5	Resultado visual de las probetas de acero de refuerzo.....	102
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>105</b>
	Conclusiones.....	105
	Recomendaciones.....	107
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>108</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>119</b>

---

## LISTA DE TABLAS

### CAPITULO 2

<b>Tabla 2.1.</b> Clasificación de los agregados por su tamaño de partícula.....	10
<b>Tabla 2.2.</b> Comparación de los tipos de grafito.....	12
<b>Tabla 2.3.</b> Características químicas del grafito natural.....	13
<b>Tabla 2.4.</b> Propiedades del grafito natural .....	13
<b>Tabla 2.5.</b> Revenimiento recomendado .....	14
<b>Tabla 2.6.</b> Requisitos recomendados de agua de mezclado y contenido de aire .....	15
<b>Tabla 2.7.</b> Relación de agua y cemento, en el diseño de mezcla.....	16
<b>Tabla 2.8.</b> Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	17
<b>Tabla 2.9.</b> Criterio para medir el potencial de media celda del acero de refuerzo en concreto (ASTM C876-09) .....	29
<b>Tabla 2.10.</b> Valores de Índice de localización .....	31

### CAPITULO 3

<b>Tabla 3.1.</b> Nomenclatura empleada para pruebas de resistencia a la compresión .....	33
<b>Tabla 3.2.</b> Nomenclatura empleada para técnicas electroquímicas. ....	34
<b>Tabla 3.3.</b> Dosificación de diseño de mezcla de concreto $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ ..	45
<b>Tabla 3.4.</b> Dosificación de diseño de mezcla con diferentes porcentajes de grafito respecto al peso del cemento.....	45
<b>Tabla 3.5.</b> Dosificación de los 4 diseños de mezcla para 48 l de concreto...	46

### CAPITULO 4

<b>Tabla 4.1.</b> Compuestos químicos del GP, analizados mediante DRX .....	63
<b>Tabla 4.2.</b> Composición química de las muestras analizadas con la técnica MEB.....	69

---

<b>Tabla 4.3.</b> Prueba de revenimiento del diseño de mezcla.....	71
<b>Tabla 4.4.</b> Temperatura del concreto .....	72
<b>Tabla 4.5.</b> Porcentaje de aire en el diseño del concreto recién mezclado ....	73
<b>Tabla 4.6.</b> Porosidad del concreto .....	74
<b>Tabla 4.7.</b> Valores del ensayo a compresión para las muestras con adición de polvo de grafito, curado máximo de 28 días.....	75
<b>Tabla 4.8.</b> Resultado promedio análisis estadístico M1-0%. .....	86
<b>Tabla 4.9.</b> Velocidad y tipo de corrosión promedio en la muestra M1-0% ....	87
<b>Tabla 4.10.</b> Resultado promedio análisis estadístico M2-2.5% .....	89
<b>Tabla 4.11.</b> Velocidad y tipo de corrosión en la muestra M2-2.5%.....	90
<b>Tabla 4.12.</b> Resultado análisis estadístico en la muestra M3-7.5%.....	91
<b>Tabla 4.13.</b> Velocidad y tipo de corrosión de la muestra M3-7.5%.....	92
<b>Tabla 4.14.</b> Análisis estadístico promedio de la muestra M4-15 % .....	94
<b>Tabla 4.15.</b> Resultado de $R_n$ , velocidad y tipo de corrosión en la muestra M4-15%. .....	95
<b>Tabla 4.16.</b> Nivel de vida útil en el sistema acero/concreto .....	97
<b>Tabla 4.17.</b> Pendientes anódica y catódica de Tafel.....	99

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO 2

<b>Figura 2.1.</b> Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino y grueso .....	6
<b>Figura 2.2.</b> Porcentajes de pasta y cemento .....	7
<b>Figura 2.3.</b> Estructura cristalina del grafito a) hexagonal y b) romboédrico..	11
<b>Figura 2.4.</b> Cono de Abrams para prueba de asentamiento .....	19
<b>Figura 2.5.</b> a) Medidor de aire tipo A, b) Medidor tipo B. ....	20
<b>Figura 2.6.</b> Diagrama esquemático del ataque de cloruros a la armadura de acero de refuerzo en el concreto.....	23
<b>Figura 2.7.</b> Diagrama de potencial pH (Pourbaix), condiciones teóricas de corrosión, inmunidad y pasivación en el sistema hierro-agua 25 °C .....	24
<b>Figura 2.8.</b> Diagrama de celda electroquímica a través de potencióstato ....	28

### CAPITULO 3

<b>Figura 3.1.</b> Características generales del grafito en sus propiedades físicas y químicas. ....	35
<b>Figura 3.2.</b> Materiales para la fabricación de concreto reforzado, a) Arena del río papagayo, b) Grava piedra triturada, c) Cemento Portland CPC 30 R, d) Polvo de grafito, tamiz N°240. e) Agua de red pública y f) Varilla de acero N°1018 (3/8"). ....	36
<b>Figura 3.3.</b> a) Extendido de materiales expuesta al sol. b) Tamizado del agregado fino, tamiz N°4 .....	37
<b>Figura 3.4.</b> a) Cuarteo del agregado fino y b) agregado grueso.....	38
<b>Figura 3.5.</b> Compactación de la tara con la varilla de apisonamiento .....	39
<b>Figura 3.6.</b> Llenado de la tara, en la prueba de peso volumétrico.....	40
<b>Figura 3.7.</b> a) Saturación en estado seco de la arena, b) frasco de chapman para densidad del agregado fino.....	41
<b>Figura 3.8.</b> Medición de la densidad del agregado grueso .....	43

<b>Figura 3.9.</b> a) Máquina cribadora de arena, b) Tamaño de partícula de los diferentes tamices de la arena .....	44
<b>Figura 3.10.</b> a) Peso de los materiales colocados en recipiente b) Vaciado del material a la revolvedora .....	47
<b>Figura 3.11.</b> a) Colocación del concreto a la carretilla, b) Remezclado del concreto fresco para pruebas físicas.....	47
<b>Figura 3.12.</b> Prueba de revenimiento al concreto fresco .....	48
<b>Figura 3.13.</b> a) Llenado de concreto el molde para prueba de masa unitaria, b) Medición de la masa del concreto en una báscula precisión 5 g .....	50
<b>Figura 3.14.</b> Cierre hermético de la tapa del medidor tipo B para contenido de aire del concreto .....	51
<b>Figura 3.15.</b> a) Prueba del porcentaje de contenido de aire, b) Estabilización de la aguja del medidor tipo B. ....	52
<b>Figura 3.16.</b> a) Enrase de cilindros de concreto, b) Protección de especímenes por contaminación .....	53
<b>Figura 3.17.</b> Limpieza de varillas y preparación con cinta de teflón .....	53
<b>Figura 3.18.</b> Dimensiones cúbicos para pruebas electroquímicas. ....	54
<b>Figura 3.19.</b> Curado de especímenes cúbicos. ....	54
<b>Figura 3.20.</b> a) Medida del diámetro del espécimen, b) Medida del diámetro con el apoyo de vernier.....	55
<b>Figura 3.21.</b> a) Placas de neopreno puesta a los extremos del espécimen, b) Ensayo a compresión .....	56
<b>Figura 3.22.</b> a) Disolución de 3% de NaCl en agua, b) Especímenes inmersos en medio agresivo .....	57
<b>Figura 3.23.</b> Microscopio electrónico de barrido (MEB). ....	58
<b>Figura 3.24.</b> Celda electroquímica para la medición de potencial de media celda.....	59
<b>Figura 3.25.</b> Esquema de conexión para las pruebas de ruido electroquímico y resistencia a la polarización .....	60
<b>Figura 3.26.</b> Técnica de resistencia a la polarización lineal .....	60

**Figura 3.27.** a) Fractura del concreto para extracción del acero de refuerzo y aplicación del indicador de PH, b) Fenolftaleína al 1 % en alcohol..... 61

## CAPITULO 4

**Figura 4.1.** Difractogramas de rayos X del GP. Mi: mica; K: caolinita; M: montmorillonita; GH: grafito(2H); GR: grafito (3R) A: anortita; Q: Cuarzo .... 62

**Figura 4.2.** Difractograma para las muestras de concreto, curado a 28 días. a) M1-0%, b) M2-2.5% c) M3-7.5% y d) M4-15% de grafito ..... 64

**Figura 4.3.** Micrografía ampliación 1000 X y mapeo de elementos químicos de MEB curado a 28 días, a) M1-0%, b) M2-2.5%, c) M3-7.5%, d) M4-15%. .....66

**Figura 4.4.** Composición granulométrica a) agregado fino (arena). b) grueso (grava). ..... 70

**Figura 4.5.** Grafica de ensayo a compresión..... 76

**Figura 4.6.** Tipo de ruptura de los especímenes a) Probeta con 0% de grafito, curado a 28 días. b) Probeta con 2.5% de grafito, curado de 28 días, c) Probeta con 7.5% de grafito, curado 28 días, d) Probeta con 15% de grafito, curado a 28 días. .... 77

**Figura 4.7.** Potencial de corrosión de la muestra M1 con 0% de contenido de grafito. a) Potencial de media celda de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. b) Potencial promedio de las 3 barras de acero, de cada espécimen. c) Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo ..... 79

**Figura 4.8.** Potencial de corrosión de la muestra M2 con 2.5% de contenido de grafito. a) Potencial de media celda de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. b) Potencial promedio de las 3 barras de acero, de cada espécimen c) Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo.....81

**Figura 4.9.** Potencial de media celda de la muestra M3 con 7.5% de contenido de grafito. a) Potencial de corrosión de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. b) Potencial promedio de las 3 barras de acero de cada espécimen. c) Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo..... 83

**Figura 4.10.** Potencial de media celda de muestra M4 con 15% de contenido de grafito. a) Potencial de corrosión de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. b) Potencial promedio de media celda, de las 3 barras de acero, c) Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo ..... 85

**Figura 4.11.** Resultado promedio de las 4 muestras de concreto a) Ruido electroquímico b) velocidad de corrosión ..... 96

**Figura 4.12.** Grafica de  $i_{corr}$ , para estimación de vida útil del concreto reforzado ..... 97

**Figura 4.13.** Grafica del ensayo resistencia a la polarización lineal .....100

**Figura 4.14.** Superficie del concreto rociado con fenolftaleína después de 168 días de inmersión en ambiente salino .....101

**Figura 4.15.** Acero de refuerzo después de 168 días embebido en el concreto, en ambiente salino agresivo .....102

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción en la gran mayoría de obras civiles, terrestres y marítimas, se ha transformado en una de las estructuras más resistentes por sus propiedades mecánicas. Así mismo, se ha estudiado el fenómeno de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado, porque exige de una alta tecnología por las necesidades que tiene de conservación y mantenimiento [1]. El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza, primero actúa como una barrera física que lo aísla del medio ambiente, y segundo el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que lo pasiva de forma duradera [2].

El deterioro de la infraestructura existente como: puentes, tuberías, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, ferrocarriles, etc., es un problema serio en la actualidad que afecta no solo a las dependencias responsables de ellas, y muchas de las veces se debe a que no se tiene un correcto diagnóstico de las condiciones que afectarán a la estructura a lo largo de su vida, como es el medio ambiente [3]. En un ambiente agresivo los agentes químicos como los cloruros (Cl-) o el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto por la red de poros interconectados hasta llegar a los alrededores del acero de refuerzo. Después de que los agentes químicos penetran en el concreto y que la capa pasiva es destruida, el acero embebido en el concreto se corroe y se forman productos de corrosión [4]. Las propiedades físicas y electroquímicas de la interfaz acero/concreto se ven afectadas por lo que utilizar nuevos materiales en la matriz de concreto es importante para mejorar sus propiedades; en consecuencia, extender la durabilidad de las estructuras de concreto.

---

Actualmente, el uso del concreto a base de cemento con partículas de carbono y otras adiciones, son nuevos materiales compuestos con excelentes propiedades físicas y químicas; que los hacen adecuado para ser utilizado en la industria de la construcción como productos tecnológicamente avanzados [5]. Los principales materiales de carbono añadidos al concreto incluyen fibras de carbono, nanotubos de carbono, polvo de grafito, carbón negro y escamas de grafito; en esta investigación se ha dirigido a la utilización del polvo de grafito (GP).

El grafito es otra forma alotrópica del elemento carbono, consistente en láminas de átomos de carbono (grafenos) que forman un sistema de anillos condensado plano, existen dos formas posibles de apilamiento de los grafenos: la hexagonal tipo Bernal (ABAB) y la romboédrica (ABCABC); la estructura denominada “hexagonal simple” [6].

Heymsfield [7] incorporó el polvo de grafito con alto contenido de carbono en la pasta de concreto e informó que la absorción del GP, disminuyó a medida que aumentó el nivel del agregado de polvo de grafito. En consecuencia, la resistencia a compresión del diseño de la mezcla aumentó a medida que aumentaba el tamaño del agregado de polvo de grafito.

Además, otros estudios indican que la adición de grafito podría mejorar en gran medida la conductividad térmica; propiedades y reducir la capacidad calorífica específica [8].

Yuan [9] estudió el grafito molido expandido (G) con alta temperatura y reportó que la resistencia a la compresión disminuye con la adición de grafito y el aumento de relación a/c, mientras tanto, la conductividad térmica y el volumen de calor la capacidad aumenta con la adición de grafito. En las propiedades electroquímicas las pruebas demuestran que ocurre una disminución en el nivel de corrosión cuando se incrementa la relación de adición de material de carbono [10]. Ha [11] investigó acerca de la

---

corrosión del acero de refuerzo incrustados en el cemento Portland ordinario, reportó corrosión severa cuando el nivel de carbono y la ceniza volante se incrementó; la condición de humectación y secado con cloruro de sodio NaCl al 3% fue encontrado entre 6% y 8% de carbono mezclado con ceniza volante.

En este tema de investigación, se presenta el estudio en el comportamiento de la corrosión del concreto reforzado, con adición de polvo de grafito como sustituto parcial del peso del cemento, y el análisis en sus propiedades fisicoquímicas.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El concreto como comúnmente se denomina en nuestro país, no es un bien genérico como las piedras naturales o las arenas, sino un material de construcción que se diseña y se produce de conformidad con normas rigurosas. Para los fines y aplicaciones que se requieren en un proyecto determinado y con las características de economía, facilidad de colocación y consolidación, velocidad del fraguado y apariencia adecuada según su aplicación [12].

Pero hoy en día existen muchos factores que deterioran su periodo de vida o durabilidad, como es el caso de la corrosión en el concreto reforzado, lo que hace vulnerables al servicio en las estructuras.

La durabilidad del concreto Portland hidráulico se define como su resistencia a la acción del clima (meteorización), a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier otro proceso de deterioro. De tal manera que el concreto durable debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto a su medio ambiente [13].

En este tema de investigación, se evaluará la corrosión del acero de refuerzo embebido en la mezcla de concreto, adicionando material de grafito en

---

diferentes porcentajes con respecto al peso del cemento, para mejorar sus propiedades físicas y electroquímicas.

Utilizando materias primas iniciales como (arena y grava) de la región del municipio de Acapulco de Juárez, en el Estado de Guerrero; México. Considerando que esta zona se encuentra en un ambiente salino al ataque de cloruros, generados por la sal del mar y la arena de las playas.

## 1.2 Justificación

La corrosión del concreto reforzado, actualmente es un problema que afecta la durabilidad de las estructuras, degradando el material en contacto con ambientes de exposición determinada.

Ejemplos de corrosión del acero tenemos: Oxidación del hierro y sus aleaciones a la temperatura ambiente, la oxidación del acero a altas temperaturas, la grafitación de la fundición del hierro, el picado de los aceros inoxidables en presencia de Cl<sup>-</sup> [14].

La corrosión se ha estudiado a través de diferentes materiales, uno de ellos es el carbono y sus derivados como: fibras de carbono, carbón y grafito, que se ha incorporado internamente en la fabricación de la pasta de concreto lo cual confiere propiedades especiales, que pueden prevenir ante agentes agresivos a la corrosión. Además, son materiales tecnológicos que tienen poco estudio en la literatura y trabajos de investigación.

En esta tesis de investigación, se presenta un estudio sobre el comportamiento de la corrosión del concreto reforzado, con adición de polvo de grafito como sustituto parcial del cemento y el análisis en sus propiedades mecánica-electroquímicas.

---

### 1.3 Hipótesis

El uso del polvo de grafito en diferentes cantidades de reemplazo añadido a la matriz del concreto, puede mejorar sus propiedades mecánicas y electroquímicas como: su resistencia a la compresión y su resistencia a la corrosión en un ambiente altamente agresivo (cloruros).

### 1.4 Objetivo general

Analizar la eficiencia del polvo de grafito como sustituto parcial del cemento, en las propiedades físicas y electroquímicas del concreto reforzado.

#### 1.4.1 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto en las propiedades mecánicas del concreto con las diferentes cantidades de adición del polvo de grafito.
- Estudiar el efecto del polvo de grafito en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo.
- Determinar cuál de las diferentes concentraciones del polvo de grafito, tiene mejor eficiencia en la corrosión del acero de refuerzo.

---

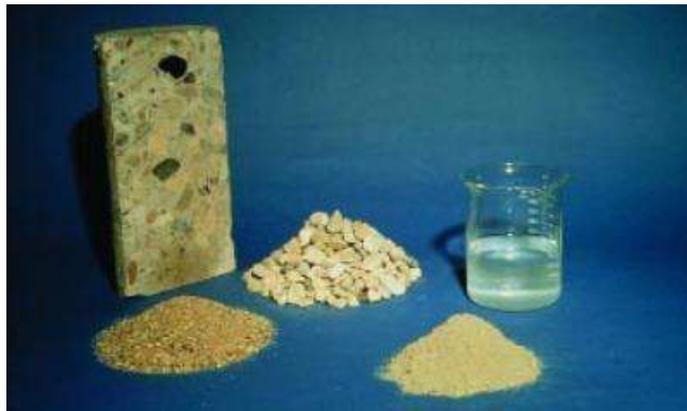
## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Fundamentos teóricos del concreto

Los orígenes de concreto se remontan a dos siglos A. de C., en Roma, cuando utilizaron mezclas de caliza calcinada, tobas volcánicas y piedras, para construir algunas de las estructuras que hoy todavía subsisten, como el Panteón o Iglesia de Santa María de los Mártires, cuya cúpula, de 44 metros de claro, es de concreto simple; la cúpula está aligerada por medio de casetones. El concreto reforzado se debe fundamentalmente al francés Freyssinet, quien empezó fabricando postes para transmisión de energía eléctrica, a principios de 1933 [15].

### 2.2 Concreto

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada), creando una masa similar a una roca como se observa en la Figura 2.1. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la hidratación del cemento [16].

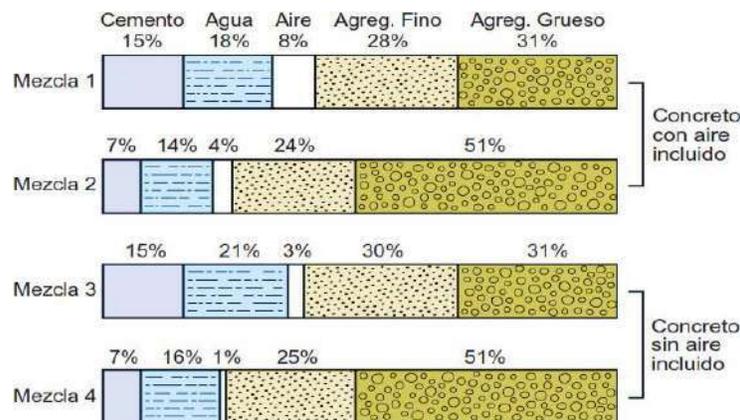


**Figura 2.1.** Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino y grueso.

Otros materiales cementosos (cementantes) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm ( $3/8$ "). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm ( $3/4$ " o 1"). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm ( $3/8$ ") es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado [16].

### 2.3 Componentes del concreto

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. La Figura 2.2 muestra que el volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen. Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto [16].



**Figura 2.2.** Porcentajes de pasta y cemento.

---

### 2.3.1 Cemento

El cemento se obtiene de la pulverización del Clinker, el cual es producido por la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos y arcillosos, está constituido por los siguientes componentes: [17].

- Silicato Tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ): el cual le confiere su resistencia inicial e influye directamente en el calor de la hidratación.
- Silicato Dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ): La cual define la resistencia a largo plazo y no tiene tanta incidencia en el calor de la hidratación.
- Aluminato Tricálcico ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}$ ): es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona un fraguado violento. Para retrasar este fenómeno, es preciso añadirle yeso durante la fabricación del cemento.
- Ferrito aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO Al}_2 \text{ F}_2 \text{ O}_3$ ): Influyen en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.
- Componentes menores: óxido de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio.

### 2.3.2 Agua

El agua es uno de los componentes fundamentales del hormigón, debido a que es la reacción química entre esta y el cemento la que propicia el fraguado y el endurecimiento de la pasta que promueve la unión de los áridos. Dicha afirmación es de conocimiento general, si bien ese no es el único papel que cumple el agua en las mezclas, ya que esta presenta diferentes funciones asociadas a las principales fases de la vida del hormigón: estado fresco, estado endurecido y vida útil de la estructura [18].

---

### 2.3.3 Agregados

Como agregados de las mezclas de mortero o concreto se pueden considerar, todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del Cemento Portland, tales como: las escorias de alto horno de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en donde hay sílice activa entre otros [19].

#### 2.3.3.1 Clasificación según su tamaño

En la clasificación ASTM, los suelos se dividen en tres grandes grupos [20]:

- Suelos de grano grueso, constituidos por gravas y arenas con menos del 50% de finos que pasan por el tamiz nº 200 ASTM (0.074 mm). Estableciéndose varios subgrupos en función de la granulometría del suelo y de la plasticidad de la fracción que pasa por el tamiz nº 40 (0.42 mm).
- Suelos de grano fino, constituidos por los suelos con 50% o más de finos. Se trata de suelos arcillosos y limosos, estableciéndose una subclasificación en función de la relación entre su límite líquido y su índice de plasticidad y según que contengan o no materia orgánica. Los subgrupos se representan sobre unas zonas establecidas en el gráfico de plasticidad.
- Suelos de estructura orgánica, constituidos fundamentalmente por materia orgánica fibrosa, como las turbas. Estos suelos se identifican fácilmente por su color marrón oscuro y su olor a materia orgánica en descomposición.

Una clasificación más específica es la que aparece en la Tabla 2.1, donde se muestra los nombres más usuales de las fracciones y su aptitud para morteros o concretos según el tamaño de sus partículas.

**Tabla 2.1.** Clasificación de los agregados por su tamaño de partícula.

TAMAÑO EN mm.	DENOMINACIÓN MÁS COMÚN	CLASIFICACIÓN	USO COMO AGREGADO DE MEZCLAS
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0,002 – 0,074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0,074 – 4,76 #200 - #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4,76 – 19,1 #4 – ¾"	Gravilla	Agregado grueso	Material apto para concreto
19,1 – 50,8 ¾" – 2"	Grava		Material apto para concreto
50,8 – 152,4 2" – 6"	Piedra		
> 152,4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

## 2.4 Agentes adicionales en el concreto hidráulico

De una forma un tanto simplista se ha tratado a veces de clasificar las adiciones al Clinker en activas e inertes y, sobre todo estas últimas, en nocivas y no nocivas, sin especificar en qué aspectos son una cosa u otra, y sin definir adecuadamente, o cuando menos sin establecer criterios cualitativos y cuantitativos claros ni límites entre ellas [21].

Se ha querido considerar activas aquellas que lo son en un aspecto químico fácilmente explicable y comprensible, e inertes en otras, aun cuando está comprobado desde antiguo que algunas de estas otras pueden ejercer una acción de tipo físico-mecánico y más recientemente se ha confirmado que pueden actuar también por vía química y, en particular, epítáfica [21].

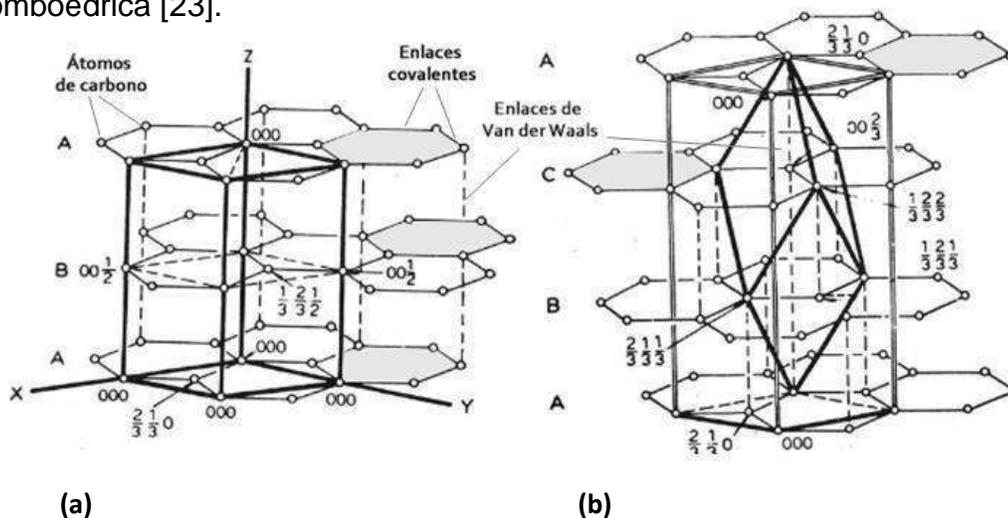
### 2.4.1 Grafito

El grafito natural es una forma alotrópica del carbón. Es un mineral suave, de color gris a negro, brillo metaloide, peso específico de 2.23, dureza de 1-2, cristaliza en el sistema hexagonal, estable y químicamente inerte a temperatura normal, inodoro, no tóxico, resistente al calor y excelente conductor de calor y electricidad [22]. Sonora, actualmente, es el único

productor de grafito en México, con un potencial de 1,634,800 toneladas en reservas de grafito amorfo.

## 2.4.2 Estructura cristalina

Las propiedades fisicoquímicas, eléctricas y termo mecánicas del grafito vienen derivadas de su peculiar estructura cristalina. Cada átomo de carbono dispone de tres electrones en orbitales  $sp^2$  situados en el mismo plano y que forman entre sí ángulos de  $120^\circ$  originando así una estructura de hexágonos regulares. El cuarto electrón que se encuentra en una órbita p forma enlaces con los átomos que lo rodean. En la Figura 2.3 los enlaces situados en la misma capa son fuertemente covalentes mientras que los situados entre capas adyacentes están ligados únicamente por fuerzas de Van der Waals. Según el grado de desplazamiento existente entre las diferentes capas el grafito adopta una de estas dos capas cristalográficas: hexagonal o romboédrica [23].



**Figura 2.3.** Estructura cristalina del grafito **a)** hexagonal y **b)** romboédrico.

## 2.4.3 Grafito natural

En la Tabla 2.2 el grafito natural se clasifica en cristalino (escamoso y veta) y amorfo (microcristalino) [22].

**Tabla 2.2.** Comparación de los tipos de grafito.

Cristalino		Amorfo
Escamoso	Veta	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se encuentra en forma de láminas planas de aspecto escamoso.</li> <li>- Cada uno de las láminas están separadas, cristalizadas en las rocas metamórficas como el mármol, gneis, esquisto, cuarzo, cuarcita con feldespato o mica.</li> <li>- Las láminas tienen un aspecto grasoso y sus dimensiones son variables.</li> <li>- De un depósito a otro se pueden encontrar variaciones en dureza, grosor, densidad y forma.</li> <li>- Los depósitos comerciales importantes se presentan en capas o lentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se localiza en forma de vetas hidrotermales o en forma de acumulaciones a lo largo de las superficies de contacto entre pegmatitas y calizas.</li> <li>- Comercialmente se separan de acuerdo a su tamaño.</li> <li>- Las vetas varían en dimensión desde unos cuantos milímetros a más de 2 metros.</li> <li>- Las impurezas que se presentan como granos en el grafito consisten de feldespato, cuarzo, mica, zircón, rutilo y apatito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se encuentra en forma de partículas microcristalinas más o menos uniformemente distribuidas en rocas metamórficas suaves como pizarras y filitas.</li> <li>- Esta variedad tiene una apariencia terrosa, negra y suave.</li> <li>- El producto comercial contiene entre 50 y 94% de grafito.</li> <li>- Se han formado por metamorfosis.</li> </ul>

#### 2.4.4 Características físicas y químicas

Es extremadamente refractario, siendo poco afectado por temperaturas superiores a los 3,000 °C; tiene alta resistencia a la intemperie y los ácidos; se mezcla fácilmente con otros materiales tanto líquidos como sólidos.

Es compresible y maleable; resiste el ataque químico, el choque térmico (ver Tablas 2.3 y 2.4), la contracción y la oxidación; tiene bajos coeficientes de fricción, expansión térmica y permeabilidad; flexible y sectil en un amplio rango de temperaturas y excelente lubricante [22].

**Tabla 2.3.** Características químicas del grafito natural.

Componente	Unidad	Escamoso	Veta	Amorfo
Carbono	%	90.0	96.7	81.0
Azufre	%	0.1	0.7	0.10
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	2.29	2.26	2.31
Contenido de grafito	%	99.9	100.0	28.00
Densidad de cenizas	g/cm <sup>3</sup>	2.91	2.89	2.68
Resistencia	ohm-cm	0.031	0.029	0.091

**Tabla 2.4.** Propiedades del grafito natural.

Propiedad	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de fusión</li> <li>• Sublimación</li> <li>• Oxidación térmica</li> <li>• Combustión</li> </ul>	Tiene dos puntos triples (punto en que coexisten en equilibrio tres fases) – 3,550°C bajo una presión de 88 kg/cm <sup>2</sup> – 3,726°C a las 100,000 atmósferas de presión Entre 3,300° y 3,550°C a una presión de 1.033 kg/cm <sup>2</sup> En presencia de oxígeno comienza a 300°C A 620° y 670°C es combustible en presencia de oxígeno

## 2.5 Diseño de mezcla de concreto

El proporcionamiento de mezclas de concreto, más comúnmente llamado diseño de mezclas es un proceso que consiste de pasos dependientes entre sí [24-25]:

- Selección de los ingredientes convenientes (cemento, agregados, agua y aditivos).
- Determinación de sus cantidades relativas “proporcionamiento” para producir un m<sup>3</sup>, tan económico como sea posible. Así mismo,

la trabajabilidad del concreto, resistencia a compresión y durabilidad apropiada.

### 2.5.1 Elección del asentamiento o revenimiento

Si las especificaciones de obra no indican la consistencia, ni asentamientos requeridos para la mezcla a ser diseñada, se deberán usar las mezclas de la consistencia más densa que puedan ser colocadas eficientemente. En la Tabla 2.5 se observa el revenimiento para diferentes elementos estructurales [25].

**Tabla 2.5.** Revenimiento recomendado.

TIPO DE ESTRUCTURA	Revenimiento, en cm		
	Mínimo	Máximo	Promedio
ZAPATAS Y MUROS DE CIMENTACIÓN REFORZADOS.	2.5	7.5	5
ZAPATAS, CAJONES DE CIMENTACIÓN Y MUROS DE SUB-ESTRUCTURA SENCILLOS.	2.5	7.5	5
VIGAS Y MUROS REFORZADOS.	2.5	10	6.5
COLUMNAS DE EDIFICIOS.	2.5	10	6.5
PAVIMENTOS Y LOSAS.	2.5	7.5	5
CONCRETO MASIVO.	2.5	5	4
Se puede aumentar en 2.5 cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado. * El revenimiento se puede incrementar cuando se emplean aditivos químicos, se debe tener en cuenta que el concreto tratado con aditivo tiene una relación agua-cemento ó agua-materiales cementantes igual o menor sin que potencialmente tenga segregación o sangrado excesivo.			

## 2.5.2 Contenido de agua

El contenido de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua-material cementante, contenido de agua, tipo y contenido de material cementante, aditivos y condiciones ambientales como se aprecia en la Tabla 2.6. Un aumento del contenido de aire y del tamaño del agregado, una reducción de la relación agua-material cementante y del revenimiento o el uso de agregados redondeados, de aditivos reductores de agua o de ceniza volante reducirá la demanda de agua [16].

**Tabla 2.6.** Requisitos recomendados de agua de mezclado y contenido de aire.

ASENTAMIENTO O SLUMP (mm)	Agua en $lt/m^3$ de concreto para los tamaños máximos de agregados gruesos y consistencia indicados.								
	10mm (3/8")	12.5mm (1/2")	20mm (3/4")	25mm (1")	40mm (1½")	50mm (2")	70mm (3")	150mm (6")	
<b>CONCRETOS SIN AIRE INCORPORADO</b>									
30 a 50 (1" a 2")	205	200	185	180	160	155	145	125	
80 a 100 (3" a 4")	225	215	200	195	175	170	160	140	
150 a 180 (6" a 7")	240	230	210	205	185	180	170	---	
Cantidad aproximada de aire atrapado (%).	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2	
<b>CONCRETOS CON AIRE INCORPORADO</b>									
30 a 50 (1" a 2")	180	175	165	160	145	140	135	120	
80 a 100 (3" a 4")	200	190	180	175	160	155	150	135	
150 a 180 (6" a 7")	215	205	190	185	170	165	160	---	
Contenido total de aire incorporado (%), en función del grado de exposición.	Exposición suave	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5*	1.0*
	Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5*	3.0*
	Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5*	4.0*

Los valores del asentamiento para concreto con agregado más grande que 40mm (1½") se basan en las pruebas de Slump hechas después de retirar las partículas mayores de 40mm (1½") por tamizado húmedo.

Estos contenidos de agua de mezclado son valores máximos para agregado grueso angular y en formado, y cuya granulometría está dentro de las especificaciones aceptadas (ASTM C 33 o ITINTEC 400.037).

\* Para concreto que contiene agregado grande será tamizado húmedo por una malla de 40mm (1½") antes de evaluar el contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en material más pequeño que 40mm (1½") debe ser el tabulado en la columna de 40mm (1½"). Sin embargo, los cálculos iniciales de las proporciones deben basarse en el contenido de aire como un porcentaje de la mezcla completa.

\*\* Estos valores se basan en el criterio de que se necesita un 9% del contenido de aire en la fase de mortero del concreto.

### 2.5.2.1 Por resistencia

Para concretos preparados con cemento Pórtland tipo 1 o cementos comunes, puede tomarse la relación a/c de la Tabla 2.7 [25].

**Tabla 2.7.** Relación de agua y cemento, en el diseño de mezcla.

Resistencia a compresión a los 28 días Mpa	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
45	0.38	0.31
40	0.43	0.34
35	0.48	0.40
30	0.55	0.46
25	0.62	0.53
20	0.70	0.61
15	0.80	0.72

*En el caso de que la resistencia a compresión requerida sea mayor a los valores de la tabla, se recomienda realizar ensayos o basarse en trabajos ya realizados para seleccionar la relación agua-cemento*

### 2.5.3 Cálculo del contenido del cemento.

Una vez que la cantidad de agua y la relación a/c han sido estimadas, la cantidad de cemento por unidad de volumen del concreto es determinada dividiendo la cantidad de agua por la relación a/c. Sin embargo es posible que las especificaciones del proyecto establezcan una cantidad de cemento mínima. Tales requerimientos podrían ser especificados para asegurar un acabado satisfactorio, determinada calidad de la superficie vertical de los elementos o trabajabilidad [25].

$$C_c = (C_A)(a/c) \quad (1)$$

Donde:

$C_C$  = Contenido de cemento en  $kg/m^3$

$C_A$  = Contenido de agua en  $l/m^3$

$a/c$  = Relación agua y cemento.

A partir del cálculo del contenido de cemento se calcula el volumen:

$$V_C = C_C / c \quad (2)$$

Donde:

$V_C$  = Volumen del cemento en  $m^3$

$C_C$  = Contenido de cemento en  $kg$ .

$c$  = Densidad del cemento en  $kg/m^3$

#### 2.5.4 Estimación del contenido de agregado grueso y agregado fino

Se determina el contenido de agregado grueso mediante la Tabla 2.8, elaborada por el comité 211 del American Concrete Institute (ACI) [24], en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del módulo de fineza del agregado fino. La Tabla 2.8 permite obtener un coeficiente  $b / b_0$  resultante de la división del peso seco del agregado grueso entre el peso unitario seco y compactado del agregado grueso, expresado en  $kg/m^3$  [25].

**Tabla 2.8.** Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO		Volumen de agregado grueso, seco y compactado (*) por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de fineza del agregado fino.			
		MÓDULO DE FINEZA DEL AGREG. FINO			
mm.	Pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
10	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
20	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
40	1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
50	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
70	3"	0.81	0.79	0.77	0.75
150	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Obtenido  $b / b_0$  procedemos a calcular la cantidad de agregado grueso necesario para un metro cúbico de concreto, de la siguiente manera:

Entonces el peso de los agregados gruesos será:

$$W_{sAg} = \left(\frac{B}{B_0}\right) (W_{ucAg}) \quad (3)$$

Donde:

$W_{sAg}$  = Peso seco del agregado grueso en  $kg$ .

$\frac{B}{B_0}$  = Coeficiente de volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto en  $m^3$ .

$W_{ucAg}$  = Peso unitario compactado (varillado) del agregado grueso  $kg/m^3$ .

Se calcula el volumen del agregado grueso.

$$V_{Ag} = W_{sAg} / \rho_{Ag} \quad (4)$$

Donde:

$V_{Ag}$  = Volumen del agregado grueso en  $m^3$ .

$W_{sAg}$  = Peso seco del agregado grueso en  $kg$ .

$\rho_{Ag}$  = Densidad del agregado grueso en  $kg/m^3$ .

Conociendo el volumen del aire, cemento y del agregado grueso, se calcula el siguiente volumen del agregado fino a través de la fórmula.

$$V_{Af} = 1 - (V_A + V_{Ar} + V_C + V_{Ag}) \quad (5)$$

Donde:

$V_{Af}$  = Volumen del agregado fino en  $m^3$ .

$V_A$  = Volumen del agua en  $L^3$ .

$V_{Ar}$  = Volumen del aire en  $m^3$ .

$V_C$  = Volumen del cemento en  $m^3$ .

$V_{Ag}$  = Volumen del agregado grueso en  $m^3$ .

## 2.6 Concreto en estado fresco

El concreto es un material resultante de la aglomeración de pequeños agregados y grueso, por una pasta de cemento que posiblemente contenga aditivos, es fresco mientras la pasta está en fluido o plástico, permitirá una reorganización de las partículas constituyentes por una acción dinámica cualquiera [26].

### 2.6.1 Asentamiento o revenimiento

Es una prueba que se usa comúnmente en las construcciones de todo el mundo; la prueba no mide la trabajabilidad del concreto, sino que determina la consistencia o fluidez de la mezcla por medio del ensayo de revenimiento de cono o slump de acuerdo a la norma ASTM C 143; es muy útil para detectar variaciones en la uniformidad de una mezcla de proporciones determinadas [27-28].



**Figura 2.4.** Cono de Abrams para prueba de asentamiento.

### 2.6.2 Temperatura del concreto

En climas cálidos, la temperatura máxima del concreto en el momento de la producción y colocación no exceder de treinta y dos (32) grados Celsius [29].

### 2.6.3 Masa volumétrica unitaria

La prueba de la masa volumétrica es una herramienta importante utilizada para controlar la calidad del concreto recién mezclado [30]. Para calcular la masa neta del concreto, restando la masa del recipiente ( $m_r$ ) de la masa bruta ( $m_b$ ) por el factor del recipiente ( $f_{co}$ ):

$$m_u = (m_b - m_r)(f_{co}) \quad (6)$$

### 2.6.4 Contenido de aire por el método de presión

Este método de prueba es adecuado para usarlo en concretos y morteros elaborados con agregados de masa específica igual o mayor a  $2.10 \text{ kg/m}^3$ . Existen dos alternativas para determinar el contenido de aire por presión que son el método A y el método B. El medidor de tipo A está compuesto por un recipiente metálico diseñado para resistir altas presiones en unión con la tapa. La determinación consiste en la reducción en el volumen de aire en la muestra de concreto y observar cómo baja el nivel de agua al aplicar presión. El medidor de tipo B consiste de un recipiente y una cubierta de ensamble. El principio de operación de este medidor está basado en el hecho de igualar un volumen conocido de aire con una presión también conocida, en una cámara de aire cerrada, con un volumen desconocido de aire en la muestra de concreto [31].

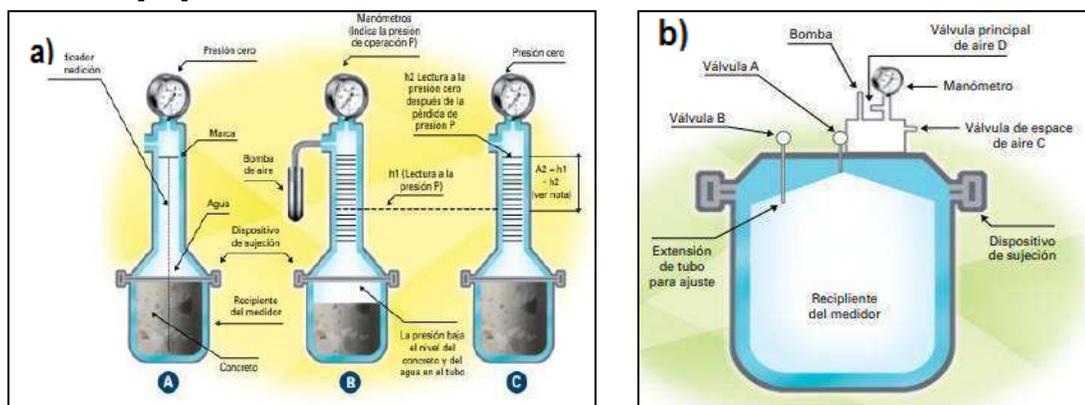


Figura 2.5. a) Medidor de aire tipo A, b) Medidor tipo B.

---

### 2.6.5 Elaboración de especímenes de concreto

Para probar la resistencia a compresión del concreto se elaboran especímenes cilíndricos de prueba de 15 x 30 cm y se almacenan en la obra hasta que el concreto se endurece [32], en la obra se usan para:

- Determinar el momento en que se puede permitir que una estructura sea puesta en servicio.
- Evaluar la suficiencia del curado y protección del concreto en la estructura.

### 2.6.6 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascales (MPa) [33].

## 2.7 Mecanismos de corrosión

Los materiales y en especial los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestos a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. Puede definirse como corrosión a la reacción química y electroquímica de un metal o aleación con el medio que lo rodea y que provoca un deterioro en dicho material [34].

Todo proceso de oxidación y reducción supone un movimiento de electrones y en ese sentido se habla de reacción electroquímica. Este proceso se reserva a los mecanismos que implican el movimiento de electrones desde

---

una región anódica (donde tiene lugar la oxidación) a otra catódica (lugar de la reducción) a través de regiones del metal no reaccionante [35].

Reacción anódica (oxidación):

La disolución del metal



Reacción catódica (Reducción)

Cualquier proceso de reducción por ejemplo



El contacto entre metales distintos, o cuando existen regiones de actividad diversa en la superficie de un mismo metal, las áreas más activas tienden a ser los ánodos. El metal anódico es corroído en un proceso en que los átomos metálicos se disuelven como iones positivos al ceder electrones a otros átomos o iones [35].

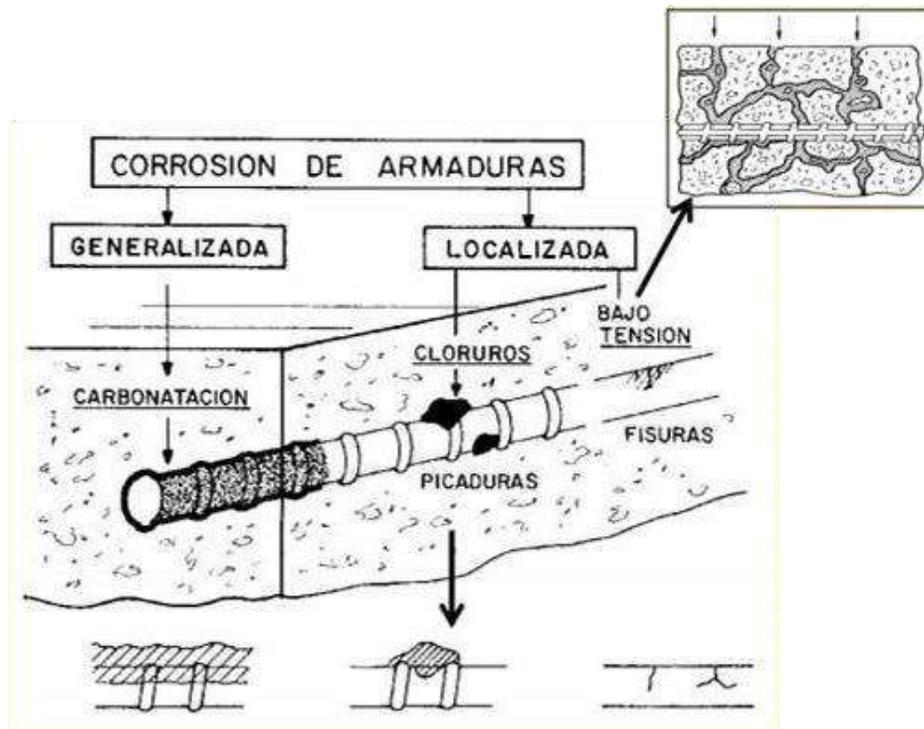
### 2.7.1 Corrosión en el acero de refuerzo del concreto

El concreto por si solo es un material que tiene una baja resistencia a la tracción. Para solucionar este problema se introducen en la masa de hormigón barras de acero que resisten la tracción que el concreto no puede soportar [36].

Este material añadido debe colocarse en las zonas donde es más necesario o sea, donde se desarrollan las tracciones. Al conjunto de ambos materiales trabajando de esta forma se le denomina concreto armado [36].

### 2.7.1.1 Durabilidad del concreto reforzado

La durabilidad es la capacidad que tienen las estructuras de concreto reforzado de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones, las cuales están previstas en su diseño estructural [37]. En la Figura 2.6 se presenta un diagrama de los tipos de corrosión que presenta la armadura del acero reforzado.



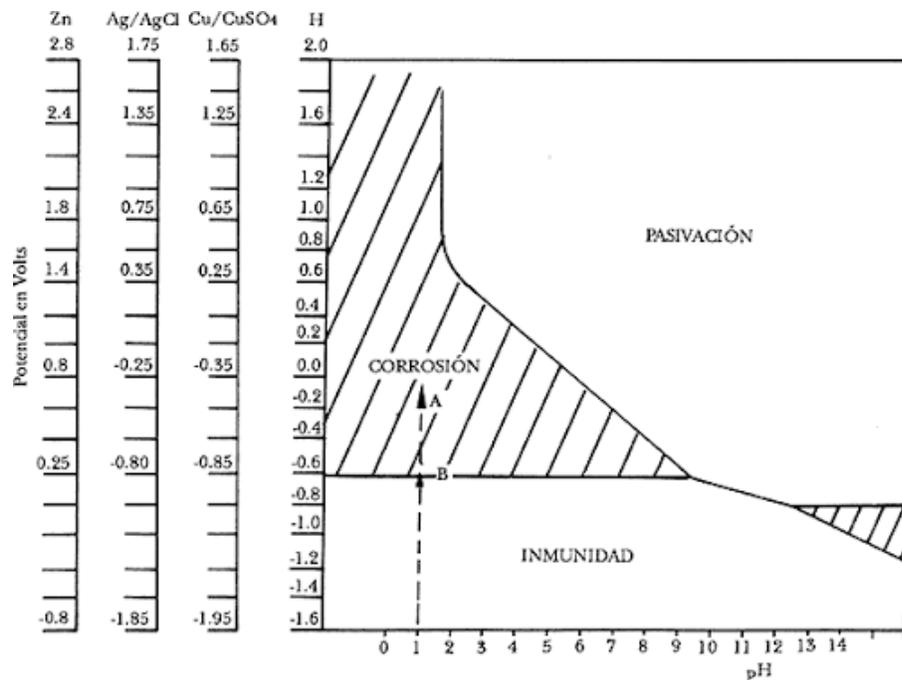
**Figura 2.6.** Diagrama esquemático del ataque de cloruros a la armadura de acero de refuerzo en el concreto.

### 2.7.1.2 Factores de la corrosión en el concreto reforzado

Al pH propio del concreto en torno a 13 como se observa la Figura 2.7, los estados posibles del acero son los de pasivación o el de inmunidad, si bien a los potenciales que exhiben las armaduras es el primero. Las formas de protegerlo contra la corrosión se reducen a los tres siguientes [38]:

- Reduciendo su potencial hasta introducirlo en la zona de inmunidad, lo que constituye el fundamento de la protección catódica.
- Elevando su potencial hasta la zona de pasivación (protección anódica).
- Aumentando el pH de la solución hasta alcanzar el estado pasivo.

Este último es el tipo de protección que ofrece el concreto a las armaduras de acero embebidas en él, se sitúa en el punto en torno al designado como B.



**Figura 2.7.** Diagrama de potencial pH (Pourbaix), condiciones teóricas de corrosión, inmunidad y pasivación en el sistema hierro-agua a 25 °C.

---

La corrosión del acero embebido en el concreto queda limitada a unos cuantos casos especiales, estos casos especiales se presentan cuando algún factor de corrosión, o combinación de factores, provocan la transición del estado pasivo al activo para que tenga lugar son [38]:

- 1) La presencia de iones despasivantes, cloruros en la inmensa mayoría de los casos, en cantidad suficiente para romper localmente la película pasiva del acero.
- 2) La carbonatación del hormigón, que reduce el pH del mismo hasta un valor insuficiente para mantener el estado pasivo.
- 3) Naturalmente la combinación de ambos factores.

Habría que considerar otros factores desencadenantes de la corrosión mucho menos frecuentes, como pueden ser los que derivan de una puesta de obra defectuosa, o de errores graves desde el aspecto de los fundamentos de la corrosión. Tales factores desencadenantes serían:

- 4) Pilas de pH diferencial y de aireación diferencial debidas a coqueras, fisuras, defectos superficiales, combinación de hormigones diferentes.
- 5) Pilas galvánicas
- 6) Corrientes erráticas.

### **2.7.2 Difracción de rayos X**

Es la determinación de la geometría de la celda de unidad, que implica el uso de rayos-X (R-X), para obtener las dimensiones, el tipo de retícula, el sistema cristalino y los posibles grupos espaciales [39].

El haz de R-X incidente se difracta bajo ángulos característicos que dependerán de la naturaleza del cristal. Cada efecto de difracción da lugar a un cono de rayos reflejados y una mancha en la película y debido a la presencia de un gran número de cristales en la muestra y a la

---

rotación que se le imprime a la misma, el resultado es un fundido de las distintas manchas en una línea. En la película revelada aparecen un conjunto de líneas que permiten la identificación de la sustancia, después de medir los ángulos a los que se han producido y transformarlos en espaciados. Cada sustancia tiene un conjunto de espaciados diferentes y típicos [40].

### **2.7.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

La posibilidad de observar muestras íntegras y en sus tres dimensiones mediante la microscopía electrónica, fue hecha realidad con la aparición del microscopio electrónico de barrido (MEB), cuando se trabaja en MEB es fácil encontrarse con una serie de posibles artefactos que darán como resultado una alteración de la imagen final. Este apartado se pretende revisar brevemente las principales fuentes de artefactos y las consecuencias de las mismas sobre la imagen [41].

### **2.7.4 Indicador de PH fenolftaleína**

La prueba de fenolftaleína es un indicador del cambio de pH de las sustancias mediante la variación de color. La fenolftaleína presenta los siguientes colores en los siguientes intervalos de pH: entre 0.0 y 8.0 (incolora); entre 8.0 y 9.8 (rosada) y, entre 9.8 y 14 (magenta). En química se utiliza en análisis de laboratorio, investigación y química fina. En ingeniería civil se ha empleado la fenolftaleína, para determinar el nivel de carbonatación del concreto por efecto del medio ambiente, para ello se emplea disuelta en alcohol [42].

---

## 2.8 Técnicas electroquímicas

Las técnicas electroquímicas específicamente se enfocan en las reacciones de óxido-reducción, donde se transfieren electrones de una sustancia a otra, teniendo en cuenta variables como las eléctricas, el tipo de electrodo, la transferencia de masa, la solución y otras variables externas como la temperatura [43]. Estos elementos conforman una celda electroquímica que está constituida por dos electrodos (conductores metálicos), unidos externamente por un hilo conductor y sumergidos en distintas soluciones electrolíticas. Las soluciones están separadas físicamente, pero pueden intercambiar iones a través del puente salino [44].

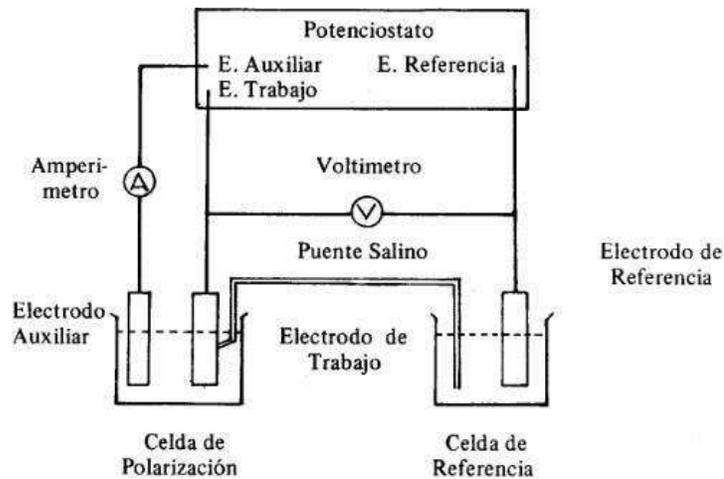
Son diferentes las técnicas electroquímicas que se utilizan en la actualidad de las cuales se describe las que se emplearon para el estudio y análisis en este proyecto de investigación:

- Medición de Media Celda ( $E_{corr}$ )
- Ruido electroquímico ( $R_n$ )
- Resistencia a la polarización ( $R_p$ )

### 2.8.1 Método potencioestático

Para la realización de experiencias de polarización se precisa de una celda electroquímica, donde se pongan en contacto el medio agresivo y el material metálico bajo estudio [45].

En la Figura 2.8 se presenta un diagrama esquemático esto constituye el electrodo de trabajo, cuyo potencial se mide o impone en cada instante con respecto a un electrodo de potencial constante, el electrodo de referencia, cerrando el circuito con el contraelectrodo o electrodo auxiliar, generalmente de material inerte, por el que atraviesa la corriente a registrar [45].



**Figura 2.8.** Diagrama de celda electroquímica a través de potenciostato.

## 2.8.2 Potencial de media celda

La norma ASTM C876-09 [46] establecen intervalos de  $E_{\text{corr}}$  que aproximan al estado superficial de la armadura. Con los valores obtenidos, es factible elaborar un diagnóstico del grado de corrosión de la armadura, con la reserva de complementarlo con mediciones de variables medioambientales, frente de carbonatación y perfil de ingreso de iones cloruro entre otras. Aunque se cuente con técnicas indirectas para conocer el daño por corrosión, la mejor opción cuando es posible, consiste en observar directamente la superficie del acero y elaborar un registro fotográfico [47]. El análisis de potenciales de corrosión se centrará en función del electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado (Ag/AgCl), por lo que se realizó la conversión de los potenciales de corrosión obtenidos con el electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado sumando +50 mV como se muestra en la Tabla 2.9 [47].

**Tabla 2.9.** Criterio para medir el potencial de media celda del acero de refuerzo en concreto (ASTM C876-09).

<b>Ecorr vs Cu/CuSO<sub>4</sub> (mV)</b>	<b>Ecorr vs Ag/AgCl (mV)</b>	<b>Riesgo de daño (%)</b>
> -200	> -150	10% probabilidad de corrosión
Entre -200 A -350	Entre -150 A -300	Zona de Incertidumbre
< -350	< -300	90% probabilidad de corrosión

### 2.8.3 Ruido electroquímico

El registro e interpretación del ruido electroquímico para el estudio de la corrosión involucra, no obstante, una forma completamente diferente de concebir el fenómeno a la empleada por los métodos electroquímicos tradicionales. Según éstos, la corrosión es considerada como un proceso en equilibrio y de cinética constante, mientras que, en el caso del ruido electroquímico, se registran desequilibrios en las reacciones electroquímicas en intervalos de tiempo muy cortos [48].

La medición del ruido electroquímico de potencial y corriente puede hacerse de manera simultánea. El ruido en potencial se realiza a través de la medición de las oscilaciones del potencial de corrosión respecto a un electrodo de referencia, o bien de un electrodo nominalmente “idéntico” el ruido en corriente se obtiene midiendo las oscilaciones de la corriente entre dos electrodos idénticos o de un solo electrodo bajo control potencioestático [49].

#### 2.8.3.1 Análisis de datos visuales y estadísticos

Este análisis consiste en; análisis visual, análisis estadístico. El análisis visual de los espectros de ruido electroquímico en función del tiempo suele ser la forma más sencilla y rápida de obtener información del sistema y, a través de este, se puede lograr una valoración cualitativa del estado

---

electroquímico del mismo, lo cual, en la mayoría de los casos, requiere de un suficiente conocimiento del sistema investigado [50].

El siguiente parámetro estadístico utilizado es la desviación estándar ( $\sigma$ ), que permite evaluar la dispersión de un conjunto de datos con respecto al valor medio. El uso de las desviaciones estándar de potencial e intensidad para la interpretación de los registros de ruido, puede hacerse bien por separado, o bien mediante su cociente, denominado resistencia a ruido ( $R_n$ ) [51].

$$R_n = \sigma V / \sigma I \quad (10)$$

Donde:

$\sigma V$  = Desviación estándar del voltaje

$\sigma I$  = Desviación estándar de la corriente

Con la obtención de  $R_n$  se puede calcular la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) de acuerdo con la ecuación de Stern-Geary [52]:

$$I_{corr} = B / R_n \quad (11)$$

Donde:

$I_{corr}$  = densidad de corriente en  $\mu A/cm^2$

$B$  = constante de Stern-Geary

El margen de variabilidad de las pendientes de Tafel no es muy amplio y, además, el hecho de encontrarse en el numerador y denominador restringe aún más el rango de valores posibles de  $B$  que, en la mayoría de los casos, están comprendidos entre 0.013 y 0.052 V [53]. Esta constante se relaciona con las constantes de Tafel o pendientes anódicas ( $b_a$ ) y catódicas ( $b_c$ ) [54] de acuerdo a la siguiente expresión:

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2.3(b_a + b_c)} \quad (12)$$

Donde:

$b_a$  y  $b_c$  = constantes de Tafel (pendientes anódicas y catódicas respectivamente).

Fenómenos de corrosión localizada, como el picado y la corrosión en rendijas entre otros, por tratarse de procesos electroquímicos estocásticos relacionados con la activación y repasivación local en la interface metal (capa pasiva) / electrolito representan también una importante fuente de ruido electroquímico [54]. El índice de localización (ec. 13), el cual es un parámetro que evalúa la variación del ruido en corriente y la compara con el valor medio, se calculó a través de la razón de la desviación estándar en corriente ( $\sigma_i$ ) y la raíz media cuadrática de la corriente ( $I_{rms}$ ) [55].

$$L. I = \frac{\sigma_i}{I_{rms}} \quad (13)$$

En la Tabla 2.10 se observa el rango de valores del índice de localización que representa el tipo de corrosión en el acero de refuerzo [56].

**Tabla 2.10.** Valores de Índice de Localización.

Índice de localización	Tipo de corrosión
0.001 - 0.01	Generalizada
0.01 - 0.1	Mixta
0.1 - 1	Localizada
> 1	Iniciado de picado

La velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ) se determina a partir de la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}/A$ ) y por la ley de Faraday (ec. 14) [57], donde la velocidad de penetración del material,  $V_{corr}$ , expresada en (mm/año), 315 es

el factor de conversión,  $k$  es el equivalente electroquímico del acero (g/C),  $I_{corr}$  la corriente de corrosión (uA),  $\rho$  la densidad del material expresado en (g/cm<sup>3</sup>) y  $A$  es el área del acero expuesto expresado en (cm<sup>2</sup>)

$$V\left(\frac{mm}{año}\right) = (315 * k * I_{corr}) / (\rho * A) \quad (14)$$

#### 2.8.4 Resistencia a la polarización lineal

Los cálculos de velocidades de corrosión se efectuaron relacionando la corriente de corrosión,  $I_{corr}$ , con la resistencia a la polarización,  $R_p$ , a partir de la ecuación de Stern-Geary [52] (ec.15).

$$I_{corr} = B/R_p \quad (15)$$

Para la determinación de las pendientes de Tafel, se obtuvieron las curvas de polarización potenciodinámica en un entorno reducido de potenciales, esto es 30 mV alrededor de  $E_{corr}$ , tanto en zonas catódicas como anódicas. De acuerdo al método de polarización lineal [58],  $R_p$  puede gráficamente obtenerse como la tangente a la curva de polarización en  $E_{corr}$ , (ver ec.16).

$$R_p = \frac{dE}{di} \quad (16)$$

La  $R_p$  es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión  $I_{corr}$  y se relacionan a través de una constante de proporcionalidad  $B$ , de acuerdo Stern-Geary [52-59].

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo de las actividades de tesis, para la elaboración de la mezclas de concreto se llevó a cabo en el laboratorio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Autónoma de Guerrero. Para las actividades de técnicas electroquímicas se efectuó en el laboratorio de electroquímica en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

### 3.1 Nomenclatura

La nomenclatura para las pruebas mecánicas del concreto se muestra en la Tabla 3.1; donde M1 es el número de diseño de mezcla seguido del porcentaje de grafito con respecto al peso del cemento y después el periodo de curado de las probetas.

**Tabla 3.1.** Nomenclatura empleada para pruebas de resistencia a la compresión.

MEZCLA	N° ESPECIMEN	CLAVE PRUEBAS DE COMPRESIÓN
M1-0	2	M1-7 días
	2	M1-14 días
	2	M1-28 días
M2-2.5	2	M2-7 días
	2	M2-14 días
	2	M2-28 días
M3-7.5	2	M3-7 días
	2	M3-14 días
	2	M3-28 días
M4-15	2	M4-7 días
	2	M4-14 días
	2	M4-28 días

**Tabla 3.2.** Nomenclatura empleada para técnicas electroquímicas.

MEZCLA	N° ESPECIMEN	CLAVE	MEZCLA	N° ESPECIMEN	CLAVE
M1-0	1	M1T1C	M3-7.5	1	M3T1C
		M1T1R			M3T1R
		M1T1A			M3T1A
M1-0	2	M1T2C	M3-7.5	2	M3T2C
		M1T2R			M3T2R
		M1T2A			M3T2A
M1-0	3	M1T3C	M3-7.5	3	M3T3C
		M1T3R			M3T3R
		M1T3A			M3T3A
M2-2.5	1	M2T1C	M4-15	1	M4T1C
		M2T1R			M4T1R
		M2T1A			M4T1A
M2-2.5	2	M2T2C	M4-15	2	M4T2C
		M2T2R			M4T2R
		M2T2A			M4T2A
M2-2.5	3	M2T3C	M4-15	3	M4T3C
		M2T3R			M4T3R
		M2T3A			M4T3A

En la Tabla 3.2 se muestra la identificación de la nomenclatura en las técnicas electroquímicas, se emplea una clave para diferenciar el acero reforzado embebido en el concreto como se muestra en el siguiente ejemplo:

## M1T1C,R,A

Donde:

M1: Es el número de diseño de mezcla con % de grafito.

T: Técnicas Electroquímicas de ruido y resistencia a polarización.

1: Numero de espécimen

C: Electrodo de trabajo central en cada espécimen.

R: Electrodo de referencia en cada espécimen.

A: Electrodo auxiliar en cada espécimen.

## 3.2 Especímenes

### 3.2.1 Materiales para elaboración de mezcla de concreto

- Agua de red pública.
- Cemento Portland CPC 30 R.
- Arena del río Papagayo, región de Acapulco Guerrero, México.
- Grava triturada tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4") de la misma región.
- Varilla de acero convencional 1018 (3/8").
- Polvo de grafito, tamiz N°240.
- Cloruro de sodio NaCl (sal).

La Figura 3.1 se observa las características físicas y químicas del grafito, estos datos son proporcionados por el proveedor de la distribuidora QR minerales S.A de C.V. ubicada en la ciudad de Querétaro, Qro.

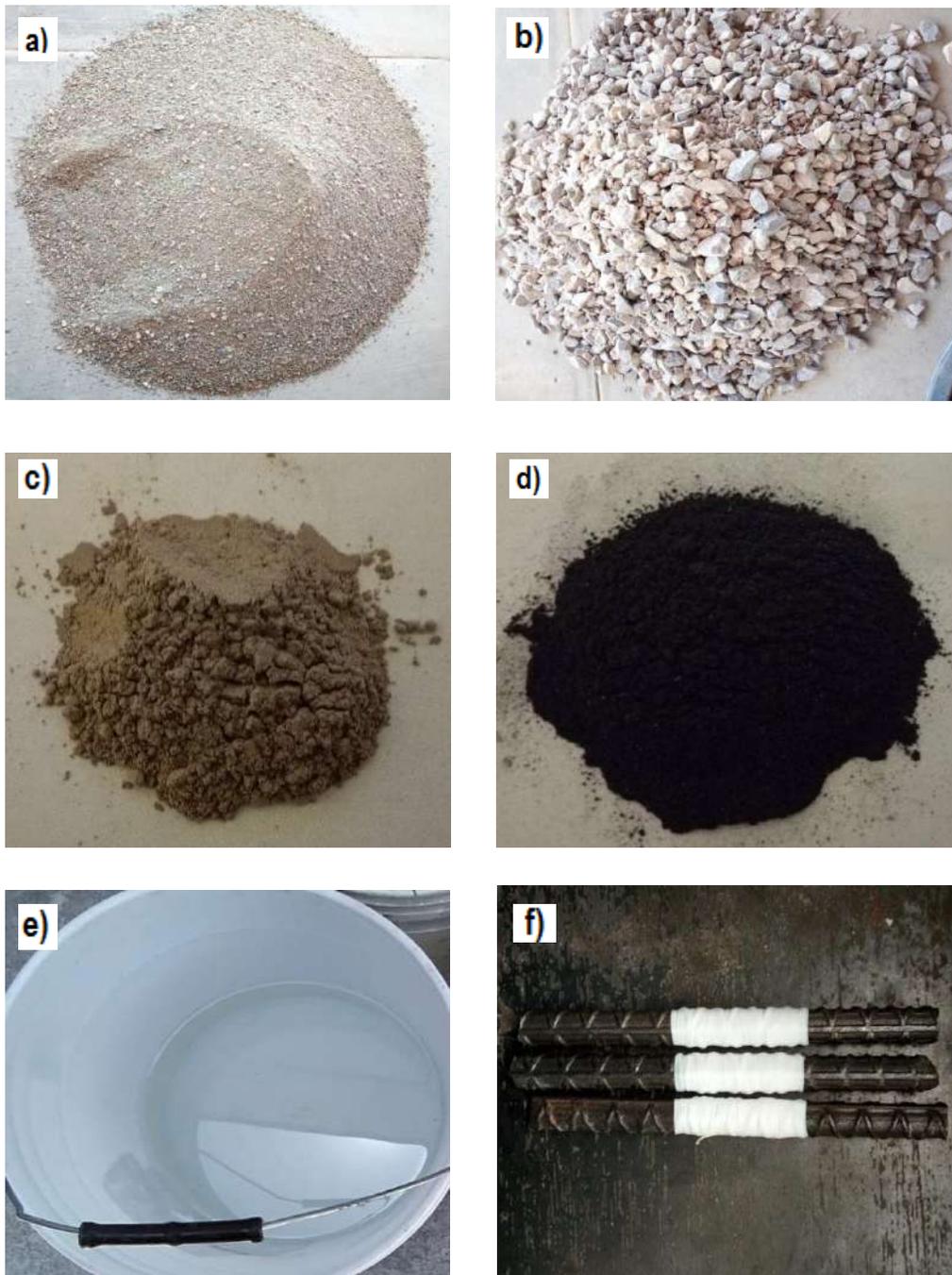
La Figura 3.2 se muestran los materiales utilizados en el diseño de mezcla de concreto. Los materiales de grava, arena, varilla y cemento se proveyeron a través de casa de materiales de construcción de la región centro y región Acapulco, del estado de Guerrero.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Apariencia	Polvo fino
Color	Gris a negro
Humedad	2.5 % máximo.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS TÍPICAS	
Carbón fijo	70 % mínimo.
Volátiles	3 % máximo.
Cenizas	30 % máximo

**Figura 3.1.** Características generales del grafito en sus propiedades físicas y químicas.



**Figura 3.2.** Materiales para la fabricación de concreto reforzado, **a)** Arena del río Papagayo, **b)** Grava piedra triturada, **c)** Cemento Portland CPC 30 R, **d)** Polvo de grafito, tamiz N°240. **e)** Agua de red pública y **f)** Varilla de acero N°1018 (3/8").

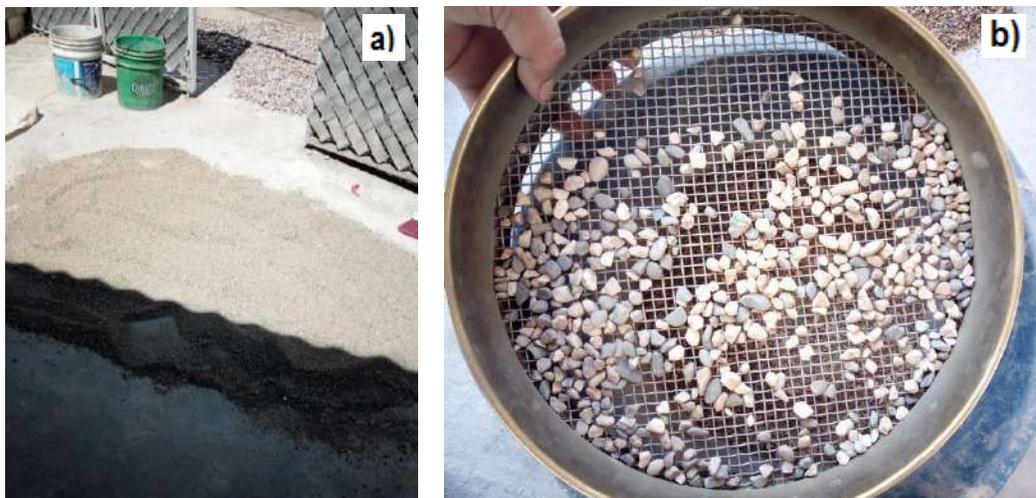
### 3.2.2 Caracterización física de los materiales para el diseño de mezcla

Para la elaboración y diseño del concreto se basó a través de la norma internacional ACI 211 [24]. Primeramente se realizó la caracterización de las propiedades físicas de los materiales (grava, arena) como: peso volumétrico suelto y varillado, densidad, absorción y en el caso del agregado fino (arena) su módulo de finura.

#### 3.2.2.1 Pruebas físicas de los materiales

Se tendieron al sol por 24 horas los agregados fino y grueso a una superficie limpia el cual es para perder la humedad del mismo.

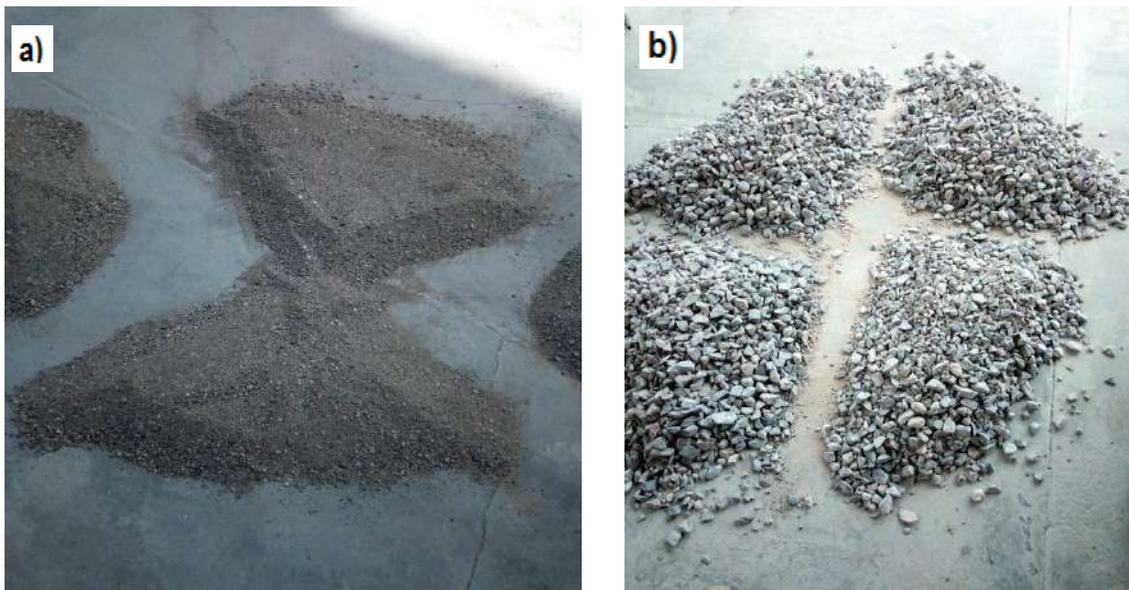
La norma ASTM C 136 [60] especifica que los materiales si exceden el tamaño máximo nominal se tendrá que tamizar, para la arena con el tamiz n° 4 (4.75 mm) y para la grava dependiendo del tamaño nominal. Como se observa en la Figura 3.3 a) y b) los agregados se tamizaron por las mallas correspondientes a la norma.



**Figura 3.3. a)** Extendido de materiales expuesta al sol. **b)** Tamizado del agregado fino, tamiz N°4.

Después de tamizar todo el material se procedió al cuarteo los agregados para las siguientes pruebas físicas, siguiendo la norma ASTM D75-03 y norma mexicana C-030 [61-62].

Se tuvo que cuartear el material con una pala, el material se extendió como se observa en la Figura 3.4 a y se dividió en 4 partes iguales se tomaron las porciones diagonales para las siguientes pruebas, como se observa en la Figura 3.4b.



**Figura 3.4. a) Cuarteo del agregado fino y b) agregado grueso.**

### 3.2.2.2 Peso volumétrico suelto y varillado de los agregados

De acuerdo a la norma ASTM C 29 [63] para la prueba de peso volumétrico de los agregados (arena y grava).

#### Equipo:

- Bascula de 20 kg con aproximación de 5 g.
- Cucharón de lámina Galvanizada
- Regla enrazadora.

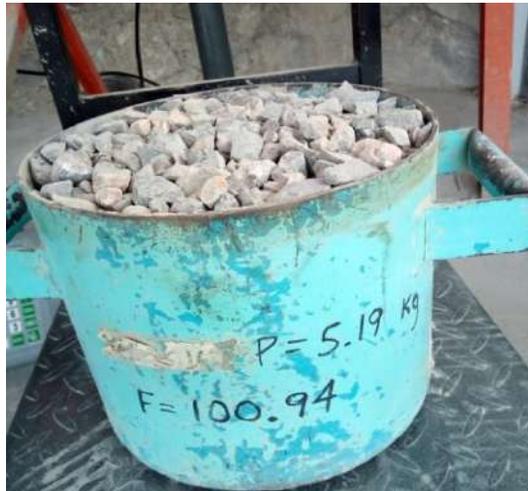
- Recipiente o tara de volumen 5 L, de acuerdo a la norma para tamaños nominal mayor de 13 mm.
- Pala
- Escobas
- Varilla de 5/8" punta semiesférica de diámetro 600 mm.

### Procedimiento:

Para el peso volumétrico suelto del agregado grueso; el recipiente se llenó en 3 partes iguales, dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el recipiente distribuyéndolo uniformemente. Después se compactó con 25 penetraciones cada capa con la varilla como se observa en la Figura 3.5. Cuando la prueba es sobre el agregado grueso como se observa en la Figura 3.6; el enrase se hace visualmente quitando y agregando partículas, de tal manera que los salientes sobre la superficie del borde compensen las depresiones por debajo de él.



**Figura 3.5.** Compactación de la tara con la varilla de apisonamiento.



**Figura 3.6.** Llenado de la tara, en la prueba de peso volumétrico.

La prueba de peso volumétrico suelto y varillado del agregado fino, se realizó similar al agregado grueso, con la diferencia que en esta prueba si se utilizó la regla enrazadora [63]. Se calculó el peso volumétrico del material seco suelto y varillado, con la siguiente fórmula:

$$P_{vv} = (W_m - W_r) / (V_r) \quad (17)$$

Dónde:

$P_{vv}$  = Peso del material en Kg.

$W_m$  = Peso del recipiente + material en Kg.

$W_r$  = Peso del recipiente en kg.

$V_r$  = Volumen del recipiente en kg.

### 3.2.2.3 Densidad y absorción del agregado fino

#### Equipo:

- Balanza electrónica con aproximación de 0.1 g.
- Matraz de Chapman de 450 ml.
- Parrilla de gas.
- Molde y pisón marca Fabrexim para ensayo de humedad superficial.

- Pisón metálico marca Fabrexim S.A con una masa de 340 g y una cara plana y circular de 25 mm de diámetro.
- Cucharón.

### Procedimiento:

De acuerdo a la norma ASTM C 128-01 [64] esto se logra al tender la arena en una superficie limpia y seca, moviéndola de un lugar a otro; para que por efecto del sol y el viento, se logre el estado superficialmente seco. Se utilizó el cono truncado como se observa en la Figura 3.7 a, se llenó con la arena en 2 capas, dándole 15 golpes con el pisón a la primera capa y 10 golpes a la segunda capa. Después se enrazó y se retiró el cono, hasta que al tocar el cono este se desmorone lentamente. Finalmente al tener el material en condición saturado se procedió a pesar dos porciones de 300 g. de material. La primera se agregó al matraz de chapman, agitando el frasco para que se acomoden las partículas de arena en la base del matraz como se aprecia en la Figura 3.7 b se dejó reposar y la otra porción a la estufa de gas para prueba de absorción.



**Figura 3.7 a)** Saturación en estado seco de la arena, **b)** frasco de chapman para densidad del agregado fino.

Se calcula la densidad del agregado fino, con la siguiente fórmula:

$$V_A = (m_C + m_{Ass}) - W_{cAa} \quad \rho_A = (W_{Ass}) / (V_A) \quad (18)$$

Y con la siguiente fórmula se calcula el % de absorción.

$$m_A = (m_{Ass} - m_{Ar}) \quad A_B = [(m_A) / (m_{Ar})] * 100 \quad (19)$$

Dónde:

$V_A$  = Volumen del agregado en  $cm^3$ .

$m_C$  = Masa del frasco de Chapman lleno de agua hasta 450 ml.

$m_{Ass}$  = Masa de arena en estado condición saturada y seca superficialmente (sss) en g.

$W_{cAa}$  = Masa del frasco de Chapman más material más agua en g.

$\rho_A$  = Densidad del Agregado fino (arena) en  $g/cm^3$ .

$m_A$  = Masa del agua en g.

$m_{Ar}$  = Masa de la arena seca en estufa de gas en g.

$A_B$  = Absorción del agregado en %.

#### 3.2.2.4 Densidad y absorción del agregado grueso

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de las partículas de agregado grueso y la absorción, después de estar inmerso en agua durante 24 horas; de acuerdo a la norma ASTM C127 [65].

#### Equipo:

- Balanza con aproximación de 0.5 g.
- Probeta graduada.
- Franela
- Cucharón.
- Bandejas metálicas.

#### Procedimiento:

Primeramente, se tomó una muestra del material saturado en agua, se tomó una franela para secar el exceso de agua del material, hasta tener un secado

superficial. Se determinó la masa de la muestra; después se llenó una probeta con agua el cual se introdujo el material, tal y como se observa en la Figura 3.8. Finalmente, la muestra sumergida se colocó en horno y se determinó la masa del material.



**Figura 3.8.** Medición de la densidad del agregado grueso.

Se calcula la densidad del agregado Grueso, con la siguiente fórmula:

$$V_G = [(m_{G_{sss}} + W_a) - m_s] \quad \rho_A = (m_{G_{sss}})/(V_A) \quad (20)$$

Y con la siguiente formula se calcula el % de absorción

$$m_A = (m_{G_{ss}} - m_{G_s}) \quad A_B = [(m_A)/(m_{G_s})] * 100 \quad (21)$$

Dónde:

$V_G$ = Volumen del agregado grueso en  $cm^3$ .

$m_{G_{sss}}$ = Masa de la grava en estado condición saturada superficialmente seca (sss) en g.

$W_a$ =masa de la probeta con agua en g.

$m_s$  = masa de la muestra sumergido en agua en g.

$\rho_A$ = Densidad del Agregado fino (arena) en  $g/cm^3$ .

$m_A$ = Masa del agua en g.

$m_{G_s}$  =Masa de la Grava seca en estufa de gas en g.

$A_B$ = Absorción del agregado en %.

### 3.2.2.5 Granulometría del agregado fino y grueso

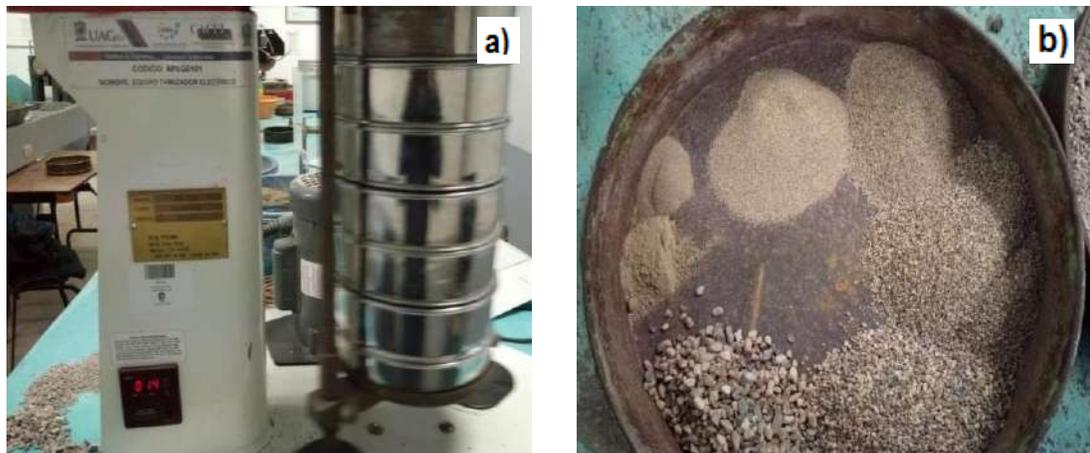
De acuerdo a la ASTM C 136 [60] la norma señala el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños a través de las cribas.

#### Equipo:

- Balanza con una aproximación de 0.1%.
- Cribas que cumplan con las especificaciones de la norma.
- Máquina agitadora de motor para el cribado.

#### Procedimiento:

Se colocó la muestra de arena y/o grava en la criba superior, posteriormente se agitó con la máquina de tamiz el tiempo de 8 minutos como se observa en la Figura 3.9 a). Se determinó la masa del retenido total en cada tamiz, se procedió con los siguientes tamices de la misma forma hasta la número 4.75 (n°4) para arenas y la número 2.36 para gravas (n°8). En la figura 3.9 b) se puede observar visualmente el tamaño de partícula del agregado fino a través de los diferentes tamices.



**Figura 3.9.** a) Máquina cribadora de arena, b) Tamaño de partícula de los diferentes tamices de la arena.

### 3.3 Diseño de concreto

Después de efectuar las pruebas físicas de los materiales se realizó la dosificación del concreto. En la Tabla 3.3 se muestra el diseño de mezcla para un diseño teórico de  $250 \text{ kg/cm}^2$  y agregando 2.5%, 7.5% y 15 % en contenido de grafito con respeto al peso del cemento.

**Tabla 3.3.** Dosificación de diseño de mezcla de concreto  $F'c=250 \text{ kg/cm}^2$

MEZCLA PROPUESTA					
Material	Porción por $\text{m}^3$ (Kg)	Porción unitaria en peso (kg)	Proporción por 50 kg de cemento	Proporción en botes y cemento (Kg)	Observaciones
Cemento(kg)	366	1.000	50	50	ARENA MVSS 1674.59
Agua (l)	219	0.597	30	1.7	
Aire	0		0		GRAVA MVSS 1528.57
Arena (kg)	818	2.234	112	3.7	
Grava (kg)	903	2.468	123	4.5	
Grafito (kg)	0	0.000	0.000	0.0	
Masa unitaria	2306				

**Tabla 3.4.** Dosificación de diseño de mezcla con diferentes porcentajes de grafito respecto al peso del cemento.

PORCENTAJES DE GRAFITO CON RESPETO AL CEMENTO $1 \text{ m}^3$				
% Cemento	% Grafito	Cantidades cemento (Kg)	Cantidades grafito (Kg)	Total
100	0	366.07	0	366.07
97.5	2.5	356.92	9.15	366.07
92.5	7.5	338.62	27.46	366.07
85.0	15.0	311.16	54.91	366.07

En la Tabla 3.4. Se muestra un total de 4 diseños de concreto, solo modificando el contenido de cemento respecto al contenido del grafito. La masa unitaria de diseño del concreto se mantuvo igual durante los diseños.

**Tabla 3.5.** Dosificación de los 4 diseños de mezcla para 48 l de concreto.

<b>Material</b>	<b>Mezcla N° 1</b>	<b>Mezcla N°2 (2.5% Grafito)</b>	<b>Mezcla N°3 (7.5% Grafito)</b>	<b>Mezcla N°4 (15% Grafito)</b>
Cemento (Kg)	17.571	17.132	16.254	14.936
Agua (l)	10.494	10.494	11.294	12.094
A/C	0.597	0.613	0.695	0.810
Arena (Kg)	39.261	39.261	39.261	39.261
Grava (Kg)	43.362	43.362	43.362	43.362
GP (Kg)	0.000	0.439	1.317	2.635
SUMA	110.688	110.688	111.088	111.488

En la Tabla 3.5 se calcularon los pesos de los materiales de las 4 mezclas para la fabricación de especímenes de concreto control y concreto reforzado. Sin modificar los pesos de los agregados fino y grueso, solo modificando el peso del cemento en la adición del grafito.

### 3.4 Elaboración de mezcla de concreto

Para el mezclado, se pesaron los materiales de acuerdo al diseño propuesto como se puede ver en la Figura 3.10 a) y se dosificó de acuerdo a la capacidad de la olla de  $\frac{1}{2}$  saco de cemento. En la Figura 3.10 b) se observa que se manejaron dos ollas para la fabricación del concreto en el laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería, en la Universidad Autónoma de Guerrero.

El vaciado del material se realizó en el orden: agregado grueso, después el agua, agregado fino, cemento y repitiendo el mismo orden.



**Figura 3.10. a)** Peso de los materiales colocados en recipiente **b)** Vaciado del material a la revolvedora.

Se dio un tiempo de 4 minutos aproximadamente de revolutura a la muestra, y luego se dejó reposar 2 minutos, en el tiempo de reposo se tapó la boca de la olla con una jerga húmeda y después se procedió a revolver 3 minutos más para vaciarlo en la carretilla como se observa en la Figura 3.11 a).

En la Figura 3.11 b), con una pala se mezcló el concreto para tener mejor homogeneidad de la pasta.



**Figura 3.11. a)** Colocación del concreto a la carretilla, **b)** Remezclado del concreto fresco para pruebas físicas.

### 3.4.1 Prueba de consistencia o revenimiento

La prueba de revenimiento [28] se realizó pocos minutos después del vaciado del concreto a la carretilla.

#### Equipo:

- Molde debe de contener una forma de cono truncado, dimensiones 200 mm en la parte inferior, 100 mm en la parte superior y 300 mm de altura.
- Varilla de apisonamiento.
- Cinta métrica.
- Cucharón.

#### Procedimiento:

Se humedeció el molde en el interior, después colocando los pies encima de las orejas del molde se procedió a llenarlo en 3 capas, y con la varilla de apisonamiento se compactó con 25 golpes por cada capa llenada. Se levantó el molde sin que se mueva de la placa a la altura de 30 cm, en  $5 \pm 2$  segundos. Después con la cinta métrica se midió el borde superior e inferior de la pasta, registrando en cm, esta prueba se realizó en menos de 2.30 minutos, como se observa en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Prueba de revenimiento al concreto fresco.

---

### 3.4.2 Medición temperatura del concreto

#### Procedimiento:

Se colocó el aparato medidor de temperatura en la mezcla de concreto sumergido 3 pulgadas en ambas direcciones. Se dejó el aparato por 2 minutos y se registró la temperatura.

### 3.4.3 Prueba de masa unitaria

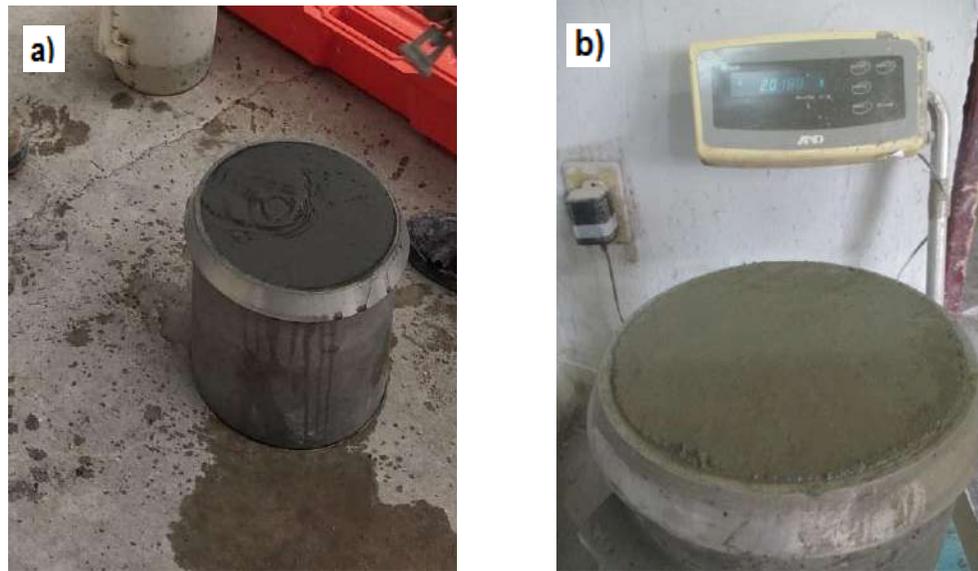
La densidad o masa unitaria es muy importante para determinar el control de calidad del concreto.

#### Equipo:

- Báscula con precisión de 5 g.
- Varilla de apisonamiento: debe de ser de acero con sección circular de 5/8”(16 mm) de diámetro y 24 “ (600 mm) de longitud, con punta hemisférica.
- Recipiente para medir.
- Placa para remover exceso de concreto: una placa de acero recta y plana de al menos ¼” de pulgada (6 mm) o placa de vidrio, acrílico.
- Cucharón
- Mazo: Un mazo con cabeza de hule peso de  $1.25 \pm .50$  lb ( $600 \pm 200$  g) para usarse en recipientes de 14 litros.

#### Procedimiento:

Se colocó el concreto en el recipiente y llenándolo en 3 capas iguales, se apisonó cada capa con 25 golpes de varilla de apisonamiento. A partir, de la segunda capa al momento de apisonar esta no debe entrar más 1 pulgada (25 mm) la capa inferior. Después de apisonar cada capa se golpeó suavemente los lados del recipiente de 10 a 15 veces con el mazo de hule. Finalmente, se llenó la última capa sin tener exceso por encima del tope del recipiente, si tenía exceso se quitó con un cucharón como se observa en la Figura 3.13 a). Se limpió el concreto del exterior y se pesó determinando la masa del concreto tal y como se observa en la Figura 3.13 b).



**Figura 3.13.** a) Llenado de concreto el molde para prueba de masa unitaria, b) Medición de la masa del concreto en una báscula precisión 5 g.

#### 3.4.4 Determinación del contenido de aire en el concreto

Con el mismo recipiente que se utilizó para realizar la masa unitaria, se realizó la prueba de contenido de aire por el método de presión de acuerdo a la norma [31].

##### Equipo:

- Medidor tipo B: Es un medidor de aire que consiste en un recipiente de medición y tapa ensambladora.
- Recipiente de medición.
- Tapa de ensamble: Debe de estar acondicionada con un dispositivo de lectura directa del contenido de aire.
- Varilla de apisonamiento.
- Cucharón.
- Mazo.

##### Procedimiento:

Se llenó el recipiente en 3 capas iguales, después se compactó con 25 golpes con la varilla de apisonamiento.

Posteriormente, se golpeó el exterior del recipiente con 10 a 15 golpes con el mazo. Después de llenar la última capa se enrazó cuidadosamente y se limpió quitando exceso de concreto del exterior. Se prosiguió con el ensamble de la tapa tal y como se observa en la Figura 3.14; logrando un cierre hermético a presión. Se inyectó agua con una jeringa de látex (aspirador nasal) a través de las válvulas hasta que el agua misma surja en la válvula opuesta.



**Figura 3.14.** Cierre hermético de la tapa del medidor tipo B para contenido de aire del concreto.

Se sacudió el medidor para que el aire saliera por la misma purga, como se observa en la Figura 3.15.a. Inmediatamente se cerró la válvula y se inyectó aire hasta que la aguja del medidor estuvo en la línea de la calibración del equipo como se muestra en la Figura 3.15 b. Finalmente la aguja se estabilizó y se registró el porcentaje de presión.



**Figura 3.15. a)** Prueba del porcentaje de contenido de aire, **b)** Estabilización de la aguja del medidor tipo B.

### 3.4.5 Elaboración de especímenes

Se elaboraron las probetas cilíndricas de dimensiones estándar 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de acuerdo a la norma ASTM C 31 [32]

#### Equipo:

- Moldes cilíndricos: deben de estar hechos de acero, hierro fundido u otro material no absorbente, no reactivo con el concreto.
- Varilla de apisonamiento.
- Mazo cabeza de hule.

#### Procedimiento:

Se colocó el concreto en el molde, se llenó en 3 capas iguales, posteriormente se compactó con la varilla de apisonamiento con 25 golpes, para las dos capas posteriores se penetró 1 pulgada (25 mm). Después de apisonar cada capa se golpeó suavemente los lados del cilindro 10 a 15 veces con el mazo de hule, se añadió concreto a la última capa. Al final se

enrasó con la regla enrazadora como se observa en la Figura 3.16. a. Al final se protegió los cilindros de la contaminación con la misma tapa del molde o con bolsas de plástico, tal y como se observa en la Figura 3.16 b. Los cilindros se transportaron al laboratorio dentro de las 24 horas después de prepararlos.



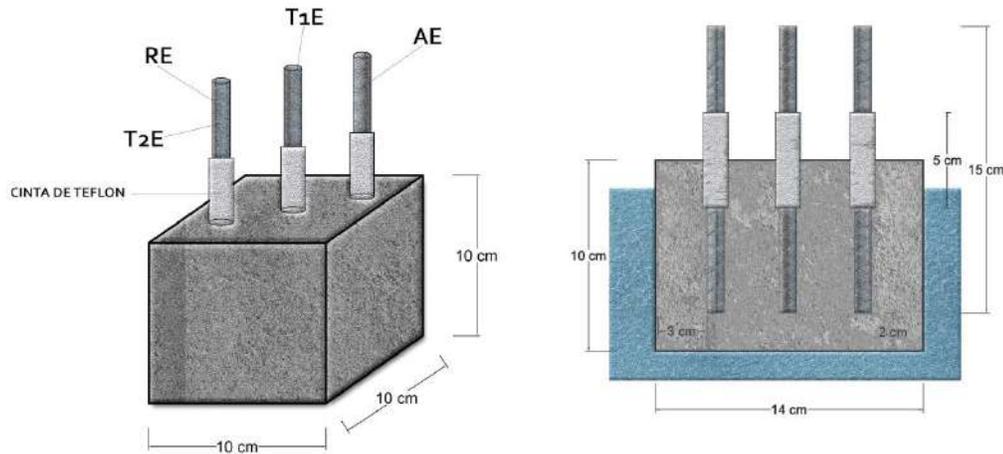
**Figura 3.16. a)** Enrase de cilindros de concreto, **b)** Protección de especímenes por contaminación.

Las varillas para la elaboración del concreto reforzado se lijaron y limpiaron previamente, después a la altura de la interfaz de la pasta con el medio ambiente se aisló aproximadamente de 5 cm de largo con cinta de teflón alrededor de la varilla, como se observa en la Figura 3.17.



**Figura 3.17.** Limpieza de varillas y preparación con cinta de teflón.

Para las pruebas electroquímicas se elaboraron del mismo diseño de mezcla 3 espécimen cúbicos de dimensiones 10 cm por lado, como se observa en la Figura 3.18. Se embebieron 3 varillas corrugadas en cada espécimen cúbico, de dimensión 0.95 mm de diámetro (3/8") de acero 1018. La longitud de la varilla embebida fue aproximadamente de 5.5 cm.



**Figura 3.18.** Dimensiones cúbicas para pruebas electroquímicas.

### 3.5 Curado

Después de desmoldar las probetas se almacenaron en condiciones adecuadas de humedad, siempre cubiertas por agua a una temperatura ( $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) [32], tal y como se observa en la Figura 3.19.



**Figura 3.19.** Curado de especímenes cúbicos.

### 3.6 Pruebas de resistencia a compresión

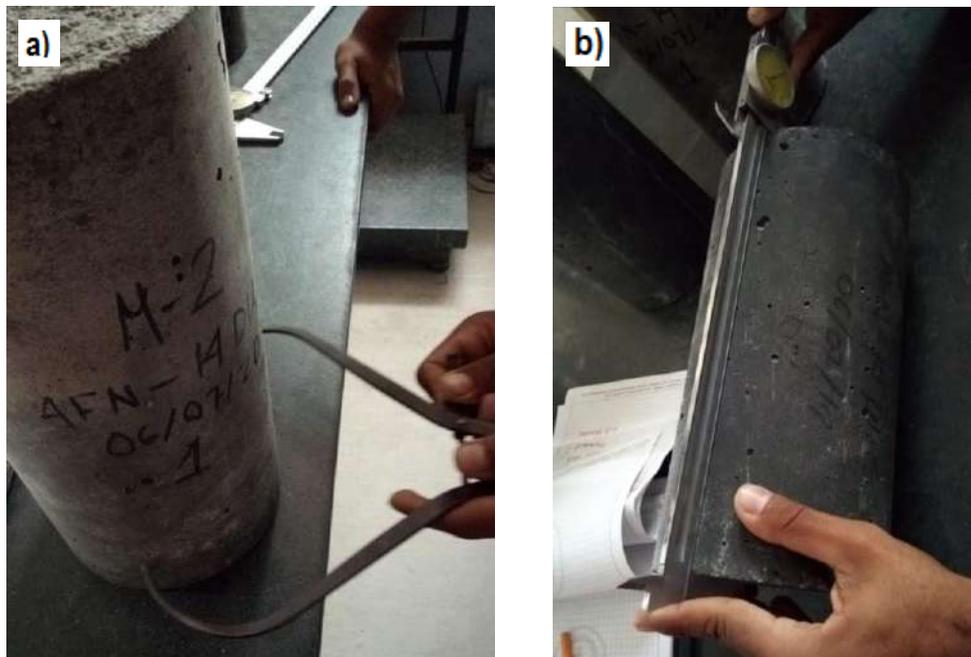
Para el ensayo a compresión se realizaron pruebas a especímenes cilíndricos a 7 días, 14 días y 28 días, con la finalidad de observar el incremento de resistencia al alcanzar el máximo de curado.

#### Equipo:

- Compás de punta.
- Calibrador digital.
- Máquina Hidráulica Universal con capacidad de 120 Toneladas con indicador digital para prensas de ensayo de concreto POISE CR-2k.

#### Procedimiento:

Antes de realizar la prueba de resistencia a compresión se midió el diámetro y la altura del espécimen de prueba, como se observa en la Figura 3.20 a) y b). Cuando la altura promedio del espécimen es menor de 1.8 veces el diámetro el resultado de la resistencia debe corregirse por esbeltez [33].



**Figura 3.20.** a) Medida del diámetro del espécimen, b) Medida del diámetro con el apoyo de vernier.

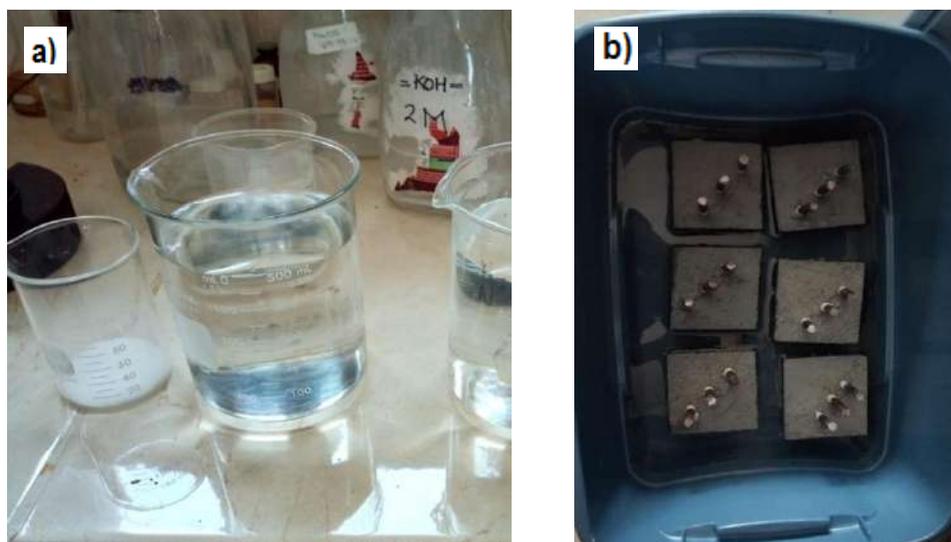
El cabeceo de cilindros se realizó con placas de neopreno como lo indica la norma C39 [33]. Los especímenes de concreto fueron colocados sobre el centro de la Máquina y tocando ambos extremos de las placas de neopreno tal y como se muestra en la Figura 3.21 a) y b). Se continuó aplicando una carga constante de intervalo de 137 (84 kgf/cm<sup>2</sup>/min a 210 kgf/cm<sup>2</sup>/min) hasta la falla del espécimen. La resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima ( $F$ ) obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal ( $A$ ) del espécimen.

$$f'_c = (F/A) \quad (22)$$



**Figura 3.21. a)** Placas de neopreno puesta a los extremos del espécimen, **b)** Ensayo a compresión.

Después de realizar las pruebas mecánicas de resistencia a compresión, los especímenes cúbicos se expusieron a un ambiente agresivo salino (agua con 3% de NaCl en peso) tal y como se observa en la Figura 3.22 a) y b), para realizar las pruebas electroquímicas.



**Figura 3.22. a)** Disolución de 3% de NaCl en agua, **b)** Especímenes inmersos en medio agresivo.

### 3.7 Caracterización química

#### 3.7.1 Difracción de rayos-X al concreto con adición de grafito.

La técnica de difracción de rayos-X, se realizó en Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) en el Laboratorio de Difracción de Rayos-X (LANGEM).

#### **Procedimiento:**

Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro Empyrean equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel 3D. Las muestras se homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un porta muestras de aluminio (fracciones no orientadas). La medición se realizó en el intervalo angular  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $70^\circ$  en escaneo por pasos con un “step scan” de  $0.003^\circ$  (2 theta) y un tiempo de integración de 40s por paso.

La cuantificación se realizó utilizando el método de Rietveld implementado en el software HighScore v4.5 y las bases de datos del ICDD (International center for diffraction data) y ICSD (inorganic crystal structure database).

### 3.7.2 Técnica microscopía electrónica de barrido (MEB) al concreto y acero de refuerzo.

La técnica de MEB se realizó en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), empleando muestras pequeñas recubiertas en oro, para su análisis. Esta técnica fue utilizada para obtener información de la morfología de los componentes del concreto. Fue llevado a cabo en un microscopio HU-200F LEO VP 1450 mostrado en la Figura 3.23.



Figura 3.23. Microscopio electrónico de barrido (MEB).

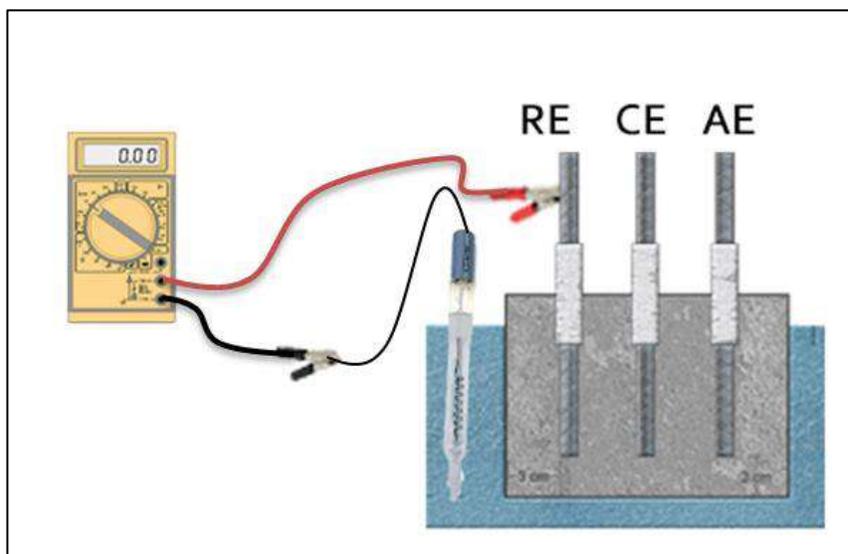
## 3.8 Técnicas electroquímicas

Se realizaron las técnicas de potencial de media celda del material, ruido electroquímico ( $R_n$ ) y resistencia a la polarización lineal (R.P.L.) del acero embebido en concreto en un ambiente agresivo.

### 3.8.1 Potencial de media celda

Se observaron los potenciales de corrosión electroquímica del acero de refuerzo en el concreto; comparando sus potenciales con respecto a un

electrodo de referencia Ag/AgCl como se muestra en la Figura 3.24. Un cable en serie con multímetro y un interruptor conecta los dos electrodos.



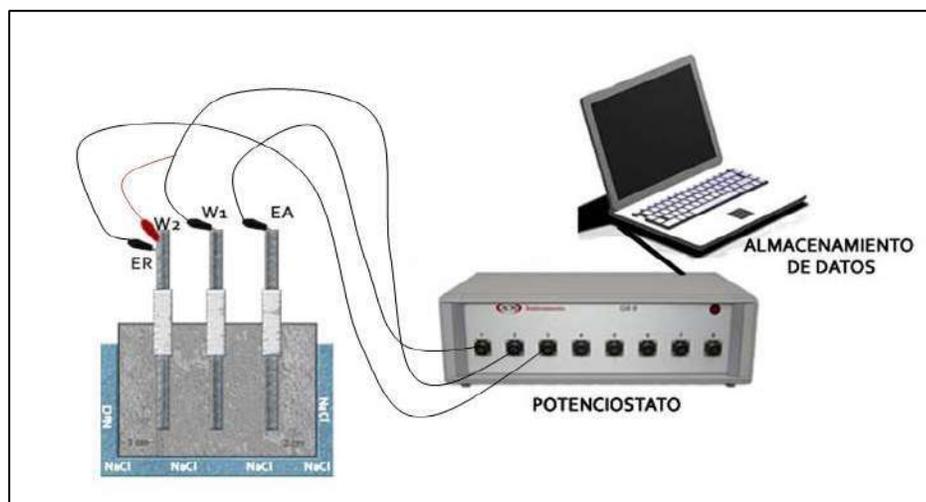
**Figura 3.24.** Celda electroquímica para la medición de potencial de media celda.

### 3.8.1.1 Electrodo de referencia.

Se utilizó electrodo de referencia de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) para medición del potencial electroquímico del acero. Consiste de un alambre de plata pura sobre el que se realiza un depósito electrolítico de AgCl, por espacio de 10 minutos, en una solución de KCl o HCl 0.1 M [66].

### 3.8.2 Ruido electroquímico

El equipo que se utilizó para esta prueba es una “interface electroquímica” potencióstato/galvanostato, marca Gill AC-ACM Instruments. El concreto estuvo inmerso en electrolito a agentes agresivos en cloruros durante 168 días de exposición; esta técnica permite detectar los tipos de corrosión localizada, generalizada o mixta. Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante los programas excel y origin 18. Se tomaron 1024 puntos de lectura con una velocidad constante de 1 punto/segundo el intervalo fue de 30 mV la conexión se muestra en la Figura 3.25.



**Figura 3.25.** Esquema de conexión para las pruebas de ruido electroquímico y resistencia a la polarización.

### 3.8.3 Resistencia a la polarización lineal

En la técnica de R.P.L. se aplicó una pequeña señal de voltaje entre  $-50$  mV y  $+50$  mV de acuerdo a la norma ASTM G-59 [67]. Se utilizó un potencióstato/galvanostato marca Gill AC-ACM Instruments tal y como se observa en la Figura 3.26 y una velocidad de barrido de  $60$  mV/min.

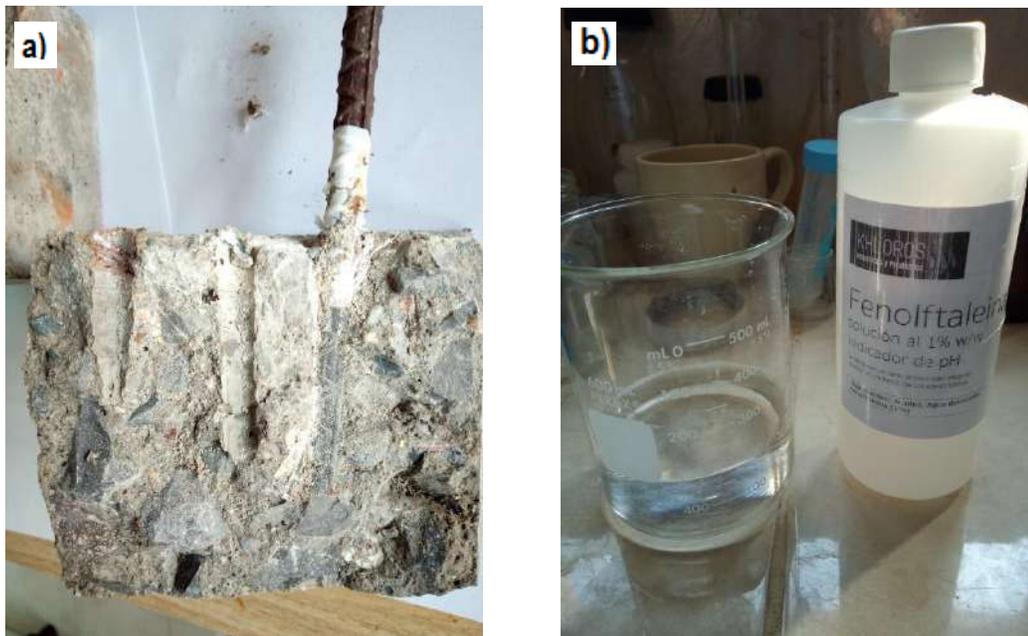


**Figura 3.26.** Técnica de resistencia a la polarización lineal.

A partir de los datos de corriente y potencial se calculó la pendiente de la misma, que es la  $R_p$ .

### 3.9 Indicador de pH técnica de fenolftaleína

Después de 168 días de exposición al medio agresivo de cloruro de sodio (NaCl) al 3 %; las probetas se fracturaron a la mitad tal y como se muestra en la Figura 3.27 a y b. Se aplicó el indicador de pH a la superficie de la muestra de concreto recién fracturada del espécimen.



**Figura 3.27. a)** Fractura del concreto para extracción del acero de refuerzo y aplicación del indicador de pH, **b)** Fenolftaleína al 1 % en alcohol.

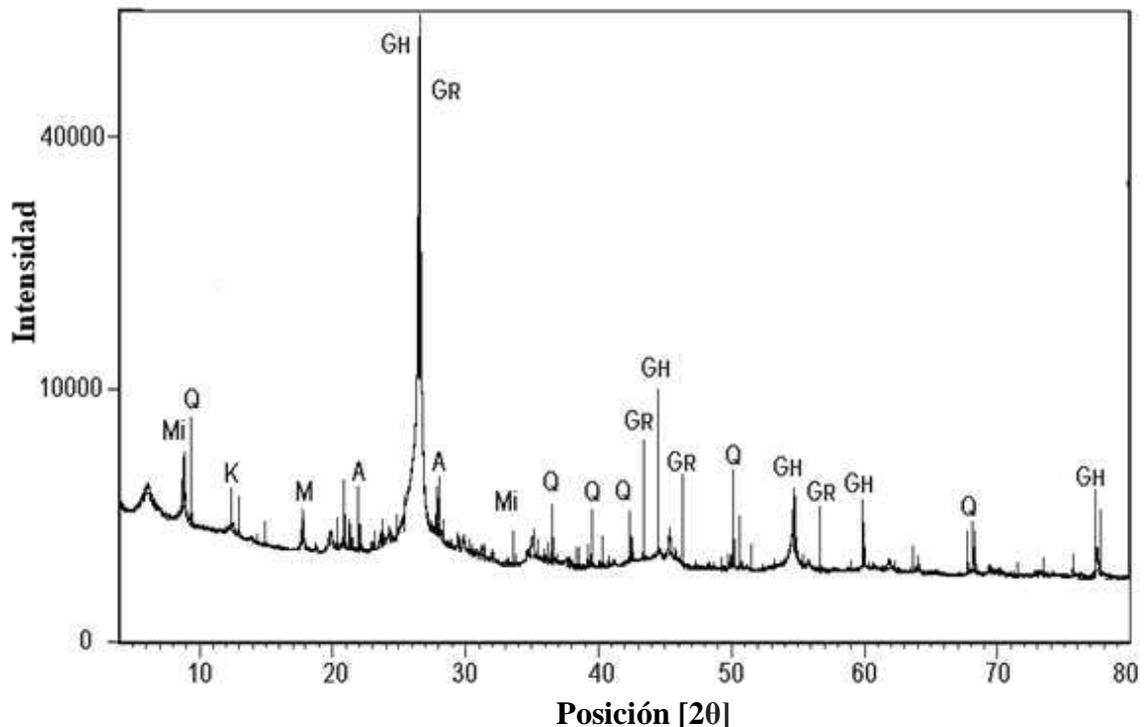
## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se detalla el análisis de los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización, la elaboración del diseño de mezcla de concreto, las pruebas físicas de los materiales y la evaluación con las técnicas electroquímicas correspondientes al monitoreo de 168 días inmersos en ambiente agresivo al 3% de cloruro de sodio (NaCl).

### 4.1 Resultados de las técnicas de caracterización.

#### 4.1.1 Difracción de rayos-X.

De acuerdo con la literatura, del espectro de difracción de rayos-X de un material (cristalino o policristalino), se obtiene información de la posición, de la intensidad integrada, de la anchura y de la forma de los picos de difracción [68].



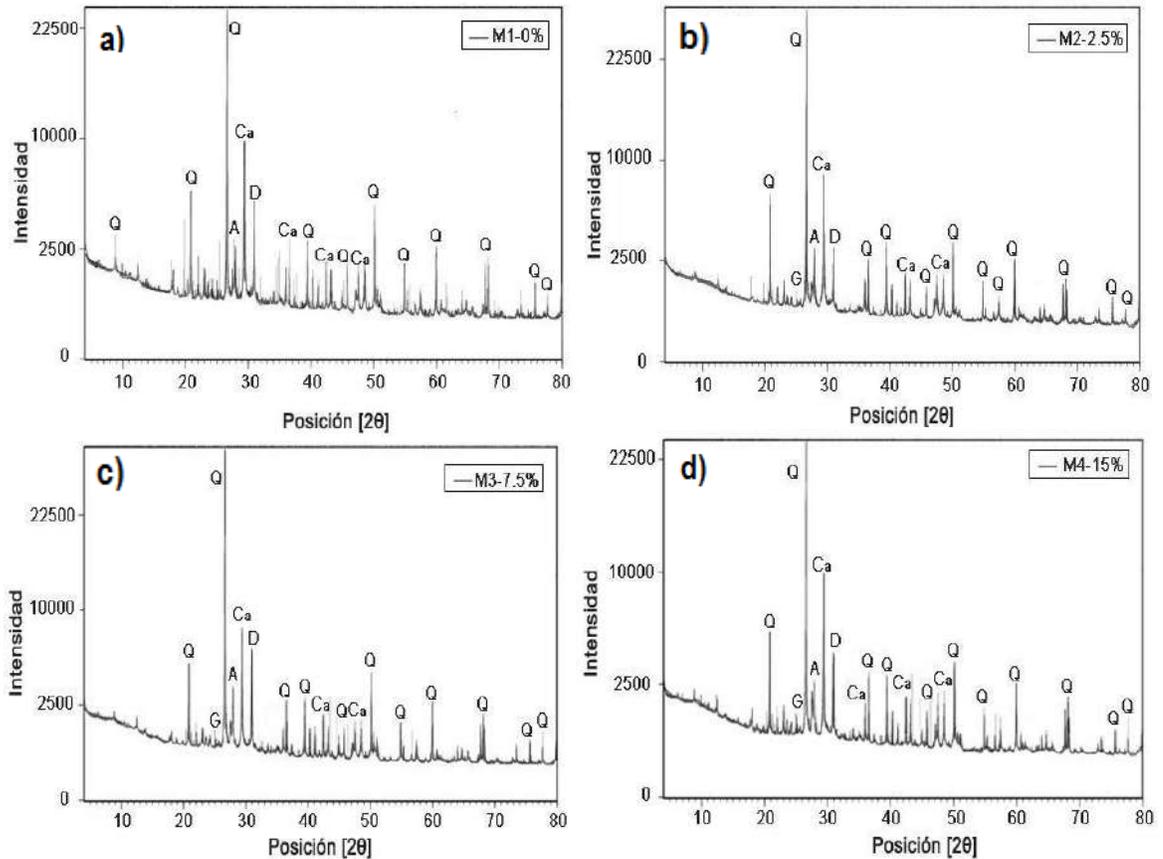
**Figura 4.1.** Difractogramas de rayos X del GP. Mi: mica; K: caolinita; M: montmorillonita; G<sub>H</sub>: grafito(2H); G<sub>R</sub>: grafito (3R); A: anortita; Q: Cuarzo.

**Tabla 4.1.** Compuestos químicos del GP, analizados mediante DRX.

FASES IDENTIFICADAS	Cuantitativo %
Grafito 2H: C	39.9
Grafito 3R: C	27.4
Cuarzo: SiO <sub>2</sub>	2.9
Plagioclasas intermedias : (Na,Ca)(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	14.9
Filosilicatos de tipo esmectita	8.8
Filosilicatos de tipo caolinita	1.7
Filosilicatos de tipo mica	4.3
Posibles Trazas (<2%) de zeolita tipo laumontita	

En la Figura 4.1 se observan los difractogramas del polvo de grafito, de manera general se muestra un sólido policristalino por su aspecto de arreglo ordenado y repetitivo; con una posición de pico con valores de  $2\theta$  aproximadamente en un rango de  $26^\circ$  y  $27^\circ$ . Estos valores son similares a algunos reportados por autores que describen el pico característico del grafito [9]. En menor intensidad se observan las fases cristalinas de mica, caolinita y plagioclasas, estas fases corresponden al contenido de arcillas, lo cual significa que el grafito tiene impurezas, como se menciona en las características generales del proveedor (ver Figura 3.1). De lo anterior, se puede marcar que el grafito tiene una estructura cristalina; un grafito amorfo no presentaría intensidades de arreglos ordenados y repetitivos en los DRX [69-70].

En la Tabla 4.1 se muestran los componentes analizados de la muestra de grafito. En las técnicas DRX se observan 2 formas cristalinas diferentes: hexagonal (2H) y romboédrica (3R). En la estructura de grafito 2H, es la estructura más común en la fase identificada con valores 39.9% y el grafito 3R con valores de 27.4%, una suma total de 67.3% de carbono. En las fases identificadas se muestra los valores de 32.6 % de arcilla en componentes de: cuarzo, filosilicatos esmética, caolinita, mica y plagioclasas intermedias. Los resultados de los porcentajes de carbono y arcilla mostrados con la técnica de DRX son datos similares proporcionados por el proveedor.



**Figura 4.2.** Difractograma para las muestras de concreto, curado a 28 días. **a)** M1-0%, **b)** M2-2.5% **c)** M3-7.5% y **d)** M4-15% de grafito.

La Figura 4.2 corresponde a los difractogramas de la muestra control y con diferente porcentaje de grafito. Cuando el cemento se trata con agua, a los 28 días muestra las siguientes fases: silicato de calcio hidratado o tobermorita (CSH) que es el responsable de la adherencia y resistencia con los conglomerantes, etringita (E) da mayor cohesión al cemento y la portlandita (P) mantiene la alcalinidad es decir el pH de la pasta en valores altos (12-13) [71-72]. Estos elementos están presentes en todas las etapas de hidratación.

En la Figura 4.2 a) se muestran las fases cristalinas de hidratación del concreto, se observan picos elevados de cuarzo (Q) y calcita (Ca) además

---

de dolomita (D) y plagioclasas o andesina (A). Las principales impurezas en las calizas son el cuarzo y la dolomita; resaltando que el cuarzo es el contaminante más abundante [73].

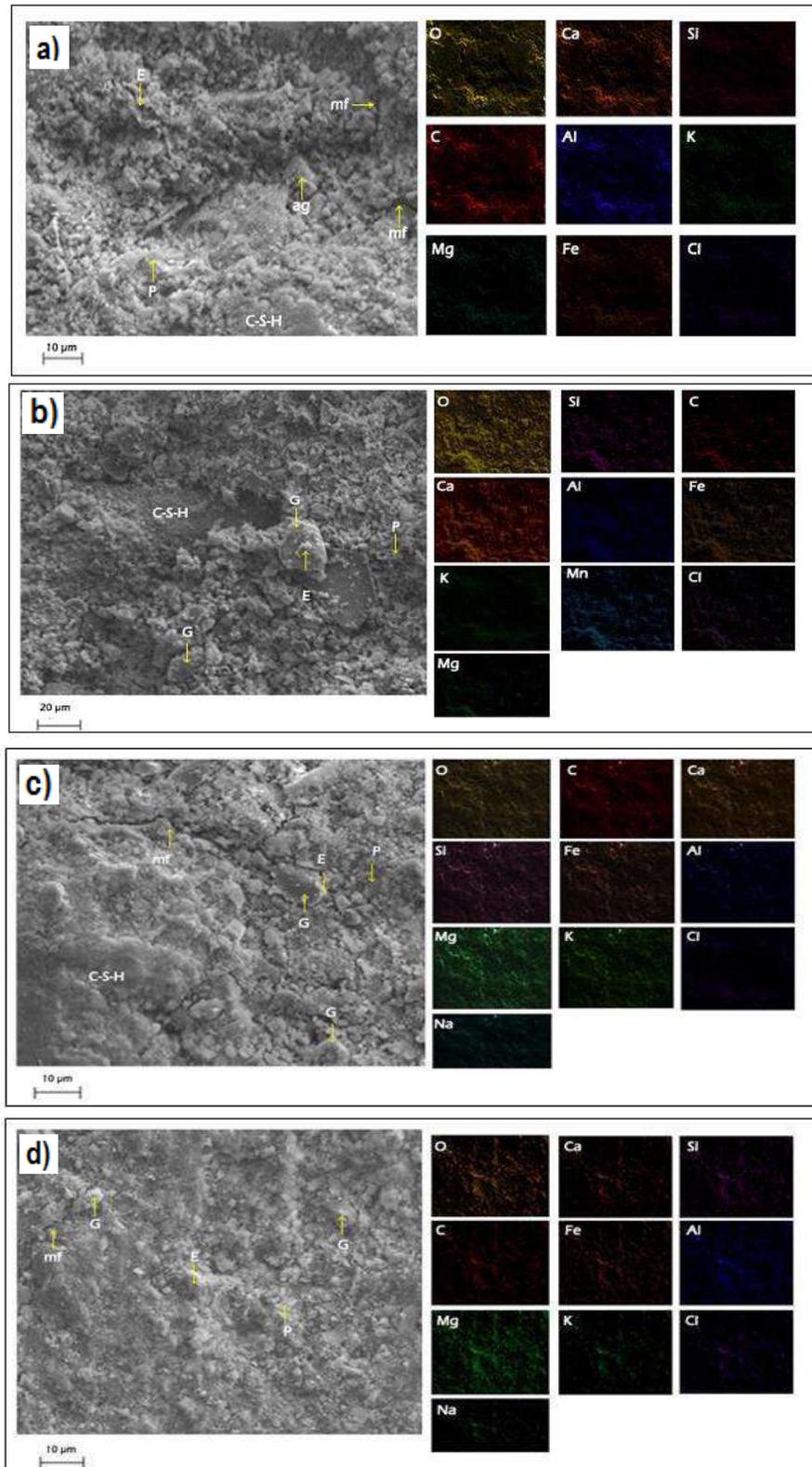
Se observa que el análisis de DRX no mostró una intensidad fuerte en los picos en la portlandita; varios estudios indican que los picos con valores de  $2\theta$  aproximadamente  $29^\circ$  pueden asignarse a la fase de CSH y picos con valores  $2\theta$  aproximadamente  $18^\circ$  y  $36^\circ$  pueden asignarse a (P) [72-73].

La ausencia de portlandita (P) en el difractograma puede deberse a que la muestra proviene de la superficie del cilindro, donde los efectos de carbonatación pueden oscurecer la identificación [74] debido a la orientación preferida del hidróxido de calcio.

En el diagrama b) c) y d) se observa la adición del GP, se muestra una intensidad de pico que no aumenta con el incremento del polvo. De acuerdo a otros estudios indican que el grafito no participa directamente en la hidratación del concreto [9].

#### **4.1.2 Microscopio electrónico de barrido.**

En la Figura 4.3 se muestran los resultados de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), curado a los 28 días y sin inmersión al medio salino. La Figura 4.3 a), se aprecia la micrografía y el mapeo de los elementos químicos; en el análisis visual se pueden observar microfisuras (mf) esto debido a la carga de resistencia a la compresión, o la extracción de las muestras. Además, de una estructura no homogénea, compuesta por los silicatos de calcio hidratados (CSH), portlandita (P) y etringita (E), coincide con otros estudios [75]. En el mapeo químico se muestra la distribución de los elementos O, Ca, Si, C, Al, K, Mg, Fe y Cl. El concreto (O, Ca, Si) están bien identificados. Además del aluminio (Al) y hierro (Fe) formando las fases mineralógicas [76].



**Figura 4.3.** Micrografía ampliación 1000 X y mapeo de elementos químicos de MEB curado a 28 días. **a)** M1-0%, **b)** M2-2.5%, **c)** M3-7.5%, **d)** M4-15%.

Se puede notar mayor presencia de huecos a consecuencia de esto, el concreto es más permeable y poroso. Además, se puede observar que los cloruros son identificados en el concreto, cabe mencionar que esta muestra no ha estado inmersa en un ambiente agresivo al medio salino, este suceso se refiere, que los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua) [77]. Se menciona la ubicación del agregado fino (arena); esta extraído del banco río papagayo en la región de Acapulco Guerrero, México; una zona cercana al mar. Consecutivamente, la presencia de cloro en el concreto perjudicará sus propiedades electroquímicas.

La Figura 4.3 b), se presenta la muestra M2 con 2.5% de GP, en la micrografía se observa de forma general una estructura no homogénea, pero con mayor presencia de P, E y de CSH en la matriz del concreto comparado con la muestra M1-0%. Se aprecia de forma visual, que las partículas de carbono (G) están incrustadas en la matriz del concreto. En el mapeo de elementos puede apreciar que el cemento tiene mayores niveles de C, debido a la adición de GP; los cloruros siguen presente en esta muestra. Conjuntamente, se observa menores huecos en el material, lo que conduce a una disminución de la porosidad de la matriz del concreto.

La Figura 4.3 c) se observa la muestra M3 con 7.5% de GP, en el análisis de la micrografía de forma general, se puede observar una distribución homogénea de los elementos y más compacta; este hecho se debe a la mayor absorción de agua del grafito. Se muestra en la matriz del concreto mayor presencia de CSH, P y E; en la parte superior se destaca una microfisura de mayor longitud y partículas de carbono (G) que están incrustadas en la pasta de concreto. En el mapeo se aprecia que el cemento tiene mayores niveles de C, comparado con la muestra M2-2.5%, debido a la mayor cantidad de GP añadido al concreto. Además, se puede notar una mejor distribución de las partículas y menor cantidad de huecos en la matriz del concreto.

Este hecho, disminuye la porosidad del material, lo que demuestra que el concreto es menos permeable.

La Figura 4.3 d) se presenta la muestra M4 con 15% de GP, de carácter general se observa una estructura compacta, pero con menor presencia de C-S-H, P y E. Este comportamiento, puede indicar que la cantidad de saturación de impurezas en el grafito, se ve reflejada en la distribución de la matriz del concreto. Además, se observa poca presencia de partículas de carbono (G), y una pequeña microfisura (mf).

En el mapeo de elementos químicos se puede notar que la distribución de los elementos del concreto (O, Ca, Si) es muy parecida a la muestra control (ver Figura 4.3 a). Se puede apreciar mayor cantidad de huecos, y una distribución de las partículas no homogénea, lo que indica que el material tiene mayor permeabilidad.

#### **4.1.2.1 Análisis de los componentes químicos en la técnica MEB**

En la Tabla 4.2 se muestra el resumen de los componentes químicos de las 4 muestras analizadas; estos resultados coinciden con los mapeos químicos. Para este análisis tomaremos el estudio de cloruros (Cl) porque es muy importante en los efectos de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. En la muestra M1 se observó la presencia de cloruro de potasio (KCl) con valores de 0.12%, de acuerdo a estudios el KCl se presentan en sales disueltas del mar.

El agua de mar contiene sales muy agresivas para el concreto, están presentes los siguientes compuestos: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ), sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ), sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ), cloruro de potasio (KCl) y sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) [78]. Este hecho puede

indicar la contaminación de cloruros en los agregados para la elaboración del concreto.

En la muestra M2, se observa un aumento en el KCl con valores de 0.37% en peso; este comportamiento muestra efectos o inicio de probabilidad de corrosión del acero de refuerzo antes de que las probetas estén en contacto con el ambiente salino. La muestra M3 tiene el mismo valor de 0.37% de KCl comparado con la muestra M2, de acuerdo con los resultados de la técnica MEB. El efecto de cloruros en el interior de la matriz de concreto aumenta la probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. Finalmente, la M4 disminuye la cantidad de KCl con valores de 0.19%. Se aprecia una disminución en los otros elementos del cemento como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , debido a que la reducción del cemento afecta la hidratación en estos componentes como se puede observar en las micrografías de MEB.

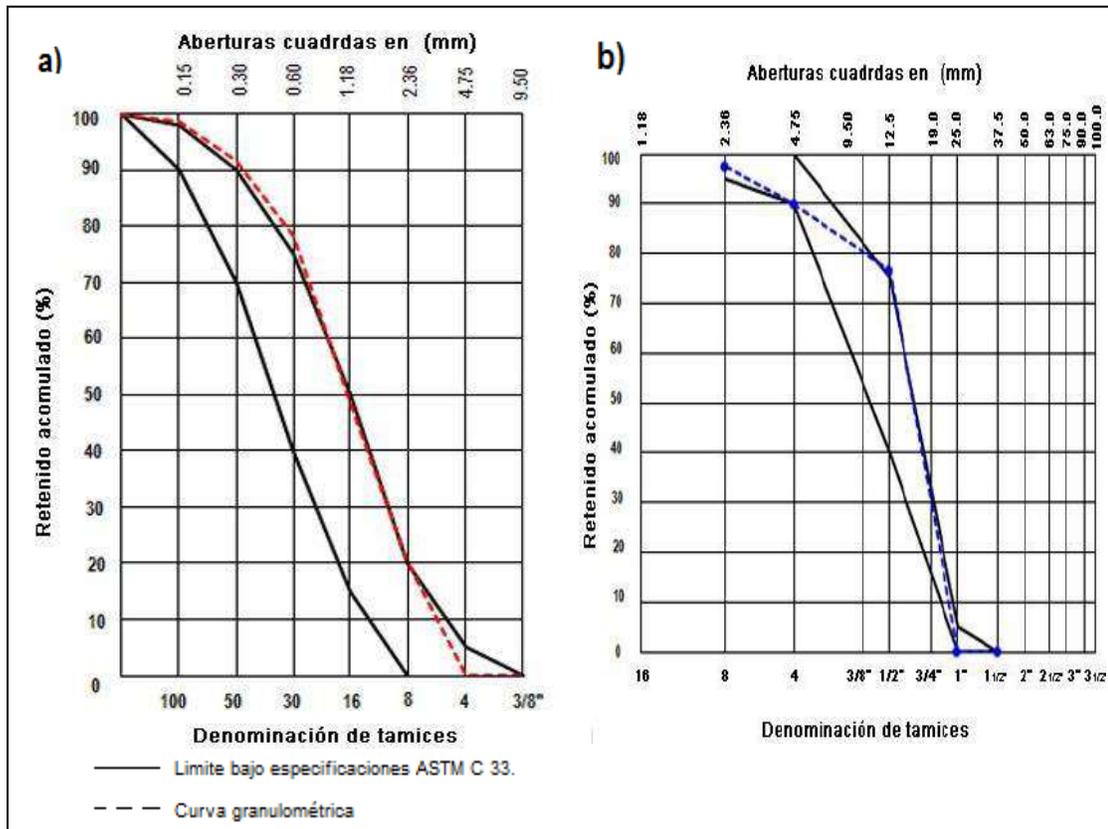
**Tabla 4.2.** Composición química de las muestras analizadas con la técnica MEB.

M-1		M-2		M-3		M-4	
ELEMENTO	PESO %						
CaCO <sub>3</sub>	7.27	CaCO <sub>3</sub>	14.72	CaCO <sub>3</sub>	20.14	CaCO <sub>3</sub>	7.10
SiO <sub>2</sub>	42.18	SiO <sub>2</sub>	38.81	SiO <sub>2</sub>	41.59	SiO <sub>2</sub>	41.84
MgO	0.39	MgO	0.17	Albite	0.35	Albite	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.09	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.44	MgO	0.63	MgO	0.53
SiO <sub>2</sub>	14.31	SiO <sub>2</sub>	29.51	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.62	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82
KCl	0.12	KCl	0.37	SiO <sub>2</sub>	13.93	SiO <sub>2</sub>	9.94
Feldspar	0.52	Feldspar	1.14	KCl	0.37	KCl	0.19
	32.76	Wollastonite	10.15	Feldspar	0.58	Feldspar	0.47
Wollastonite				Wollastonite	16.90	Wollastonite	34.50
Fe	0.40	Mn	0.70	Fe	3.00	Fe	3.50
		Fe	2.00				
<b>TOTAL</b>	<b>100.0</b>		<b>100.0</b>		<b>100.0</b>		<b>100.0</b>

## 4.2 Resultado pruebas físicas de los componentes del concreto.

### 4.2.1 Granulometría de los Agregados

En la Figura 4.4 se observan las curvas granulométricas de los agregados pétreos.



**Figura 4.4.** Composición granulométrica **a)** agregado fino (arena). **b)** grueso (grava).

La Figura 4.4 a) se observa las condiciones para la curva granulométrica de la arena, se ajusta a la norma ASTM 33 [60]. Se establece la cantidad de partículas inferiores a 4.75 mm. La condición representa la calidad del material que permite obtener el tamaño máximo y nominal de la partícula. Además, el módulo de finura del agregado fino es muy importante para la distribución uniforme de las partículas del concreto en el diseño de mezcla [79].

En la Figura 4.4 b) se muestra la curva granulométrica del agregado grueso en comparación con los ajustes de la norma; de acuerdo a los resultados obtenidos las composiciones granulométricas cumplen con las especificaciones de la norma.

#### 4.2.2 Revenimiento

El revenimiento teórico, se diseñó para  $12 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ , con este parámetro y de acuerdo a la norma ASTM C 143 [28], la mezcla tiene mejor consistencia y manejabilidad. Los resultados de revenimiento se muestran en la siguiente Tabla 4.3, en las mezclas con adición de grafito M2-2.5%, M3-7.5% y M4-15% se puede observar que el revenimiento fue disminuyendo al agregar más porcentaje de polvo, en comparación a la muestra control M1-0%. En la fabricación del concreto se requirió mayor cantidad de agua para mantener el rango de diseño del revenimiento. De esta forma se aseguró una mayor consistencia y manejabilidad; la adición de más cantidad de agua a la mezcla modificó la relación agua/cemento.

**Tabla 4.3.** Prueba de revenimiento del diseño de mezcla.

Diseño	Revenimiento (cm)
M1-0	14.0
M2-2.5	12.0
M3-7.5	12.0
M4-15	12.0

### 4.2.3 Temperatura del concreto

En la siguiente Tabla 4.4 se muestra la temperatura interna del concreto, los valores se muestran en un rango de 28 °C a 30 °C. De acuerdo a la norma y supervisión en obra [29-80] el concreto debe mantener una temperatura inferior a los 32° C, si se obtiene una mayor temperatura existe la probabilidad de un fraguado más rápido de la mezcla y fisuras [81]. Los datos obtenidos son temperaturas alta, pero son inferior a lo que indica la norma; presenta estos valores debido a que la temperatura ambiente del lugar era de 34 °C.

**Tabla 4.4.** Temperatura del concreto

Diseño	Temperatura (°C)
M1-0	29
M2-2.5	28
M3-7.5	29
M4-15	30

### 4.2.4 Contenido de aire

Al concreto recién mezclado se le realizó la prueba de contenido de aire, con la finalidad de conocer qué volumen de aire o burbujas permanecen dentro del concreto [17]. De acuerdo con la Tabla 4.5, se muestran los resultados de las 4 mezclas con adición de GP, se observa que al añadir polvo de grafito, disminuye el contenido de aire con respecto a la muestra control. Este comportamiento indica que el tamaño de partícula del grafito se acomoda en los huecos ocupados por el aire, así se obtienen menores porcentajes y el concreto tiene menor cantidad de burbujas de aire atrapado. La muestra M3-7.5% tiene menos porcentaje de volumen de aire en comparación con el resto de

las muestras. De acuerdo con algunas investigaciones [82-83], si el concreto contiene un mayor porcentaje de aire afecta en su resistencia mecánica; un concreto con más contenido de aire es más permeable y, por lo tanto, más propenso a ser destruido por ataque de agua, aguas agresivas y congelamiento del agua [84].

**Tabla 4.5.** Porcentaje de aire en el diseño del concreto recién mezclado.

Diseño	Contenido de aire (%)
M1-0	2.8
M2-2.5	1.5
M3-7.5	1.0
M4-15	1.2

#### 4.2.5 Porosidad de la pasta de concreto.

La porosidad del concreto (P) o total de huecos en el material compuesto, se ha modelado [85] con la ecuación 23: la relación agua/cemento (a/c), el grado de hidratación del cemento (h), el volumen de aire atrapado (A), las cantidades de agregados finos (arena, Af) y grueso (grava, Ag), y del cemento (c); y las gravedades específicas de los agregados ( $\rho_f$  y  $\rho_g$ ).

$$P = \frac{\left[\left(\frac{a}{c}\right) - 0.36h + \left(\frac{A}{c}\right)\right]}{0.317 + \left(\frac{1}{\rho_f}\right)\left(\frac{Af}{c}\right) + \left(\frac{1}{\rho_g}\right)\left(\frac{Ag}{c}\right) + \left(\frac{A}{c}\right)} \quad (23)$$

Algunos autores muestran resultados de 23.3% de porosidad para concreto con relación a/c de 0.5; y de 25.2% para concreto con a/c de 0.7, para relación a/c de 0.45 se obtuvo 18.8% de porosidad [86-87], se tomó el valor de 0.7 para hidratación del cemento y para el cálculo de la porosidad con adición de GP, se tomó los valores de a/c y las cantidades del cemento para

la dosificación de mezcla (ver Tabla 3.5). En la Tabla 4.6 se observan los resultados obtenidos del porcentaje de porosidad del concreto, de manera general se visualiza que la mezcla M1-0 coincide con investigaciones anteriores con valores de 22.0 % de porosidad con una relación a/c de 0.59. Se observa que en la mezcla con 2.5% de grafito la porosidad es menor que en la muestra control, con valores 19.30 % con una relación agua/cemento de 0.61. Cuando el concreto presenta menor porosidad disminuye su permeabilidad, los agentes del medio ambiente que generalmente ocasionan la disminución en la durabilidad del concreto, requieren que el material sea permeable para poder penetrar a través de la masa del material; estos agentes, son auxiliados para su transporte interno por difusión [85]. Se observa que el diseño M-4 con 15% de grafito presenta la mayor porosidad con valores de 24.8 % este hecho puede afectar su resistencia a la compresión.

**Tabla 4.6.** Porosidad del concreto.

Diseño	a/c	Porosidad (%)
M1-0	0.59	22.00
M2-2.5	0.61	19.30
M3-7.5	0.69	20.80
M4-15	0.81	24.80

#### 4.2.6 Resultado de ensayo a compresión para el concreto con adición de grafito.

En la siguiente Tabla 4.7 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión ( $F'c$ ) promedio, de las 4 calidades de diseño de concreto, y la desviación estándar de cada muestra. El concreto blanco M1-0, se diseñó para una resistencia teórica de 250 kg/cm<sup>2</sup>; en el ensayo experimental a compresión se observó que a los 7 días el espécimen 1, obtuvo una resistencia inicial de 187 kg/cm<sup>2</sup>. Después de 28 días de curado adquirió una resistencia máxima promedio de 258 kg/cm<sup>2</sup> superando el valor de diseño teórico. El segundo diseño M2 con 2.5% de polvo de grafito, se

observa un incremento a los 7 días de curado con valores de 235 kg/cm<sup>2</sup> y 248 kg/cm<sup>2</sup>. Este diseño presenta el mayor incremento inicial comparado con las 3 calidades de diseño; superando a la muestra control. Durante los 28 días de curado, alcanzó una resistencia promedio de 271 kg/cm<sup>2</sup>.

El diseño M3-7.5 y M4-15 con adición de polvo de grafito, se observó en el curado inicial a los 7 días una pequeña variación de F<sup>´</sup>c con valores de 200 kg/cm<sup>2</sup> y 190 kg/cm<sup>2</sup>; alcanzando su máximo valor promedio a los 28 días de 265 kg/cm<sup>2</sup> y 244 kg/cm<sup>2</sup>. El efecto del porcentaje de grafito aumenta su resistencia F<sup>´</sup>c inicial a los 7 días, todos los especímenes superan los valores de diseño teórico.

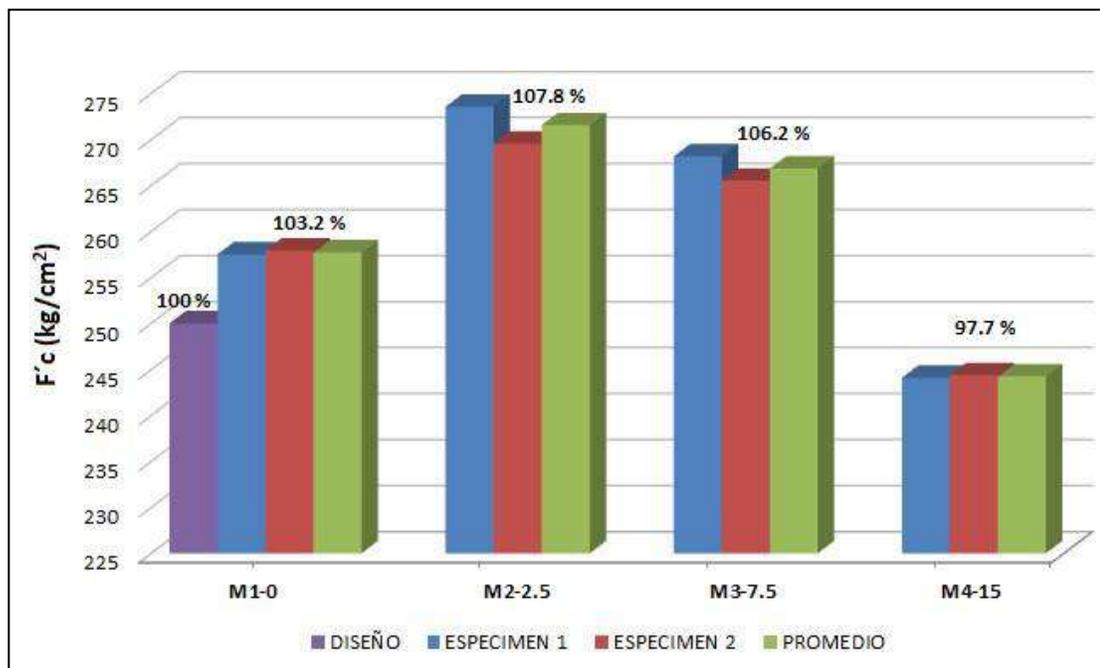
Al final del curado máximo a los 28 días se puede observar que el diseño M2-2.5 mejora la resistencia a la compresión, seguido del diseño M3-7.5. Finalmente, al añadir el 15 % de grafito a la pasta afecta en su resistencia mecánica como se aprecia en los resultados; con valores inferiores al diseño teórico. Este comportamiento se asocia con diversos factores como; fisuras o en su caso al añadir gran cantidad de polvo, aumenta la absorción y la hidratación del concreto se ve afectada [88].

**Tabla 4.7.** Valores del ensayo a compresión para las muestras con adición de polvo de grafito, curado máximo de 28 días.

Especímen	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )						Prom. F <sup>´</sup> c 28 días (Kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. E. 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
	7 DIAS		14 DIAS		28 DIAS			
	1	2	1	2	1	2		
<b>M1-0</b>	187.15	175.92	241.47	230.24	257.50	257.93	257.7	0.22
<b>M2-2.5</b>	235.75	248.26	261.41	273.21	273.56	269.52	271.5	2.02
<b>M3-7.5</b>	199.95	199.91	239.69	243.98	268.14	265.51	266.8	1.32
<b>M4-15</b>	189.69	188.05	221.79	222.41	244.08	244.37	244.2	0.15

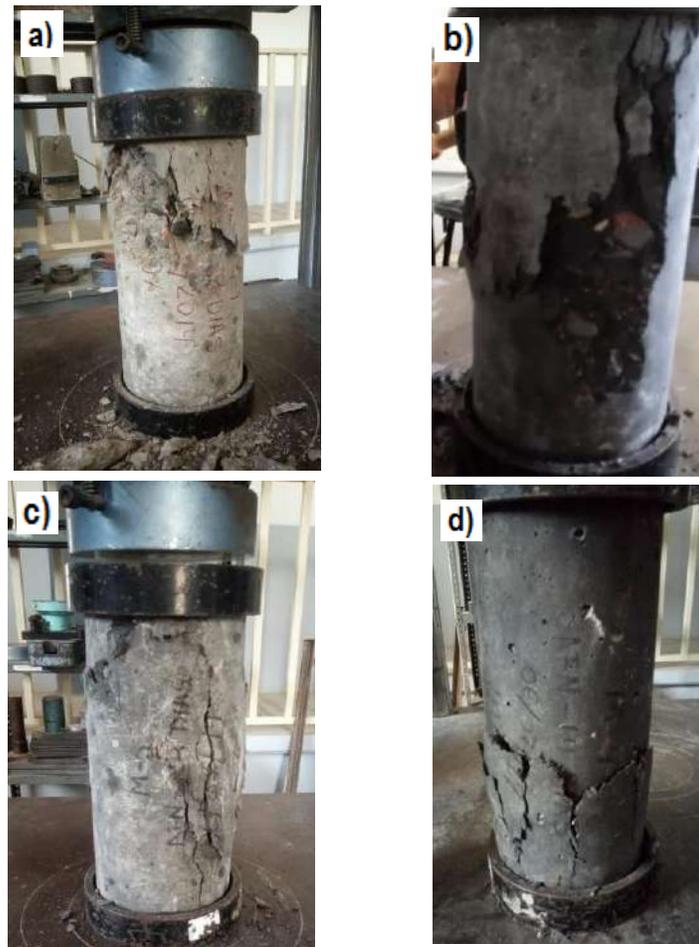
En la Figura 4.5, se observan los resultados de resistencia a la compresión en porcentajes. La muestra control M1-0 el 100% representa el diseño teórico y el 103.2% representa el promedio experimental de los resultados del ensayo a compresión de los cilindros de concreto; se aprecia un aumento del 3.2% con respecto al diseño teórico.

En la muestra M2.-2.5 se visualiza un incremento de 7.8% con respecto a la muestra teórica y un aumento de 4.6% con respecto al resultado de la muestra experimental. Asimismo, este diseño mejora las propiedades mecánicas del concreto. El diseño M3-7.5 se aprecia un porcentaje de 6.2% con respecto a la muestra teórica, y un 3.0% con respecto a la muestra experimental; los valores de  $F'c$  se incrementan en comparación con la muestra control. La muestra M4-15, se puede observar la disminución de la resistencia a la compresión del concreto con valor de 2.3% en comparación con el diseño teórico.



**Figura 4.5.** Gráfica de ensayo a compresión.

#### 4.2.6.1 Fallo por compresión de los especímenes.



**Figura 4.6.** Tipo de ruptura de los especímenes **a)** Probeta con 0% de grafito, curado a 28 días. **b)** Probeta con 2.5% de grafito, curado de 28 días, **c)** Probeta con 7.5% de grafito, curado 28 días, **d)** Probeta con 15% de grafito, curado a 28 días.

En la Figura 4.6 se aprecia un análisis visual de la ruptura de los cilindros de concreto en el ensayo a compresión. El tipo de fallo en los especímenes a) y d) se observa una fisura frágil, se puede ver que se producen esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación (superior e inferior) manteniendo la mitad del cilindro intacto, debido a deficiencias del material de cabeceo o rugosidades del plato de neopreno [33]. En el espécimen b) y c) se observa una fisura diagonal y columnar, con grietas en ambas caras, debido a la concavidad o convexidad del plato de cabeceo [33].

---

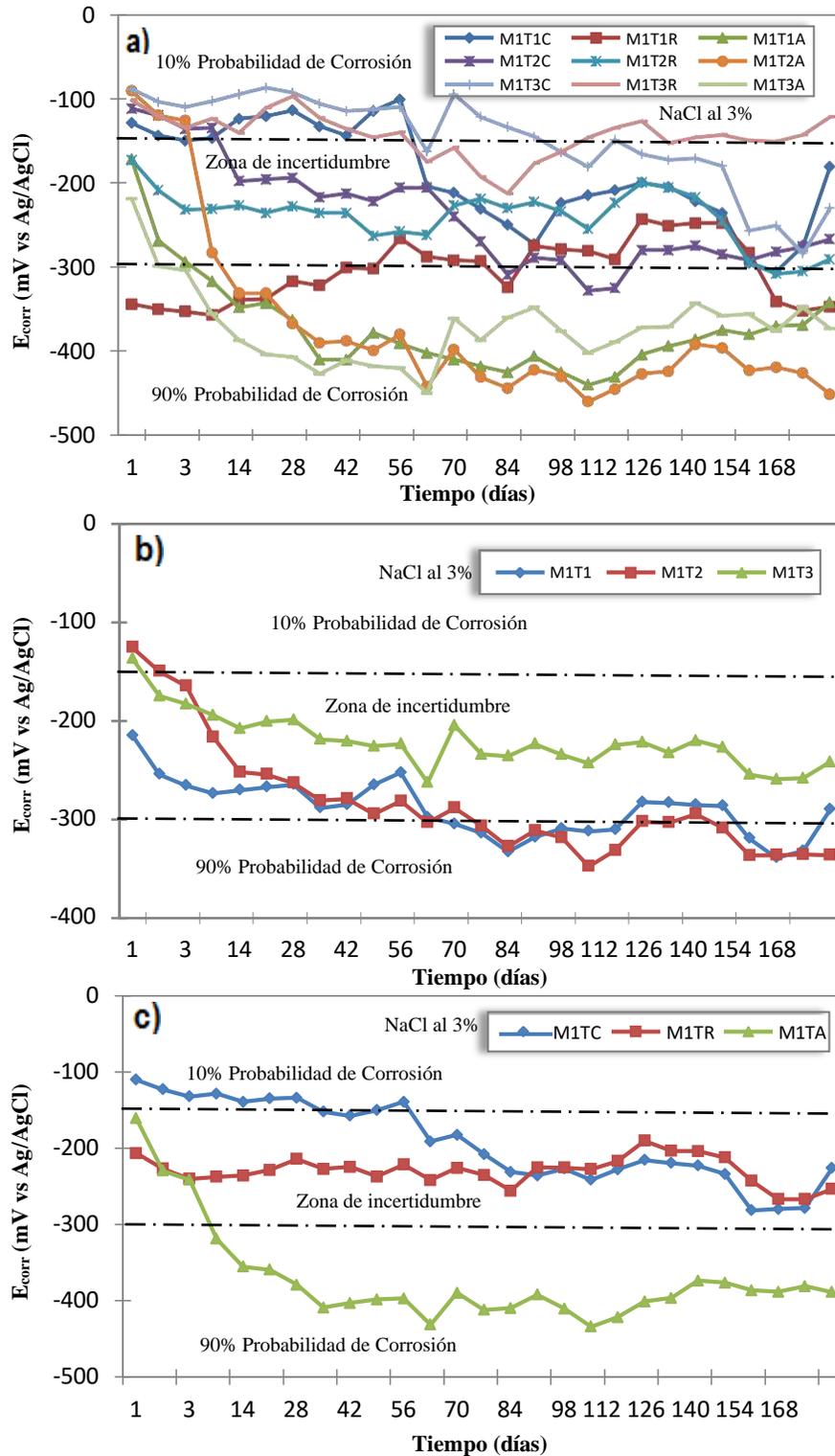
## 4.3 Técnicas electroquímicas

### 4.3.1 Resultado potencial de media celda.

Durante 168 días las muestras estuvieron inmersas en solución salina al 3% de cloruro de sodio, el potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) se midió a partir de un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), los resultados se detallan en la Figura 4.7. En la literatura se reportan valores para concreto simple de -220 mV y -320 mV en la semana 10 al 30 situándose en zona de incertidumbre [89], y valores de entre -200 mV y -350 mV en la semana 22 a 25 entrando en una zona de incertidumbre, estos valores están en conversión con respecto al electrodo de referencia de plata [90].

En la Figura 4.7 a) se aprecian los 9 electrodos de trabajo o barras de acero individuales de cada probeta, se puede ver un descenso considerable del potencial entre los días 14 y 42 del periodo de ensayo. Durante los 168 días de la prueba, la mitad de los electrodos presentan valores más negativos, con valor de entre -300 mV a -450 mV considerando un 90% probabilidad de corrosión. Como se observa; los electrodos de trabajo tienen diferentes variaciones de potencial, a pesar de que estos proceden de la misma mezcla, esto se debe que los iones cloruros viajan a través de los poros de la pasta del concreto [91]. La porosidad del concreto tiene variaciones [85] provocando que los iones formen pequeñas o densas películas de óxido no protector en las barras de acero [92-93].

En la Figura 4.7 b) se observa el promedio de las 3 barras de acero en cada espécimen, se aprecia un descenso en el inicio de los primeros 2 y 7 días entrando a la zona de incertidumbre. Durante los 168 días de exposición al medio salino se observa que el espécimen 2 se ha activado (más negativo) en su potencial de corrosión, al alcanzar valores de -330 mV, con un 90% de probabilidad de corrosión. Los especímenes 1 y 3 se mantienen al límite en la zona de incertidumbre, con valores de entre -250 mV y -300 mV.



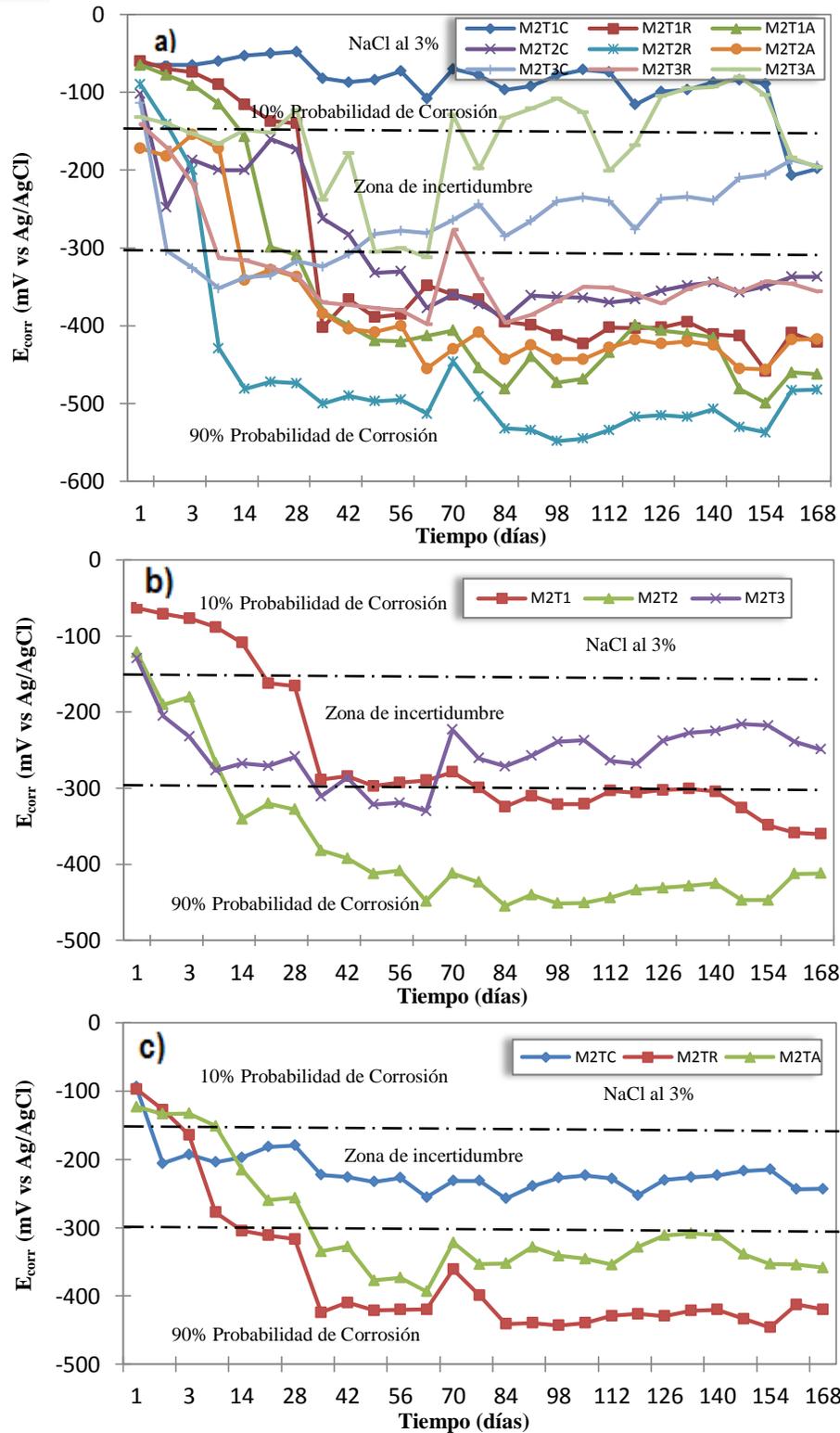
**Figura 4.7.** Potencial de corrosión de la muestra M1 control con 0% de contenido de grafito. **a)** Potencial de media celda de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. **b)** Potencial promedio de las 3 barras de acero, de cada espécimen. **c)** Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo.

En la Figura 4.7 c) se muestra el potencial promedio del acero clasificado por 3 electrodos nominalmente idénticos; de referencia, centro y auxiliar (RE, CE y AE). Se observa un descenso en el inicio de los días 3 y 7, de manera general se aprecia que el día 168 el electrodo auxiliar, es el que adquiere una mayor actividad corrosiva, con valores de -400 mV. Los otros electrodos de centro y de referencia se mantienen en zona de incertidumbre con valores muy similares de entre -250 mV y -260 mV.

➤ **Probetas con 2.5% de grafito**

En la Figura 4.8 se presentan los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) en función del tiempo, para las muestras con contenido de 2.5% de GP. Otros autores reportaron con adición de carbono de alta pureza, a los 70 y 80 días valores de entre -300 mV y -400 mV con respecto a electrodo de referencia calomel [10]; equivalente a -275 mV y -375 mV con referencia al electrodo (Ag/AgCl). Posteriormente, a los 150 y 200 días de exposición reportaron entre -300 mV a -450 mV con relación a electrodo de referencia sulfato de cobre; equivalente a -250 mV y -400 mV con referencia al electrodo (Ag/AgCl) [94]. Los resultados de estas investigaciones se encuentran en una zona de 90% de probabilidad de corrosión.

En la Figura 4.8 a) se observan los potenciales de corrosión individual de cada barra de acero. Se puede ver que en el día 168 de exposición más de la mitad de los electrodos han ingresado en la zona de 90% de probabilidad de corrosión, con valores de entre -350 mV a -500 mV, desarrollando una capa de óxido no protector en el acero. En la Figura 4.8 b) se observa el promedio de los potenciales de corrosión de cada espécimen de concreto. Se muestra el mismo descenso negativo de los potenciales en los primeros días, debido a diferentes factores; la porosidad del concreto y el aumento el contenido de materiales conductores en el concreto. Este hecho debería favorecer a activar la termodinámica de la corrosión.



**Figura 4.8.** Potencial de corrosión de la muestra M2 con 2.5% de contenido de grafito. **a)** Potencial de media celda de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. **b)** Potencial promedio de las 3 barras de acero, de cada espécimen. **c)** Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo.

---

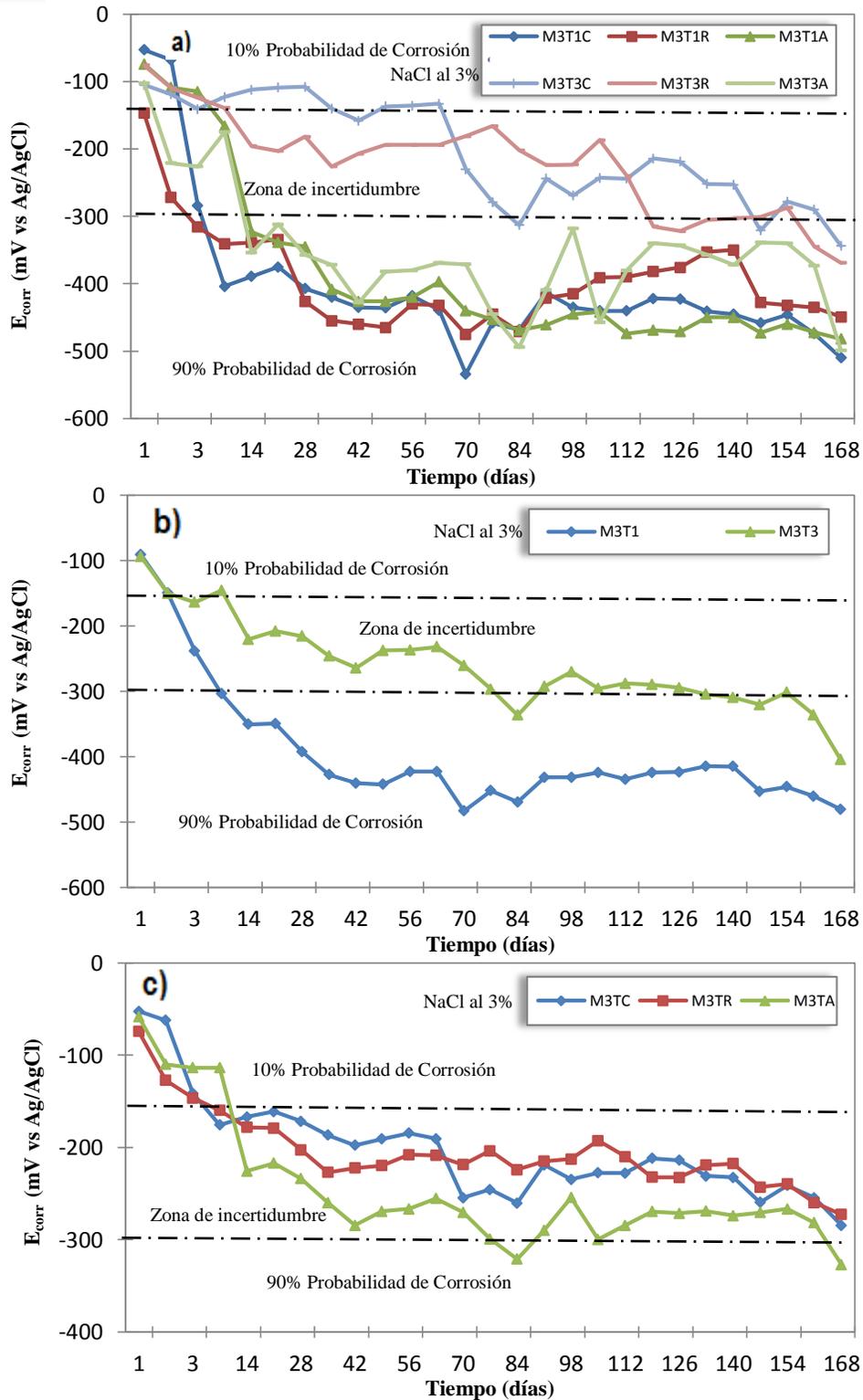
Los iones de cloruro han alcanzado la superficie de acero; en el espécimen 1 y 2. Finalmente, a los 168 días de exposición han alcanzado valores negativos entre -350 mV a -450 mV, asumiendo un 90% la probabilidad de corrosión. El espécimen 3 se encuentra en una zona de incertidumbre con valores de -250 mV.

En la Figura 4.8 c) se presenta el promedio de los potenciales de corrosión de cada electrodo de trabajo. De forma general, se observa que 2 electrodos (de referencia y auxiliar) están en una zona de 90% de probabilidad con valores de -350 mV y -450 mV. El electrodo de centro (C) se encuentra en zona de incertidumbre con valor de - 250 mV.

➤ **Probetas con 7.5% de grafito**

En la Figura 4.9 se puede observar la evolución del potencial de corrosión de la muestra M3 con adición de 7.5 % de grafito con respecto al peso del cemento. Para esta muestra se analizaron 2 probetas, debido a que el tercer espécimen durante el traslado sufrió fisuras. En la Figura 4.9 a), como ha sucedido en las anteriores muestras (M1 y M2); el inicio de los primeros días se presenta una caída de los valores de potencial entre -100 mV a -350 mV, pasando rápidamente a la zona de 90% de probabilidad de corrosión. Al final del día 168 de exposición el 100% de los electrodos se localizan en la zona de 90% de probabilidad de corrosión, debido a que los iones cloruros han penetrado los poros de la matriz de concreto y las barras de acero se encuentran en un estado activo.

En la Figura 4.9 b) se muestra el promedio de cada espécimen, se observa de manera general que los 2 especímenes ingresan en la zona de 90% de probabilidad con valores de -400 mV a -500 mV durante los 168 días de exposición.



**Figura 4.9.** Potencial de media celda de la muestra M3 con 7.5% de contenido de grafito. **a)** Potencial de corrosión de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. **b)** Potencial promedio de las 3 barras de acero, de cada espécimen. **c)** Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo.

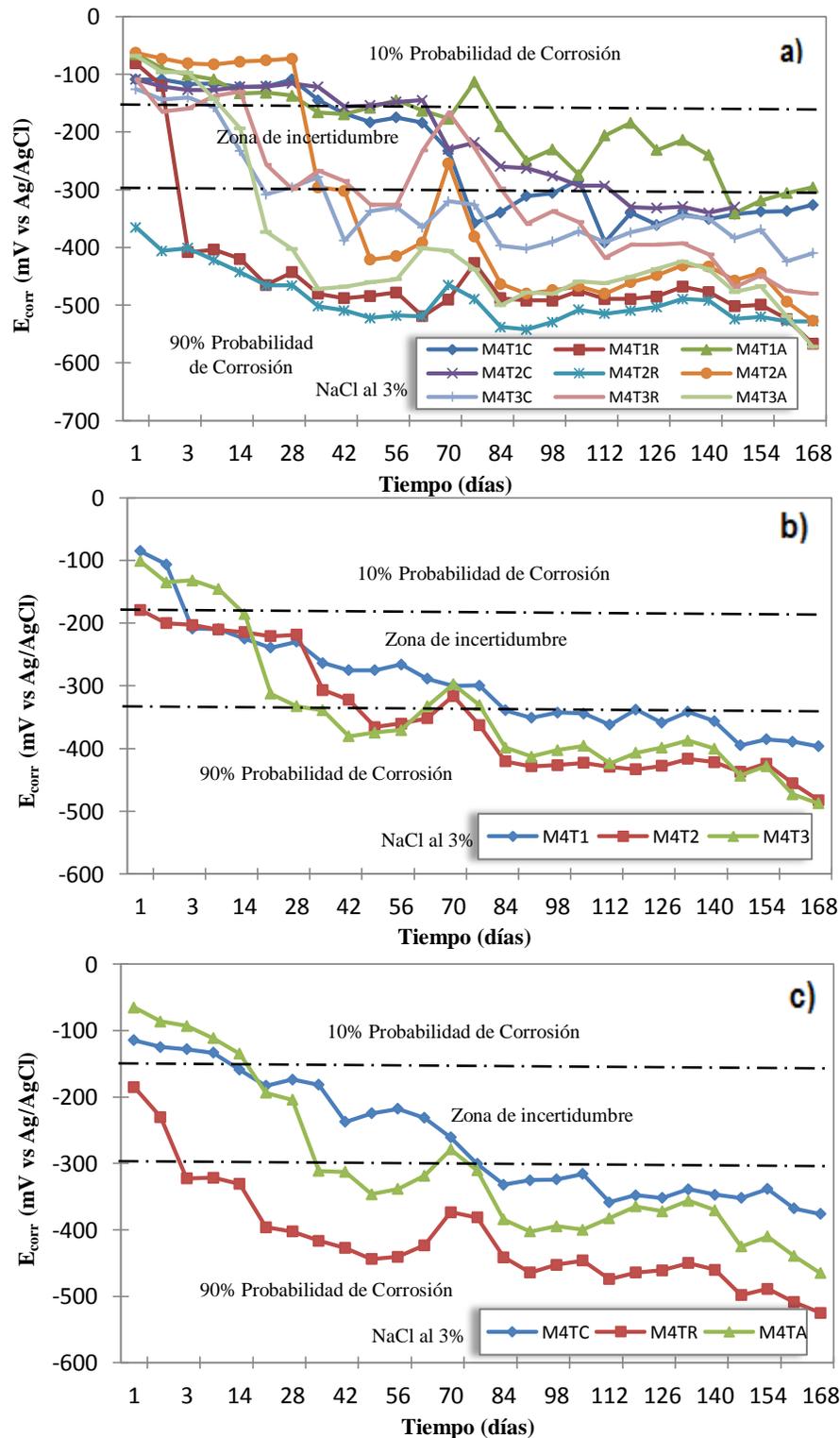
---

En la Figura 4.9 c), se aprecia los promedios de potencial de corrosión de los electrodos, en el transcurso del tiempo de exposición al medio agresivo. A los 168 días de la prueba, el electrodo auxiliar (A) ingresa en el rango de 90% probabilidad de corrosión, los otros dos electrodos de centro (C) y de referencia (R); se encuentran en el límite de la zona de incertidumbre que a futuro pueden ingresar a la zona activa.

➤ **Probetas con 15% de grafito**

En la Figura 4.10 se muestra los valores de potencial de media celda del diseño M4 con 15% de adición de grafito. Se considera que tiene un comportamiento similar con los anteriores diseños, exponiendo una caída de potencial en los primeros días de exposición; con valores de entre -100 mV y -400 mV. Al final del ensayo del día 168, se muestra que todas las barras de acero se encuentran en una zona de 90% de probabilidad de corrosión. Este diseño con mayor porcentaje de grafito muestra los potenciales más negativos llegando hasta los -600 mV; debido a que la adición del grafito afecta el aumento de la porosidad del concreto y la resistividad .

Además, como el grafito y el acero son dos materiales conductores de un potencial diferente; implica que el material menos noble desarrollará niveles de corrosión más altos. Expresado en lo anterior, el material más noble es el grafito y el menos noble es el acero; por causa de la misma, el acero presentará potenciales más negativos. En la Figura 4.10 b), se presenta el promedio de las barras de cada espécimen y 4.10 c), el promedio por clasificación de electrodo de referencia, auxiliar y central. Se observa que todas las barras están en la zona de 90% de probabilidad debido a que el ion cloruro ha penetrado en los poros del concreto.



**Figura 4.10.** Potencial de media celda de muestra M4 con 15% de contenido de grafito. **a)** Potencial de corrosión de las 3 barras individuales de acero en cada espécimen. **b)** Potencial promedio de media celda, de las 3 barras de acero, **c)** Potencial promedio de media celda, clasificado por electrodo.

### 4.3.2 Ruido electroquímico.

La estimación estadística requiere que los métodos sean estacionarios, lo cual no se presenta en la realidad, en consecuencia se tiene que remover la tendencia [95].

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados promedios de la muestra M1-0%, de las desviaciones estándar de ruido en corriente ( $\sigma_i$ ) y ruido en potencial ( $\sigma_v$ ), así como la raíz cuadrática media (irms).

**Tabla 4.8.** Resultado promedio análisis estadístico M1-0%.

DÍAS EN SOLUCION	DESV. POTENCIAL (mV)	DESV. CORRIENTE (mA/cm <sup>2</sup> )	IRMS (mA/cm <sup>2</sup> )
1	2.3720E+01	2.4313E-04	2.5611E-04
2	4.1295E-02	2.4681E-07	2.8651E-07
3	6.8381E+01	3.2090E-04	3.8599E-04
7	6.0343E-02	2.5954E-06	2.6895E-06
14	4.7351E-02	5.9863E-07	7.2477E-06
21	4.2294E-02	1.1157E-06	1.1264E-06
28	2.3830E+02	9.5205E-06	3.7498E-05
35	5.4458E-02	2.6898E-06	4.3222E-06
42	5.1060E-02	8.0444E-07	8.3757E-07
49	7.2126E-01	1.0248E-07	2.2247E-07
56	2.8349E-01	1.4659E-05	1.5736E-05
63	9.3448E-02	2.2318E-06	2.2683E-06
70	4.1007E-02	9.9253E-08	3.9270E-07
77	4.5911E-02	1.1788E-07	1.3012E-07
84	4.6055E-02	1.1341E-06	1.6755E-06
91	1.4250E+00	9.1062E-07	1.4145E-06
98	6.2551E-02	1.7663E-06	2.1430E-06
105	1.1444E+02	3.1187E-05	1.5717E-04
112	1.2315E+02	2.6672E-05	2.5014E-04
119	2.2599E+00	5.5375E-05	1.8085E-04
126	1.2533E-01	1.1979E-06	1.2490E-06
133	7.3196E-01	1.4152E-06	1.4511E-06
140	3.8234E-02	1.1186E-06	1.1598E-06
147	2.8473E-01	5.3651E-06	2.1301E-05
154	5.7416E-01	7.4469E-06	5.6327E-05
161	3.0398E-02	6.6821E-07	6.9970E-07
168	5.1067E-02	1.3675E-06	4.7933E-06

**Tabla 4.9.** Velocidad y tipo de corrosión promedio en la muestra M1-0%

DÍAS EN SOLUCION	Rn ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$I_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (mm/año)	I.L	TIPO DE CORROSIÓN
1	9.7562E+04	3.3825E-07	0.000411	0.9493	LOCALIZADA
2	1.6732E+05	1.9723E-07	0.000240	0.8615	LOCALIZADA
3	2.1309E+05	1.5486E-07	0.000188	0.8314	LOCALIZADA
7	2.3250E+04	1.4194E-06	0.001724	0.9650	LOCALIZADA
14	7.9099E+04	4.1720E-07	0.000507	0.0826	MIXTA
21	3.7909E+04	8.7050E-07	0.001057	0.9905	LOCALIZADA
28	2.5031E+07	1.3184E-09	0.000002	0.2539	LOCALIZADA
35	2.0246E+04	1.6300E-06	0.001980	0.6223	LOCALIZADA
42	6.3473E+04	5.1991E-07	0.000631	0.9604	LOCALIZADA
49	7.0377E+06	4.6890E-09	0.000006	0.4607	LOCALIZADA
56	1.9339E+04	1.7064E-06	0.002073	0.9316	LOCALIZADA
63	4.1870E+04	7.8815E-07	0.000957	0.9839	LOCALIZADA
70	4.1316E+05	7.9872E-08	0.000097	0.2527	LOCALIZADA
77	3.8946E+05	8.4733E-08	0.000103	0.9060	LOCALIZADA
84	4.0610E+04	8.1262E-07	0.000987	0.6769	LOCALIZADA
91	1.5649E+06	2.1087E-08	0.000026	0.6438	LOCALIZADA
98	3.5413E+04	9.3186E-07	0.001132	0.8242	LOCALIZADA
105	3.6693E+06	8.9936E-09	0.000011	0.1984	LOCALIZADA
112	4.6173E+06	7.1471E-09	0.000009	0.1066	LOCALIZADA
119	4.0810E+04	8.0862E-07	0.000982	0.3062	LOCALIZADA
126	1.0463E+05	3.1540E-07	0.000383	0.9591	LOCALIZADA
133	5.1720E+05	6.3805E-08	0.000077	0.9753	LOCALIZADA
140	3.4179E+04	9.6550E-07	0.001173	0.9645	LOCALIZADA
147	5.3071E+04	6.2181E-07	0.000755	0.2519	LOCALIZADA
154	7.7100E+04	4.2801E-07	0.000520	0.1322	LOCALIZADA
161	4.5492E+04	7.2541E-07	0.000881	0.9550	LOCALIZADA
168	3.7343E+04	8.8371E-07	0.001073	0.2853	LOCALIZADA

De la densidad de corriente ( $I_{\text{corr}}$ ) con la siguiente fórmula se puede calcular la velocidad de corrosión ( $V_c$ ) expresada en mm/año.

$$V_c = \frac{[(315)(k)(I_{\text{corr}} (\mu A))]}{(\rho)(A)} = 0.011 * I_{\text{corr}}(\mu A/\text{cm}^2) \quad (24)$$

La magnitud de las fluctuaciones espontaneas de corriente se determinan a partir de  $\sigma_i$ . El  $\sigma_i$  refleja la magnitud de fluctuación de la corriente, a partir de estos valores se puede estimar la actividad corrosiva

---

sobre el acero de refuerzo [96]. En las muestras M1-0%, se observa que tiene valores altos de  $\sigma_i$ , aproximadamente de entre  $1E-04$  mA/cm<sup>2</sup> y  $1E-07$  mA/cm<sup>2</sup>, lo que indica que hay una mayor actividad de corrosión del acero de refuerzo.

En la Tabla 4.9 se observa la resistencia al ruido electroquímico ( $R_n$ ) del promedio de los especímenes de la muestra M1-0, así como los valores de velocidad de corrosión y el tipo de corrosión obtenido. De manera general se aprecian fluctuaciones de ruido similares en los primeras semanas, con valores de  $1E+04$   $\Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+05$   $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , valores menores con respecto a otras investigaciones [97] que reportan de entre  $1E+06$   $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , debido a las diferentes propiedades físicas del cemento y agregados pétreos.

Después de 105 días de exposición se puede observar un incremento en la resistencia al ruido alcanzando valores de  $1E+06$   $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . Al final de los 168 días o 24 semanas de exposición, se aprecia una disminución de la resistencia de  $R_n$  con valores promedios de  $1E+04$   $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . Las propiedades del ruido electroquímico cambiarán con el paso del tiempo cuando la película de corrosión se desarrolle [49], con valores de  $R_n$  menores indican procesos de corrosión alta en el metal con el transcurso del tiempo [96].

La evolución de las velocidades de corrosión en función del tiempo es bajas; pero se observa que el tipo de corrosión promedio, a través del índice de localización es de tipo localizado, debido a que hay elevada velocidad de disolución del metal en lugares discretos de la superficie [98]. Esto hecho, representa un mayor riesgo potencial debido a su difícil detectabilidad, ya que se manifiesta en zonas específicas en el material [99]. Si el tiempo de exposición se prolonga puede acontecer inicio de picado en el metal.

➤ **Probetas con 2.5% de grafito**

En la Tabla 4.10 se calcula los valores de desviación estándar en corriente y en potencial, así como la raíz media cuadrática de la corriente (irms). En la muestra M2 con adición de 2.5 % de grafito, de acuerdo con los resultados de potencial de media celda; esta muestra representa con los 168 días un 90% probabilidad de corrosión, los valores de  $\sigma_i$  al inicio son altos de  $1E-05 \text{ mA/cm}^2$ . Al final de los días 126 y 168 se mantiene un valor constante de  $1E-06 \text{ mA/cm}^2$ , el valor de  $\sigma_i$  es más alto que en la muestra control, este hecho puede indicar una mayor actividad corrosiva.

**Tabla 4.10.** Resultado promedio análisis estadístico M2-2.5%.

DÍAS EN SOLUCION	DESV. POTENCIAL (mV)	DESV. CORRIENTE ( $\text{mA/cm}^2$ )	IRMS ( $\text{mA/cm}^2$ )
1	1.2951E+00	1.8402E-05	1.9558E-05
2	2.2689E+00	1.7445E-05	1.7468E-05
3	5.2164E-01	2.7320E-06	3.8388E-06
7	3.5745E-02	2.9759E-06	3.2445E-06
14	4.1515E-02	5.4244E-06	5.8667E-06
21	4.2841E-01	5.5303E-06	5.9490E-06
28	3.2886E-01	1.7055E-05	1.7229E-05
35	4.5669E-02	4.5602E-06	5.0756E-06
42	5.8222E+00	4.9024E-05	4.9180E-05
49	5.9929E+00	3.7662E-05	3.7941E-05
56	5.2465E-01	8.7214E-06	9.1978E-06
63	5.9645E+00	1.0080E-04	1.0367E-04
70	8.7386E-01	4.1038E-05	4.1097E-05
77	3.4426E-02	5.4591E-06	6.0003E-06
84	3.6470E-02	2.8792E-06	3.2656E-06
91	4.7886E-02	4.7993E-06	5.3059E-06
98	4.5799E-02	4.4325E-06	5.0392E-06
105	3.1052E+00	3.2990E-06	2.8027E-05
112	2.9374E+00	3.9151E-05	1.4840E-04
119	4.3675E+00	9.9609E-05	1.9608E-04
126	1.9381E-02	4.9270E-06	5.5873E-06
133	2.2958E-01	5.0707E-06	5.7612E-06
140	1.2583E-01	5.9332E-06	6.6548E-06
147	1.9991E-02	6.4481E-06	7.1414E-06
154	2.9085E-01	5.2380E-06	5.8733E-06
161	1.8476E-02	4.3725E-06	4.9466E-06
168	2.5806E-02	2.4845E-06	2.8195E-06

**Tabla 4.11.** Velocidad y tipo de corrosión en la muestra M2-2.5%.

DÍAS EN SOLUCION	Rn ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	I <sub>corr</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (mm/año)	I.L	TIPO DE CORROSIÓN
1	7.0377E+04	6.2521E-07	0.00076	0.9409	LOCALIZADA
2	1.3006E+05	3.3831E-07	0.00041	0.9987	LOCALIZADA
3	1.9094E+05	2.3044E-07	0.00028	0.7117	LOCALIZADA
7	1.2011E+04	3.6632E-06	0.00445	0.9172	LOCALIZADA
14	7.6535E+03	5.7490E-06	0.00698	0.9246	LOCALIZADA
21	7.7466E+04	5.6799E-07	0.00069	0.9296	LOCALIZADA
28	1.9283E+04	2.2818E-06	0.00277	0.9899	LOCALIZADA
35	1.0015E+04	4.3936E-06	0.00534	0.8985	LOCALIZADA
42	1.1876E+05	3.7049E-07	0.00045	0.9968	LOCALIZADA
49	1.5912E+05	2.7652E-07	0.00034	0.9926	LOCALIZADA
56	6.0157E+04	7.3142E-07	0.00089	0.9482	LOCALIZADA
63	5.9171E+04	7.4360E-07	0.00090	0.9723	LOCALIZADA
70	2.1294E+04	2.0663E-06	0.00251	0.9985	LOCALIZADA
77	6.3061E+03	6.9774E-06	0.00847	0.9098	LOCALIZADA
84	1.2667E+04	3.4737E-06	0.00422	0.8817	LOCALIZADA
91	9.9778E+03	4.4098E-06	0.00536	0.9045	LOCALIZADA
98	1.0333E+04	4.2584E-06	0.00517	0.8796	LOCALIZADA
105	9.4126E+05	4.6746E-08	0.00006	0.1177	LOCALIZADA
112	7.5027E+04	5.8646E-07	0.00071	0.2638	LOCALIZADA
119	4.3847E+04	1.0035E-06	0.00122	0.5080	LOCALIZADA
126	3.9336E+03	1.1186E-05	0.01359	0.8818	LOCALIZADA
133	4.5275E+04	9.7184E-07	0.00118	0.8801	LOCALIZADA
140	2.1207E+04	2.0747E-06	0.00252	0.8916	LOCALIZADA
147	3.1003E+03	1.4192E-05	0.01724	0.9029	LOCALIZADA
154	5.5528E+04	7.9240E-07	0.00096	0.8918	LOCALIZADA
161	4.2254E+03	1.0413E-05	0.01265	0.8840	LOCALIZADA
168	1.0386E+04	4.2363E-06	0.00515	0.8812	LOCALIZADA

En la Tabla 4.11 se aprecia la evolución de la resistencia al ruido electroquímico ( $R_n$ ), en los primeros 1 a 7 días de exposición; se observan valores bajos entre  $1\text{E}+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1\text{E}+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$  muy similar a los valores de la muestra control. Durante el avance del tiempo; los valores de  $R_n$  se mantienen constantes de entre  $1\text{E}+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$  indicando proceso de corrosión alta.

Las velocidades de corrosión son bajas con respecto al tiempo, pero se aprecia que el índice de localización presenta valores altos en los

últimos días de exposición entre 0.88 y 0.90. Este valor presenta tipo de corrosión localizada, lo cual sufre de un ataque más localizado debido a rompimientos de la capa de óxido pasivante [97].

➤ **Probetas con 7.5% de grafito**

En la Tabla 4.12 se observan los valores de desviación estándar en potencial y corriente; se aprecia la evolución de la densidad de corriente en función del tiempo, al inicio de exposición se presentan valores altos de  $\sigma$  entre  $1E-05$  mA/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 4.12.** Resultado análisis estadístico en la muestra M3-7.5%.

DÍAS EN SOLUCIÓN	DESV. POTENCIAL (mV)	DESV. CORRIENTE (mA/cm <sup>2</sup> )	IRMS (mA/cm <sup>2</sup> )
1	2.9228E-01	2.2762E-05	2.2946E-05
2	5.0754E-01	4.0312E-05	4.1351E-05
3	2.0852E+02	3.9465E-05	2.0831E-04
7	7.3884E-02	2.0701E-06	2.2205E-06
14	1.0020E+00	1.9706E-05	1.9728E-05
21	1.1092E+01	3.4518E-05	3.7107E-05
28	2.8047E+00	1.1584E-04	1.2724E-04
35	3.5224E-01	1.9835E-06	2.1337E-06
42	4.7435E-02	2.7854E-06	2.9327E-06
49	7.7346E-02	3.0801E-06	3.2579E-06
56	2.0756E+02	4.1127E-07	4.6978E-07
63	5.4189E-02	1.1945E-06	1.3420E-06
70	5.8919E-02	2.3936E-06	2.6712E-06
77	3.2343E-02	1.9761E-06	2.8826E-06
84	5.2561E-02	9.5313E-07	1.0484E-06
91	9.6690E-02	9.2806E-07	9.8168E-07
98	2.3705E+02	1.6525E-04	4.3161E-04
105	4.2489E-02	5.8581E-06	7.4445E-06
112	1.0796E+00	9.9517E-05	3.1316E-04
119	3.8364E+00	8.3903E-05	2.5554E-04
126	2.3144E-02	3.5606E-06	3.8995E-06
133	5.3692E-02	2.4033E-06	2.8790E-06
140	3.1000E-02	3.1412E-06	3.6234E-06
147	5.0179E-02	8.8671E-07	1.0294E-06
154	2.7014E-01	1.1893E-06	1.2544E-06
161	4.8908E-02	1.1138E-06	1.3500E-06
168	4.7134E-02	2.3852E-06	2.7700E-06

**Tabla 4.13.** Velocidad y tipo de corrosión de la muestra M3-7.5%.

DÍAS EN SOLUCIÓN	Rn ( $\Omega$ -cm <sup>2</sup> )	Icorr (A/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (mm/año)	I.L	TIPO DE CORROSIÓN
1	1.2841E+04	2.7257E-06	0.0033105	0.9920	LOCALIZADA
2	1.2590E+04	2.7799E-06	0.0033763	0.9749	LOCALIZADA
3	5.2835E+06	6.6244E-09	0.0000080	0.1895	LOCALIZADA
7	3.5691E+04	9.8064E-07	0.0011910	0.9323	LOCALIZADA
14	5.0848E+04	6.8833E-07	0.0008360	0.9989	LOCALIZADA
21	3.2134E+05	1.0892E-07	0.0001323	0.9302	LOCALIZADA
28	2.4212E+04	1.4456E-06	0.0017557	0.9104	LOCALIZADA
35	1.7758E+05	1.9709E-07	0.0002394	0.9296	LOCALIZADA
42	1.7030E+04	2.0552E-06	0.0024961	0.9498	LOCALIZADA
49	2.5112E+04	1.3938E-06	0.0016928	0.9454	LOCALIZADA
56	5.0469E+08	6.9349E-11	0.0000001	0.8754	LOCALIZADA
63	4.5365E+04	7.7153E-07	0.0009370	0.8901	LOCALIZADA
70	2.4616E+04	1.4219E-06	0.0017269	0.8961	LOCALIZADA
77	1.6368E+04	2.1384E-06	0.0025971	0.6855	LOCALIZADA
84	5.5146E+04	6.3468E-07	0.0007708	0.9091	LOCALIZADA
91	1.0418E+05	3.3594E-07	0.0004080	0.9454	LOCALIZADA
98	1.4345E+06	2.4399E-08	0.0000296	0.3829	LOCALIZADA
105	7.2531E+03	4.8255E-06	0.0058608	0.7869	LOCALIZADA
112	1.0848E+04	3.2264E-06	0.0039185	0.3178	LOCALIZADA
119	4.5725E+04	7.6545E-07	0.0009297	0.3283	LOCALIZADA
126	6.5000E+03	5.3846E-06	0.0065397	0.9131	LOCALIZADA
133	2.2341E+04	1.5666E-06	0.0019027	0.8348	LOCALIZADA
140	9.8686E+03	3.5466E-06	0.0043074	0.8669	LOCALIZADA
147	5.6590E+04	6.1849E-07	0.0007512	0.8614	LOCALIZADA
154	2.2714E+05	1.5409E-07	0.0001872	0.9481	LOCALIZADA
161	4.3912E+04	7.9704E-07	0.0009680	0.8250	LOCALIZADA
168	1.9761E+04	1.7712E-06	0.0021511	0.8611	LOCALIZADA

Durante los días 84, se aprecia un descenso de  $\sigma_i$ , con valor de  $1E-07$  mA/cm<sup>2</sup>; manteniendo el proceso de pasivación en el metal por la formación de película de óxido. Finalmente, en los días 168 se presenta un descenso de valores de  $\sigma_i$  de  $1E-06$  mA/cm<sup>2</sup>, debido al alto contenido de grafito afectando las propiedades electroquímicas.

En la Tabla 4.13 se observan los valores de  $R_n$ , de forma general se aprecian valores bajos de entre  $1E+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , estos valores son muy similares a los de la muestra M2-2.5; puede indicar una mayor

interacción de iones cloruros en el metal. Se muestra que la evolución de las velocidades de corrosión son bajas en función del tiempo, pero en los valores de índice de localización son altos de entre 0.80 y 0.90, presentando corrosión de tipo localizada.

➤ **Probetas con 15% de grafito**

En la Tabla 4.14, se aprecian los resultados promedio de la muestra M4-15%. Los valores de  $\sigma_i$  fluctúan entre  $1E-04$  mA/cm<sup>2</sup> y  $1E-06$  mA/cm<sup>2</sup>, son muy similar que en las muestras M2-2.5% y M3-7.5%. Para el día 70 al 168 de ensayo; se presentaron valores de  $\sigma_i$  cerca de  $1E-06$  mA/cm<sup>2</sup>, indicando una alta actividad corrosiva, este valor son similares reportados por autores [96] entre  $1E-05$  mA/cm<sup>2</sup> y  $1E-07$  mA/cm<sup>2</sup>.

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados del análisis estadístico de  $R_n$ , se observa de forma general la evolución de las fluctuaciones del ruido en función del tiempo. Al inicio del ensayo se considera bajos valores de entre  $1E+04$   $\Omega$ \*cm<sup>2</sup> y  $1E+05$   $\Omega$ \*cm<sup>2</sup>. Durante día 77 y 91 se observa un descenso en el  $R_n$ , de  $1E+03$   $\Omega$ \*cm<sup>2</sup>, este resultado es el más bajo comparado con la muestra M2-2.5% y M3-7.5%, puede indicar que esta muestra presenta corrosiones más severas en las barras de acero. Este hecho puede suceder por el aumento de la porosidad de la matriz del concreto y la diferencia de potencial del grafito/acero.

La mezcla presentó elevados valores de  $R_n$ , en consecuencia cuanto mayor es la porosidad del concreto mayor es la cantidad de cloruros que llegan a la superficie del acero; afectando la capa protectora de óxidos  $Fe_3O_4$  (óxido ferroso férrico) y  $Fe_2O_3$  (óxido férrico) [3].

Las velocidades de corrosión al inicio de los días comparada con las muestras M1-0, M2-2.5 y M3-7.5 son bajas, pero se observa que durante el final del ensayo específicamente el día 161 y 168 tiene un aumento en la velocidad con valores de entre 0.0128 mm/año y 0.0106 mm/año.

**Tabla 4.14.** Análisis estadístico promedio de la muestra M4-15 %.

DIAS EN SOLUCION	DESV. POTENCIAL (mV)	DESV. CORRIENTE (mA/cm <sup>2</sup> )	IRMS (mA/cm <sup>2</sup> )
1	4.1923E+00	5.3226E-05	5.3490E-05
2	2.2704E+00	4.8957E-05	1.6321E-04
3	9.2461E+01	3.1976E-04	2.7385E-03
7	5.0714E-01	1.4474E-05	2.1902E-05
14	3.3976E+00	7.9410E-05	1.6577E-04
21	9.8081E+00	4.6571E-04	1.5754E-03
28	1.9228E+00	8.4986E-05	1.3949E-04
35	4.2197E-01	2.5995E-05	3.9402E-05
42	3.3270E-02	6.0156E-06	9.7237E-06
49	2.2381E+00	1.6559E-04	2.4987E-04
56	1.4792E+00	3.3515E-05	5.0970E-05
63	1.2397E-01	1.7864E-05	2.7877E-05
70	1.0166E-01	5.4799E-06	1.0164E-05
77	3.1070E-02	4.6179E-06	4.9257E-06
84	3.1400E-02	6.4247E-06	1.0644E-05
91	5.0050E-02	8.0211E-06	1.3121E-05
98	3.5766E-02	3.3900E-06	6.4381E-06
105	3.8377E-02	5.4589E-06	9.0981E-06
112	3.9350E+00	9.9865E-05	6.6596E-04
119	4.4335E+00	9.9903E-05	6.7200E-04
126	2.7683E-01	5.6426E-06	9.3301E-06
133	2.3162E-02	4.9442E-06	1.2731E-05
140	2.0861E-02	5.0027E-06	1.4047E-05
147	9.6288E-02	8.1902E-06	1.3321E-05
154	1.9352E-01	8.7949E-06	1.4347E-05
161	2.1761E-02	6.0684E-06	1.0145E-05
168	2.2416E-02	5.1628E-06	8.8062E-06

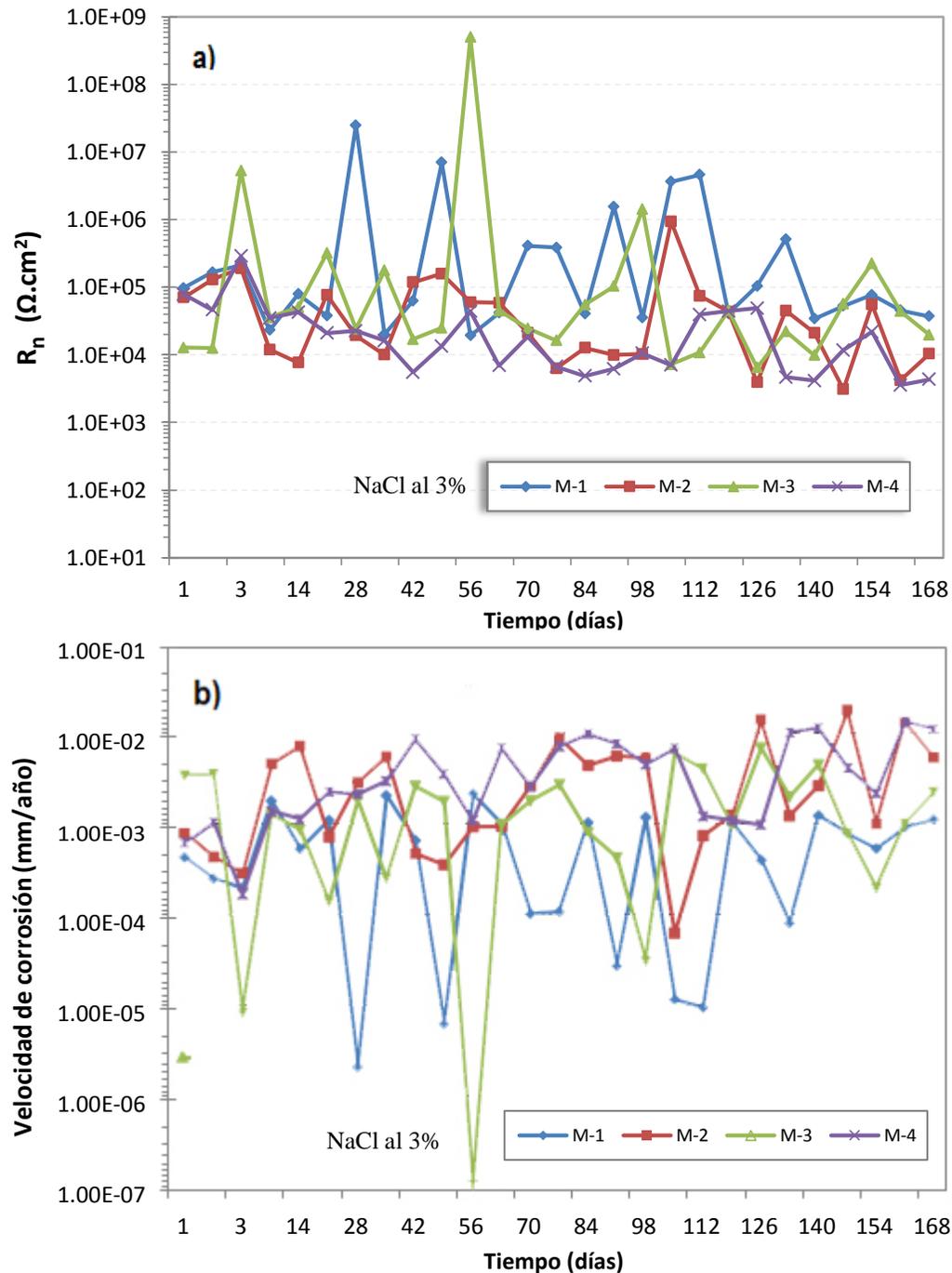
En el tipo de corrosión se puede observar de tipo localizada, lo que indica que la pasivación se pierde solamente en pequeñas áreas de la superficie, produciéndose una reducción local importante de la sección de la armadura [100].

**Tabla 4.15.** Resultado de  $R_n$ , velocidad y tipo de corrosión en la muestra M4-15%.

DIAS EN SOLUCION	$R_n$ ( $\Omega$ -cm <sup>2</sup> )	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (mm/año)	I.L	TIPO DE CORROSIÓN
1	7.8763E+04	4.8246E-07	0.00059	0.9951	LOCALIZADA
2	4.6376E+04	8.1939E-07	0.00100	0.3000	LOCALIZADA
3	2.8916E+05	1.3142E-07	0.00016	0.1168	LOCALIZADA
7	3.5038E+04	1.0845E-06	0.00132	0.6609	LOCALIZADA
14	4.2786E+04	8.8814E-07	0.00108	0.4790	LOCALIZADA
21	2.1060E+04	1.8043E-06	0.00219	0.2956	LOCALIZADA
28	2.2625E+04	1.6796E-06	0.00204	0.6093	LOCALIZADA
35	1.6233E+04	2.3409E-06	0.00284	0.6597	LOCALIZADA
42	5.5306E+03	6.8709E-06	0.00834	0.6187	LOCALIZADA
49	1.3515E+04	2.8116E-06	0.00341	0.6627	LOCALIZADA
56	4.4135E+04	8.6099E-07	0.00105	0.6575	LOCALIZADA
63	6.9394E+03	5.4760E-06	0.00665	0.6408	LOCALIZADA
70	1.8550E+04	2.0485E-06	0.00249	0.5391	LOCALIZADA
77	6.7281E+03	5.6479E-06	0.00686	0.9999	LOCALIZADA
84	4.8873E+03	7.7752E-06	0.00944	0.6036	LOCALIZADA
91	6.2398E+03	6.0899E-06	0.00740	0.6113	LOCALIZADA
98	1.0551E+04	3.6017E-06	0.00437	0.5265	LOCALIZADA
105	7.0301E+03	5.4053E-06	0.00656	0.6000	LOCALIZADA
112	3.9403E+04	9.6439E-07	0.00117	0.1500	LOCALIZADA
119	4.4378E+04	8.5628E-07	0.00104	0.1487	LOCALIZADA
126	4.9060E+04	7.7456E-07	0.00094	0.6048	LOCALIZADA
133	4.6846E+03	8.1116E-06	0.00985	0.3884	LOCALIZADA
140	4.1700E+03	9.1128E-06	0.01107	0.3561	LOCALIZADA
147	1.1757E+04	3.2323E-06	0.00393	0.6148	LOCALIZADA
154	2.2003E+04	1.7270E-06	0.00210	0.6130	LOCALIZADA
161	3.5859E+03	1.0597E-05	0.01287	0.5981	LOCALIZADA
168	4.3420E+03	8.7518E-06	0.01063	0.5863	LOCALIZADA

En la figura 4.11 a), se puede observar la gráfica general del promedio de las fluctuaciones de  $R_n$ . La muestra que presenta mayor resistencia al ruido, es la muestra control M1-0; se demuestra que la adición del grafito afecta a las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo en el concreto; debido a que rompen los productos de corrosión del hierro (capas de óxidos). Con el avance del tiempo los iones cloruros empiezan a despasivar el acero iniciando en todas las muestras corrosión de tipo localizada.

En la Figura 4.11 b) se observa los resultados de la velocidad de corrosión; las dos gráficas presentan el mismo comportamiento debido a que es inversamente proporcional a  $R_n$ . Se aprecia que el aumento en la resistencia de ruido electroquímico hay una menor velocidad de corrosión en el metal.



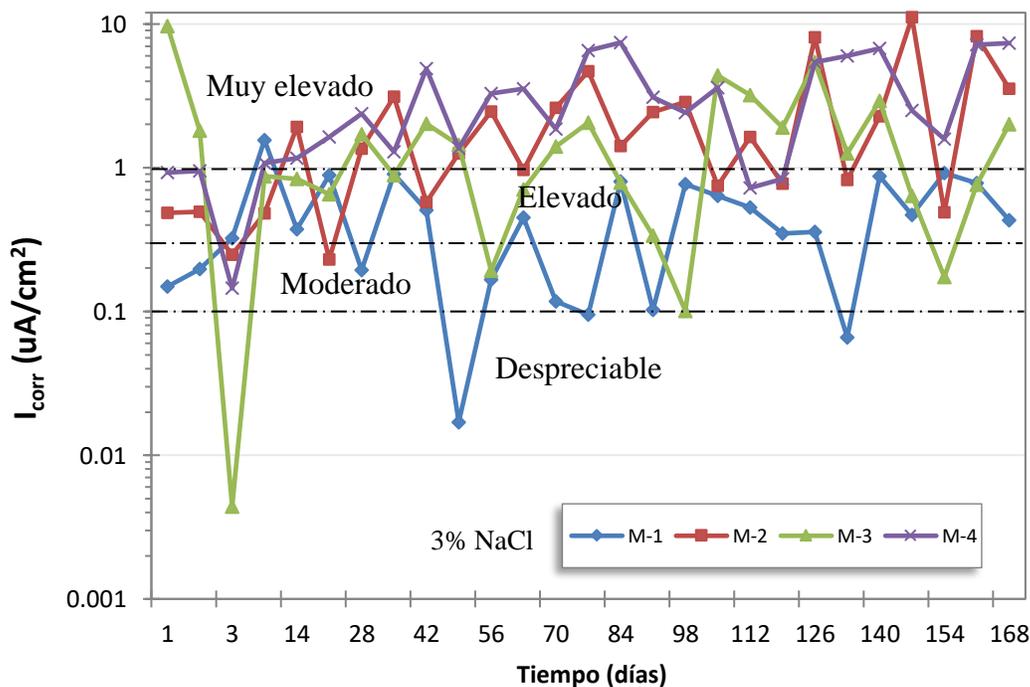
**Figura 4.11.** Resultado promedio de las 4 muestras de concreto **a)** Ruido electroquímico **b)** velocidad de corrosión.

De acuerdo a los rangos de valores de red durar [101], se puede determinar la vida útil de concreto reforzado a partir de la densidad corriente ( $i_{corr}$ ); de acuerdo a los datos establecidos en la Tabla 4.16:

**Tabla 4.16.** Nivel de vida útil en el sistema acero/concreto.

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevado
> 1	Muy Elevado

En los resultados mostrados en la Figura 4.12 se puede ver que la muestra control M1-0 al final de la prueba, mostró nivel de corrosión elevado con valores de  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  -  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Demostrando en las técnicas de MEB y DRX la presencia de cloruros en el interior de la matriz del concreto, por contaminación de los agregados. La muestra del diseño control presentó bajos valores de  $i_{corr}$  comparado con los diseños M2, M3 y M4; todas las muestras presentan nivel de corrosión entre elevado y muy elevado.



**Figura 4.12.** Grafica de  $i_{corr}$ , para estimación de vida útil del concreto reforzado.

---

En la muestra M3 con 7.5 % de adición de grafito, se observa fluctuaciones altas y bajas en el transcurso de los días de exposición, indicativo de la corrosión localizada. Se puede ver un comportamiento en los picos de las densidades de corrosión ( $i_{corr}$ ) similar a la muestra control M1. Durante el día 3 de exposición al medio salino se muestra un descenso considerable de los valores de  $i_{corr}$ , debido a la pasivación del metal. Después de los 168 días presenta corrosión entre elevado y muy elevado.

La muestra M4 con 15% de adición de grafito, se puede ver un valor muy alto de  $i_{corr}$  desde el inicio de exposición y se incrementó conforme transcurrió el tiempo. Se localiza con valores muy elevados de corrosión superiores a  $1 \mu A/cm^2$ , valores similares son reportados en investigaciones con diferentes concentraciones de carbono [10].

#### **4.3.3 Resistencia a la polarización lineal.**

Se realizó el ensayo de las curvas de polarización, lo cual nos permite obtener las pendientes anódicas y catódicas de Tafel. En la Tabla 4.17 se muestra el cálculo para el valor de la constante B, conforme a la ecuación 12. En la literatura se presentan valores posibles de B para la aplicación en el concreto; en la mayoría de los casos están comprendidos entre 0.013 V y 0.052 V [53]. Se calcularon los valores promedio de la constante B, y el resultado se utilizó para calcular la  $i_{corr}$  de las pruebas de ruido electroquímico ( $R_n$ ) y el ensayo a la resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ).

Los resultados obtenidos para la constante B son aceptables; con valores de entre 29 mV y 51 mV.

**Tabla 4.17.** Pendientes anódica y catódica de Tafel.

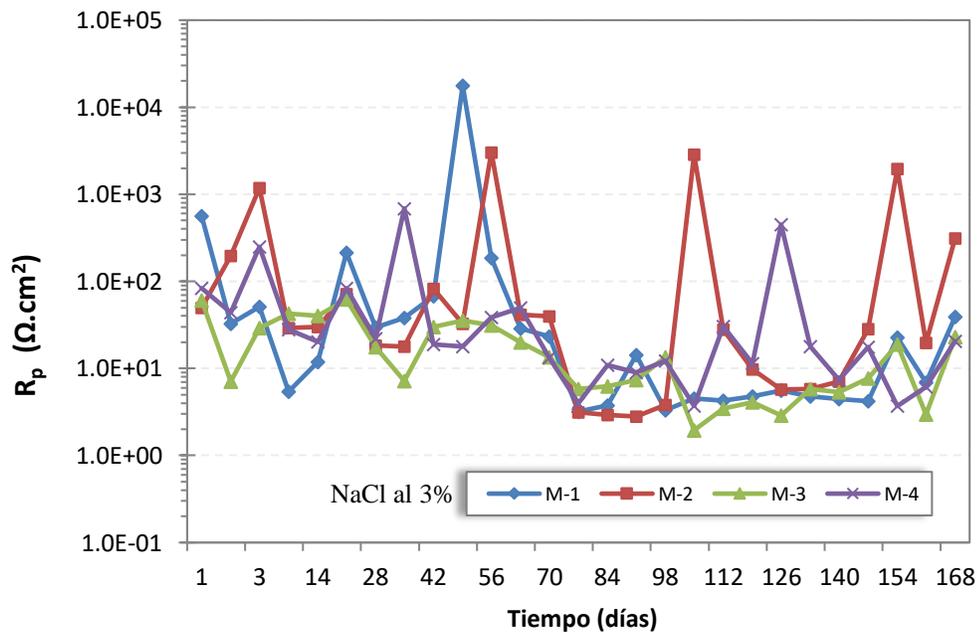
Probetas	ba (mV)	bc (mV)	B (mV)	Promedio (mV)
M1T1	1964.63	91.31	38	32
M1T2	609.53	79.22	30	
M1T3	637.40	74.74	29	
M2T1	1021.86	111.76	44	44
M2T2	1566.06	94.42	39	
M2T3	826.90	128.07	48	
M3T1	620.25	95.48	36	35
M3T2	958.47	93.46	37	
M3T3	638.37	85.90	33	
M4T1	843.16	81.91	32	39
M4T2	504.05	85.92	32	
M4T3	496.69	155.00	51	

En la Figura 4.13 se observan los valores de R.P.L promedio de las 4 muestras de concreto. Al inicio del día 1 y 3 de exposición se aprecia valores bajos de resistencia a la polarización en la muestra M1 de entre  $1E+01 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Estos valores son bajos comparados a otros autores que reportan valores de rango  $1E+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$  para exposición en cloruros en el concreto [90-102]. Durante los días 42 y 70 se presenta un incremento en la  $R_p$  de las muestras M1 y M2, lo que indica que mayor resistencia a la polarización menor velocidad de corrosión. Otros autores indican que valores de resistencia tan elevados son un indicativo de que el acero esta pasivo [90].

Finalmente, se observa que la muestra M2 en el transcurso del tiempo de exposición en ambiente salino, presentan fluctuaciones bajas y altas con valores entre  $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+01 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Este hecho puede indicar que el acero se encuentra en estado muy activo y el aumento de  $R_p$ , tiende a comportarse en estado pasivo, existe una repasivación en el metal.

En la muestra M3, se observa un descenso en la  $R_p$  en el día 70 y 98 con valores de  $1E+01 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , la resistencia de polarización es muy baja, lo que indica que el acero de refuerzo está altamente activo y existe mayor indicio de corrosión. Al final del día 168 de exposición el  $R_p$ , se aprecia un ligero aumento de valores  $1E+01 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , pero se encuentra con valores muy bajos de  $R_p$ , este hecho demuestra que el acero tiene altos niveles de corrosión localizado.

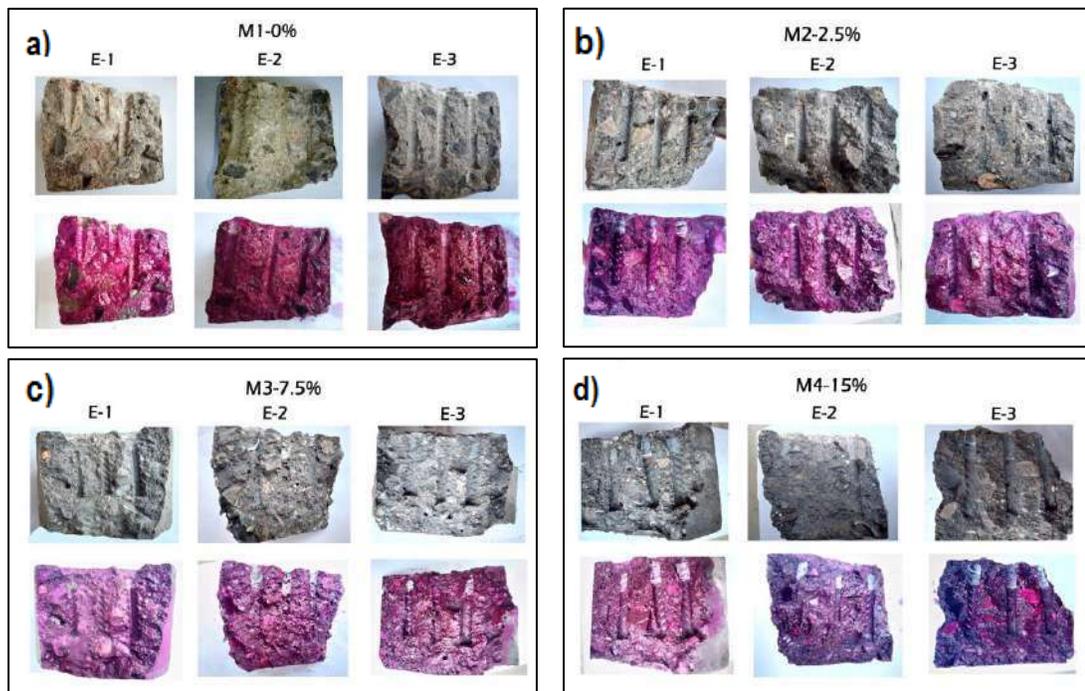
La muestra M4, tiene un comportamiento similar a la muestra M3 durante los días de exposición con valores de entre  $1E+02 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y  $1E+01 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Todas la muestras presentan  $R_p$  muy bajos; esta técnica es inclusiva que globaliza toda todas las contribuciones resistivas y no alcanza a discriminarlas [103]. Esto quiere decir que no detecta el tipo de corrosión y complementando con los resultados de  $R_n$ , se observa que todas las probetas tienen corrosión localizada. En consecuencia, al tener resistencias de  $R_n$  y  $R_p$  muy bajas conseguimos densidades de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) muy altos, cuando el tipo de corrosión es localizado.



**Figura 4.13.** Grafica del ensayo resistencia a la polarización lineal.

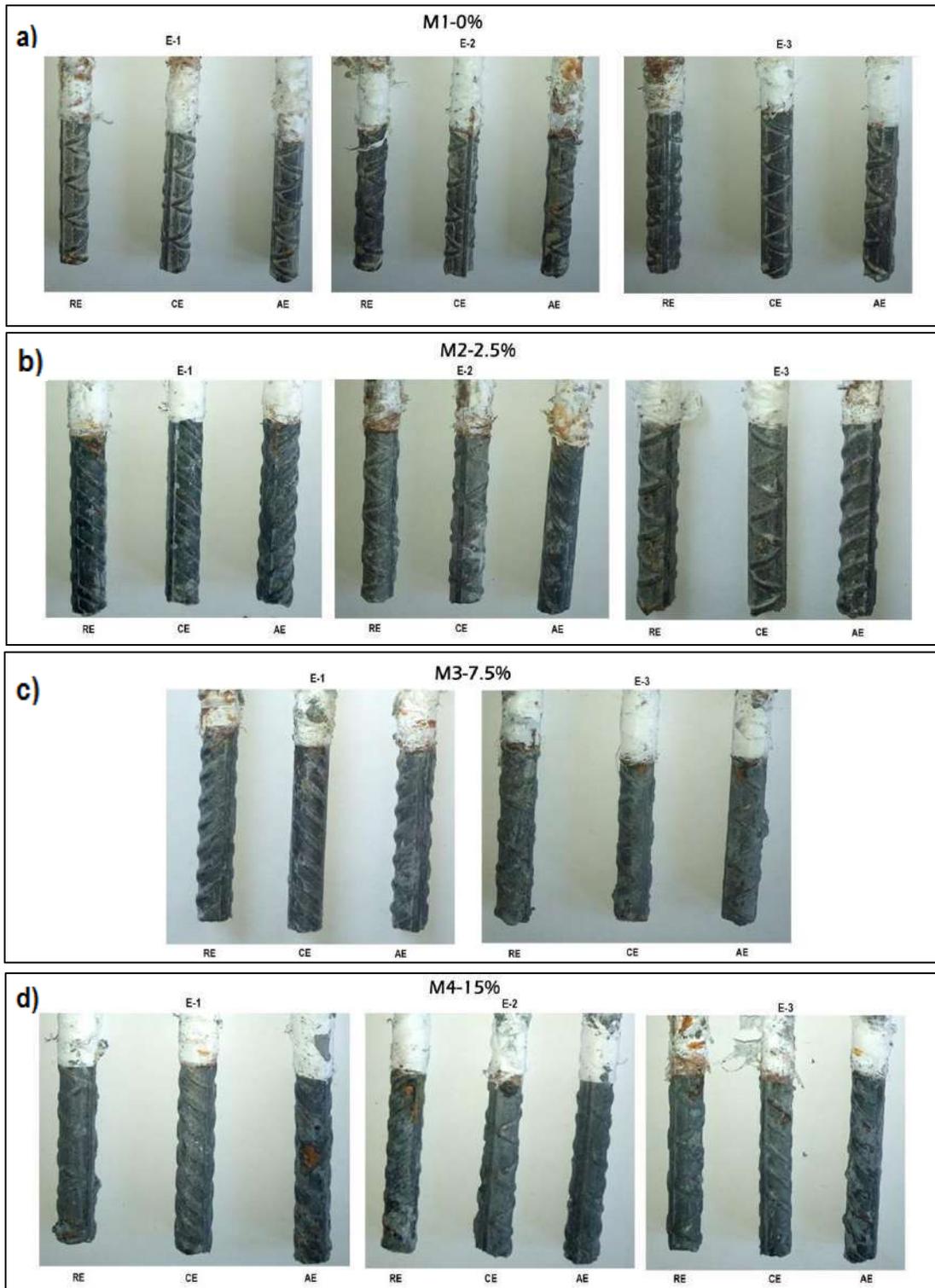
#### 4.4 Indicador con fenolftaleína.

La carbonatación debe su presencia en el concreto al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en el ambiente en forma de gas anhídrido carbónico; máximo en zonas urbanas o con elevados niveles de contaminación [1]. La carbonatación del concreto puede afectar el pH del agua del poro, bajo estas condiciones la barra de refuerzo pierde su estado pasivo, provisto por la alcalinidad del concreto que la rodea y la corrosión del acero se desarrolla [104]. La prueba de indicador de pH con 1% de fenolftaleína se detalla en la Figura 4.14. Con esta técnica se puede determinar la porción de concreto que no está carbonatado tiñendo un color rosa oscuro. Se observa de forma general; que todas las probetas tomaron un color rosado, lo cual; no hay evolución de carbonatación en el concreto inmerso en medio salino, conservando su pH básico de 12.5 a 13, debido a que la presencia de  $\text{CO}_2$  es mínima.



**Figura 4.14.** Superficie del concreto rociado con fenolftaleína después de 168 días de inmersión en ambiente salino.

#### 4.5 Resultado visual de las probetas de acero de refuerzo.



**Figura 4.15.** Acero de refuerzo después de 168 días embebido en el concreto, en ambiente salino agresivo.

---

En la figura 4.15 se observan las barras de acero embebidos en el concreto después de ser expuestas en medio salino. Las barras están clasificadas por electrodos de trabajo; la identificación se aprecia en la parte inferior de las barras de acero como; electrodo de referencia (RE) electrodo de trabajo o central (CE) y electrodo auxiliar (AE).

De manera general en la muestra M1 Figura 4.15 a), se aprecia la formación de capa de óxido no protector característico de la corrosión en este medio [105].

En el espécimen E-1 y E-3, específicamente en el electrodo RE y AE; se puede observar en la parte inferior una ligera capa de óxido de color gris. En la literatura el tono gris se asocia a la capa de óxidos pasivantes de ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sobre la superficie metálica [95].

En la Figura 4.15 b) se observa la muestra M2 con 2.5% de adición de grafito con respecto al peso del cemento. Se puede observar formación de película de óxido no protector en los espécimen E-1 y E-3, específicamente el electrodo RE. Se puede apreciar que el electrodo CE, se encuentra en un tono gris con película pasiva; esto debido al recubrimiento de la pasta de concreto, en comparación a los electrodos RE y AE. De acuerdo a autores la cubierta de hormigón debe tener un espesor mínimo determinado, recubrimiento real del concreto no podrá ser nunca inferior a 35 mm [37].

En la Figura 4.15 c) se presenta la muestra M3 con 7.5% de GP, se observa que el acero ha formado pequeñas películas de óxido no protector; visiblemente en el espécimen E-3. Las varillas se muestran con daños superficiales por corrosión, se puede observar la reducción en las corrugaciones del acero; debido a que los iones cloruros han penetrado la capa pasiva del metal. De acuerdo a los resultados electroquímicos de  $R_n$  y

---

$R_p$ . estas muestras tiene tipo de corrosión localizada y un daño de vida útil de elevado y muy elevado.

En la Figura 4.15 d), la pasta de concreto tiene mayor porcentaje de grafito 15% respecto al peso del cemento, se observa que los especímenes E-1, E-2 y E-3 presentan corrosión más severa en los 3 electrodos. Se puede ver daños y desprendimiento de la capa superficial del acero de refuerzo; en la literatura este hecho puede indicar; que el acero en presencia de una coloración característica (tonos rojizos, marrones y amarillos), resulta un indicativo de estados muy avanzados de corrosión [106-107].

Este análisis visual se ajusta con los resultados de las técnicas electroquímicas de  $R_n$  y  $R_p$ , así como los potenciales de media celda.

---

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- En la elaboración de la mezcla, la adición del grafito aumentó la absorción de agua para la producción del concreto, afectando la relación agua/cemento; mientras que el revenimiento fue disminuyendo conforme fue aumentando el nivel de reemplazo de GP.
- La muestra control presentó cloruros desde el inicio de la elaboración de la mezcla de concreto, debido a la contaminación del agregado, demostrado por las técnicas de MEB y DRX.
- La muestra M2 y M3 con 2.5 % y 7.5 % de reemplazo de GP, disminuyó la porosidad de la pasta de concreto; indicando menor permeabilidad del material, con valores de 19.30% y 20.80 %, con respecto al valor de 22.00 % de la muestra control.
- En todas las muestras, el reemplazo de GP; no participó directamente en las fases de hidratación del cemento, de acuerdo a las técnicas de DRX.
- En la micrografía MEB de la matriz del concreto, las muestras con adición de 2.5% y 7.5% de GP. Se observó mayor desarrollo en la formación de silicato de calcio hidratado (CSH); se visualizó una estructura compacta y con menor porosidad, comparado con la muestra control. Demostrando mayor adherencia y cohesión del cemento con las partículas de carbono y agregado.
- La muestra M2 y M3 con 2.5 % y 7.5 % de contenido de GP, adquirió un valor de  $F'c$  de 271.5 kg/cm<sup>2</sup> y 266.8 kg/cm<sup>2</sup> después de 28 días de curado; superando el valor de resistencia de diseño en comparación con la muestra control. Demostrando un buen comportamiento mecánico de la partícula de GP sobre la matriz del concreto.
- Todas las muestras sumergidas en medio salino presentaron potencial de corrosión con valores entre -290 mV y -450 mV, ingresando en una zona de 90% probabilidad de corrosión.

- El nivel de reemplazo del GP afectó las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo. En la muestra M3 y M4 con 7.5 % y 15 % de grafito, alcanzó los valores de  $R_n$  y  $R_p$  muy bajos con respecto a la muestra control; valores de entre  $1E+04 \Omega.cm^2$  y  $1E+01 \Omega.cm^2$ , indicando un alto proceso de corrosión sobre las barras de acero.
- El nivel de vida útil en el sistema acero/concreto con adición de GP, presentó nivel de corrosión entre elevado y muy elevado; con valores de densidad de corriente ( $i_{corr}$ ) superiores a  $1 \mu A/cm^2$ .
- El tipo de corrosión para todas las barras de acero de refuerzo estuvo en el rango de corrosión localizada, desde los primeros días de inmersión y de manera constante con el avance del tiempo de exposición al medio salino; con valores de índice de localización de entre 0.1 y 1.
- Las muestras con adición de GP, se observó que la pasta de concreto no desarrolló carbonatación al estar en contacto con el medio salino, manteniendo su pH básico.

---

## Recomendaciones

- Para posibles investigaciones se recomienda un estudio en la dosificación con diferentes porcentajes de polvo de grafito menores de 2.5%, para analizar su influencia en las propiedades físicas del concreto.
- Realizar un análisis a mayor lapso de tiempo de exposición en medio salino, para conocer un ataque más agresivo en el metal y el comportamiento de los potenciales de corrosión  $R_n$ , y  $R_p$ .
- Efectuar diferentes estudios en otros ambientes de exposición para caracterizar el comportamiento de la pasta de concreto y el acero de refuerzo en la incorporación de polvo de grafito.
- Realizar pruebas de resistividad en la pasta de concreto, y evaluación en sus propiedades físicas.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vidaud, E., & Vidaud, I. (2012). “*La carbonatación en el concreto reforzado*”. Construcción y tecnología en concreto. Pág, 21-23.
- [2] GONZÁLEZ, J., & Jimmy, R. (2003). “*Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado para Aplicaciones Portuarias*” (Doctoral dissertation, Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral).
- [3] No, P. T. (2006). “*Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*”.
- [4] San Miguel, G. F., Tamez, P. V., Alvarado, M. R., Alcorta, R. G., Garza, R. M., & Farias, J. P. (2012). “*Deterioro por corrosión de elementos de concreto armado de un edificio industrial*”. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 2(3), 206-223.
- [5] Chung, D. D. L. (2000). “*Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material*”. Composites Part B: Engineering, 31(6-7), 511-526.
- [6] Tascón, J. M. (2007). “*Materiales de carbono: estructuras y formas*”. Óptica pura y aplicada. 40(2),149-159.
- [7] Heymsfield, E., Osweiler, A. B., Selvam, R. P., & Kuss, M. (2013). “*Feasibility of anti-icing airfield pavements using conductive concrete and renewable solar energy*” (No. DOT/FAA/TC-13/8).
- [8] Wu, S. P., Wang, P., Li, B., Pang, L., & Guo, F. (2014). “*Study on mechanical and thermal properties of graphite modified cement concrete*”. In Key Engineering Materials (Vol. 599, pp. 84-88). Trans Tech Publications Ltd.

- 
- [9] Yuan, H. W., Lu, C. H., Xu, Z. Z., Ni, Y. R., & Lan, X. H. (2012). "Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials". *Solar energy*, 86(11), 3227-3233.
- [10] Garcés, P., Andi6n, L. G., De la Varga, I., Catalá, G., & Zornoza, E. (2007). "Corrosion of steel reinforcement in structural concrete with carbon material addition". *Corrosion science*, 49(6), 2557-2566.
- [11] Ha, T. H., Muralidharan, S., Bae, J. H., Ha, Y. C., Lee, H. G., Park, K. W., & Kim, D. K. (2005). "Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*", 19(7), 509-515.
- [12] de Guzmán, D. S. (2001). "Tecnología del concreto y del mortero". Pontificia Universidad Javeriana, p.24.
- [13] Butler, W. B., Janssen, D. J., Schell, H. C., Cabrera, J. G., Keck, R. H., Schmitt, J. W. & Klieger, P. (2001). "Guide to Durable Concrete".
- [14] Alter, L. B., & Mestres, F. L. (2004). "Corrosi6n y protecci6n (Vol. 150)". Univ. Politèc. de Catalunya.
- [15] Guti6rrez de L6pez, L. (2003). "El concreto y otros materiales para la construcci6n".
- [16] Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). "Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto".
- [17] Harmsen, T. E. (2005). "Diseño de estructuras de concreto armado". Fondo editorial PUCP.
- [18] Soares Klein, N. (2012). "El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland".
- [19] Rivera, G., & Rivera, G. (2013). "Agregados para mortero o concreto". Popayán: Universidad del Cauca.
- [20] ASTM D2487 (2017) "Standard Test Method for Classification Of Soils For Engineering Purposes"

- 
- [21] Calleja, J. (1983). “Adiciones y cementos con adiciones”. *Materiales de construcción*, 33(190-191), 25-52.
- [22] General de minería de México, C. (2014). “Perfil de Mercado del Grafito”. Sub-secretaría de Minería. México. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287801/Perfil\\_Grafito\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287801/Perfil_Grafito_2017.pdf).
- [23] CARDIN, J. M. (1989). “Caracterización de grafitos empleados en refractarios”. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr*, 28(2).
- [24] American Concrete Institute (2002) ACI. 211.1-91: “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” (Reapproved 2009),1-38.
- [25] Huanca, S. L. (2006). “Diseño de mezclas de concreto”. Puno: Universidad Nacional Altipano.
- [26] Sobral, H. S. (1984). “Propriedades do concreto fresco”. São Paulo: ABCP.
- [27] Rivera, G. A. “Manejabilidad del concreto”. Obtenido de [ftp://ftp.ucauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM,20\(2\),20-20](ftp://ftp.ucauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM,20(2),20-20).
- [28] ASTM C143M (2020) “Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete” (Método estándar para la prueba de revenimiento en el concreto de cemento hidráulico).
- [29] Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2020), “Norma N-CMT-2-02-005/04. Libro: CMT. características de los materiales. Parte 2. Materiales para Estructuras. Título 02. Materiales para Concreto Hidráulico. Capítulo 005. Calidad del Concreto Hidráulico”. Pág. 5.
- [30] ASTM C138/C138 M (2001) “Standard: Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento, y contenido de aire (gravimétrico) del concreto” Editado por el instituto mexicano del cemento y concreto, A.C.

- 
- [31] ASTM C231/C231M-14 (2012) *“Standard: método de ensayo normalizado de contenido de aire del concreto recién mezclado mediante el método por presión”*. Editado por el instituto mexicano del cemento y concreto, A.C.
- [32] ASTM C31/C 31M-17 (2006) *“Standard: Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra”*. Editado por el instituto mexicano del cemento y concreto, A.C.
- [33] ASTM C39/C39 M-18 (2006) *“Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”* Editado por el instituto mexicano del cemento y concreto, A.C.
- [34] Pancorbo, F. J. (2010). *“Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación”*. Marcombo.
- [35] Fernández, J. A. G. (1984). *“Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión”*. Editorial CSIC-CSIC Press.
- [36] Hernández-Montes, E., & Gil-Martín, L. M. (2007). *“Hormigón armado y pretensado”*. Concreto reforzado y preesforzado.
- [37] Muñoz Salinas, F., & Mendoza Escobedo, C. J. (2012). *“La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto”*. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 4(1), 63-86.
- [38] Fernández, J. A. G., & Vidales, J. M. M. (2007). *“Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamentos, medida, diagnosis y prevención”* (Vol. 30). Editorial CSIC-CSIC Press.
- [39] Sands, D. E. (1993). *“Introducción a la cristalografía”*. Reverté.
- [40] Esteban, T. L., & Montolio, T. S. (2001). *“Cristalografía para químicos: teoría y prácticas”*. Publicacions de la Universitat Jaume I.
- [41] Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). *“Principios básicos del microscopio electrónico de barrido”*.
- [42] Pérez, C. L., Celis, C., & Sequeda, L. G. *“Determinación de fraguado de morteros de cal mediante fenolftaleína”*. In TerraBrasil 2010 III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil (p. 78).

- [43] Segura, B., Jiménez, F. N., & Giraldo, L. R. (2016). “*Prototipo de potencióstato con aplicaciones en procesos electroquímicos*”. *Entre ciencia e ingeniería*, 10(19), 61-69.
- [44] Gómez-Biedma, S., Soria, E., & Vivó, M. (2002). “*Análisis electroquímico*”. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 51(1), 18-27.
- [45] Lock, A. U., & Tang, I. D. (1988). “*Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión*”. *Revista de química*, 2(1), 23-31.
- [46] ASTM C 876 (2015) “*Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*” (Método Estándar para el potencial de corrosión del acero de refuerzo sin recubrimiento en el concreto).
- [47] M. R. Sosa, T. Pérez, V. M. J. Moo-Yam, E. Chávez, J. T. Pérez-Quiroz (2018), “*Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural*”, *Revista ALCONPAT*, 8 (1), pp. 16 – 29.
- [48] Goellner, J. (2004). “*Elektrochemisches Rauschen bei der Korrosion. Materials and Corrosion*”, 55(10), 727-734.
- [49] Tamayo, J. M., & Chavarín, J. U. (2002). “*La Técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión*”.
- [50] Klapper, H. S., Goellner, J., & Heyn, A. (2007). “*Utilización de la técnica de ruido electroquímico para la investigación y monitoreo de la corrosión*”. *Ingeniería y Desarrollo*, (21), 56-72.
- [51] Sánchez, A., Sanjurjo, M., Bouzada, F., & Urrejola, S. (2005). “*Análisis estadístico de los registros de ruido electroquímico obtenidos en la corrosión del aluminio*”. *Revista de metalurgia*, 41(5), 330-339.
- [52] Stern, M., & Geary, A. L. (1957). “*Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves*”. *Journal of the electrochemical society*, 104(1), 56.

- 
- [53] González, J. A., Albéniz, J., & Feliu, S. (1996). “Valores de la constante  $B$  del método de resistencia de polarización para veinte sistemas metal-medio diferentes”. *Revista de Metalurgia*, 32(1), 10-17
- [54] Sagües, A.A. (1991). “Critical Issues in Electrochemical Corrosion Measurement. Techniques for Steel in Concrete”. CORROSION/91, NACE. Paper 141.
- [55] Almeraya-Calderón, F., Estupiñán, F., Zambrano, P., Martínez-Villafañe, A., Borunda, A., Colás, R., & Gaona-Tiburcio, C. (2012). “Análisis de los transitorios de ruido electroquímico para aceros inoxidable 316 Y-DUPLEX 2205 en NaCl Y FeCl”. *Revista de metalurgia*, 48(2), 147-156.
- [56] Arellano-Pérez, J. H., Negrón, O. R., Escobar-Jiménez, R. F., Gómez-Aguilar, J. F., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2018). “Development of a portable device for measuring the corrosion rates of metals based on electrochemical noise signals”. *Measurement*, 122, 73-81.
- [57] Lock, A. U. (1991). “Velocidad de corrosión de aceros nacionales AISI 1010 en ácido sulfúrico como medio agresivo”. *Revista de Química*, 5(1), 21-38.
- [58] Román, A. S., Barrientos, M. S., Harms, F., Mendez, C. M., & Ares, A. E. (2016, April). “Resistencia corrosión de acero inoxidable AISI 304L en biodiesel de soja”. In ANALES AFA (Vol. 27, No. 1).
- [59] Andrade, C., & Buják, R. (2013). “Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion”. *Cement and Concrete Research*, 53, 59-67.
- [60] ASTM C 136 (2019) “Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates” Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso.
- [61] ASTM D75 (2003) “Practica Normativa para el muestreo de Agregados”.
- [62] Norma Mexicana (2004) “NMX C-030-ONNCCE 2004 Industria de la Construcción-Agregados Muestreo”.

- 
- [63] ASTM C-29 (2017) “*Standard method for test for unit weight and voids in aggregate*”.
- [64] ASTM C128 (2015) “*Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*”.
- [65] ASTM C-127 (2015) “*Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*”.
- [66] Alejandro David, A. M., & Peña Estrella, J. (2013). “*Construcción de electrodos de plata/cloruro de plata para medición de potenciales eléctricos en estructuras sumergidas*”.
- [67] ASTM G59 (2014) “*Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*”.
- [68] Descarrega, J. M. A. (2006). “*Nociones de cristalografía aplicadas al estudio de materiales policristalinos por difracción de los rayos X*”.
- [69] Reyes Melo, M. É., & Hinojosa Rivera, M. (2000). “*Estructura de sólidos amorfos*”. Ingenierías, 3(9), 7-14.
- [70] Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (2012). “*Chemistry of the Elements*”. Elsevier.
- [71] Elena, J., & Lucia, M. D. (2011). “*X-ray diffraction study of hydration processes in the Portland cement*”. Journal of Applied Engineering Science, 1(1), 79-86.
- [72] Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). “*Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación*”. Dyna, 73(148), 69-81.
- [73] Tobón, J. I., & Gómez, R. K. (2008). “*Desempeño del cemento Portland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza*”. Dyna, 75(156), 177-184.
- [74] Vetter, M., Gonzalez-Rodriguez, J., Nauha, E., & Kerr, T. (2019). “*The use of Raman spectroscopy to monitor phase changes in concrete following high temperature exposure. Construction and Building Materials*”, 204, 450-457.

- 
- [75] Becerra, J. (2014). *“Efectos de la sílice amorfa en las propiedades cristaloquímicas y mecánicas del hormigón en un medio salino”*.
- [76] Treviño Cardona, B. I., & Gómez de la Fuente, I. (2002). *“Obtención de fases del cemento utilizando desechos agrícolas e industriales”*. *Ciência Uanl*, 5(2).
- [77] Vallejo Franco, D. D. (2018). *“Evaluación del impacto de cloruros sobre testigos de hormigones colocados en varias condiciones de exposición en Cayo Santa María”* (Doctoral dissertation, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.).
- [78] Gonzales de la Cotera, M.S. (1998). *“La corrosión del concreto en ambiente marino, Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción”*, organizado por el American Concrete Institute, Capítulo Peruano.
- [79] Palacio-León, Ó., Chávez-Porras, Á., & Velásquez-Castiblanco, Y. L. (2017). *“Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados”*. *Tecnura*, 21(53), 96-106.
- [80] González, F. (2006). *“Manual de supervisión de obras de concreto-2b”*. Editorial Limusa.
- [81] Ortiz Lozano, J. Á. (2005). *“Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado”*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [82] García Millar, V. H. (2017). *“Porcentaje de aire incorporado en el hormigón y su efecto en el desempeño”* (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello).
- [83] Arredondo Gonzales, J. E., & Arredondo Gonzales, J. L. (2015). *“Influencia del aire incorporado, condiciones de curado y evaluación del deterioro del concreto sometido a ciclos de congelamiento y deshielo”*.

- 
- [84] d'HAINAUT, C. A. (1976). “*Algunos aspectos de los hormigones con aire incorporado*”. Informes de la Construcción, 29(286), 87-91.
- [85] Solís-Carcaño, R, & Moreno, E. I. (2006). “*Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo*”. Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV, 21(3), 57-68.
- [86] APORTELA L. (2002). “*Determinación de la factibilidad técnica de la utilización de ceniza del Volcán Popocatepetl como material cementante en el concreto*”. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán (México).
- [87] Chuc, N. (2005). “*Estudio de un aditivo reductor de agua aplicado al concreto en clima cálido subhúmedo con agregados calizos de la Península de Yucatán*” (Doctoral dissertation, Tesis inédita de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán).
- [88] Cyr, M.; Lawrence, P.; Ringot, E. (2006), “*Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*” Cement and Concrete Research, V.36, No. 2, pp. 264-277.
- [89] Tello, M. (2012). Doctor en ciencia de materiales.
- [90] Blanco, Y. D. (2020). “*Efecto del pet reciclado y del mucílago de nopal en las propiedades electroquímicas y mecánicas del concreto*”.
- [91] Castellote, M., Andrade, C., Alonso, C. (2002) “*Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the nonstationary diffusion coefficient values*”. Corrosion Science, 44, 2409-2424.
- [92] González Sersen, A. M. (2011). “*Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro*”.
- [93] Mejía Ch, E., Vásquez, C., Peña, D. Y., & Estupiñán, H. (2011). “*Determinación de la despasivación en varillas de acero de refuerzo*”.

---

*en solución poro de agua de mar por medio de técnicas electroquímicas”.*

- [94] Lee-Orantes, F., Torres-Acosta, A., Martínez-Madrid, M., & López-Cajún, C. (2011). *“Refuerzo y protección catódica en elementos de concreto dañados por corrosión usando compuestos base fibras de carbón”*. Revista Ingeniería de Construcción, 21(3), 169-178.
- [95] Cottis P.A. , S. Turgoose *“Electrochemical Impedance and Noise”* Corrosion Testing Made Easy. Series NACE, Houston TX, USA (1999)
- [96] Zhao, B., Li, J. H., Hu, R. G., Du, R. G., & Lin, C. J. (2007). *“Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in cement mortar by electrochemical noise measurements. Electrochimica” Acta*, 52(12), 3976-3984.
- [97] Viveros-Aguirre, S., Rivera-Ortíz, I., Álvarez-Castillo, A., Menchaca-Campos, C., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2015). *“Uso de materiales reciclados para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y electroquímicas de concreto reforzado”*. OmniaScience Monographs.
- [98] Sanz, J. L. P., Torres, C. L., Cano, E., & Bastidas, J. M. (1999). *“Estudio de impedancia de la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en las regiones pasiva y de picadura”*. Revista de metalurgia, 35(6), 368-378.
- [99] Salazar-Jiménez, J. A. (2015). *“Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales”*. Revista tecnología en Marcha, 28(3), 127-136.
- [100] Estévez, G. (1998). JM, *“Los procesos de corrosión de las armaduras”*. CEDEX, Curso sobre durabilidad y reparación de estructuras de hormigón, Madrid, CEDEX.
- [101] de Rincón, O. T., & de la red DURAR, M. (1997). *“Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”*, CYTED. Maracaibo, Venezuela.

- 
- [102] Corte Morquecho, D. E. (2010). “*Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua al 3, 5% de cloruro de sodio*” (Bachelor's thesis).
- [103] Rodríguez, F. J. (2000). “*Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión*”. Depto. Ing. Metalúrgica, Facultad Química, UNAM, México DF, 1-3.
- [104] Moreno, E. I. (2006). “*Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación*”. Ingeniería, 10(3), 5-12.
- [105] Peña, D. Y., Estupiñán, H., Vásquez, C., & Ch, E. M. (2011). “*Determinación de la despasivación en varillas de acero de refuerzo en solución poro de agua de mar por medio de técnicas electroquímicas*”. Prospectiva, 9(1), 13-20.
- [106] Hormaza, W. A. (2007). “*Corrosión en láminas y bobinas de un acero importado*”. Ingeniería y Desarrollo, (21), 26-38.
- [107] Spiro, T. G., & Stigliani, W. M. (2004). “Química medioambiental (No. 540/S859)”. Pearson Educación.

## ANEXOS

### Artículo publicado:

Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2021). Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physicoelectrochemical properties. Revista ALCONPAT, 11(1), 18 - 33. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

### Estancia de Investigación:

Universidad de Vigo, España, 2020. Tema de investigación: Análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica y extracción de cloruros en el hormigón armado.



## Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties

A. Flores-Nicolás<sup>1</sup>, M. Flores-Nicolás<sup>1</sup>, J. Uruchurtu-Chavarín<sup>1\*</sup>

\*Contact author: [juch25@uaem.mx](mailto:juch25@uaem.mx)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

Reception: 28/07/2020 | Acceptance: 06/11/2020 | Publication: 01/01/2021

### ABSTRACT

The corrosion of reinforced concrete without and with the addition of graphite powder with low carbon content was evaluated. Phase identification processes and physical-electrochemical properties of the concrete were analyzed using X-ray diffraction techniques (XRD), scanning electron microscopy (SEM), half-cell potential, electrochemical noise (EN) and linear polarization resistance (LPR). Samples were studied for 168 days in saline solution. The results show that, when adding graphite powder in an amount of 2.5% by weight of cement, the compressive strength increased if compared with the control sample. The electrochemical tests show that the higher the level of graphite replacement, the higher the level of corrosion in concrete.

**Keywords:** reinforced concrete; graphite; corrosion; chlorides.

Cite as: Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Uruchurtu-Chavarín, J. (2021), " *Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties*", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 18 – 33, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México.

**DOCUMENTO DE ESTANCIA**

**Form of Stay**

Por la presente hago constar que/  
Pola presente fago constar que/      Alejandro Flores Nicolás  
This is to state that:

procedente de/  
procedente de/      Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
from the

ha realizado una estancia en la/  
realizou una estadia na/  
stay at      Escuela de Ingeniería Industrial  
Escola de Enxeñaría Industrial  
School of Industrial Engineering

durante el periodo  
durante o periodo      02/03/2020 - 01/05/2020  
during the period

dentro del programa/  
dentro do programa/  
within the programme:      Visitante extranjero de investigación  
Visitante estranxeiro de investigación  
Visiting research student

**RODRIGUEZ  
PIÑA AMELIA -  
DNI 50071089C**      Firmado digitalmente por  
RODRIGUEZ PIÑA AMELIA  
- DNI 50071089C  
Fecha: 2020.05.05  
14:08:02 +02'00'

Este documento ha sido firmado electrónicamente por:  
This document has been digitally signed by:

Amelia Rodríguez Piña  
Directora Técnica da Oficina de Relacións Internacionais  
Universidade de Vigo, España (Código RUCT: 38)