

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS DEL
ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO INCORPORANDO
FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS.

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

MICA. ALEJANDRO FLORES NICOLÁS

DIRECTOR: DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
CO-DIRECTOR: DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN

SINODALES: DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DR. ISAÍ ROSALES CADENA
DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ
DR. RENÉ GUARDÍAN TAPIA
DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS

CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE 2024

RESUMEN

En este proyecto de tesis se estudió el comportamiento electroquímico del concreto reforzado usando fibras naturales de palma y mango sin y con tratamiento superficial, además del uso de fibras sintéticas de polietileno de alta densidad (HDPE). Así mismo se realizó un estudio del inhibidor verde de corrosión en la pasta de cemento a través del extracto etanólico de la cáscara de mango. Se evaluaron sus propiedades físicas de los materiales para la arena y grava como; peso volumétrico seco y suelto, peso volumétrico seco compacto, granulometría del agregado. Para las fibras, se analizaron el contenido de humedad, la absorción y la densidad. Además, se elaboraron probetas cilíndricas, cubicas y vigas con bajo contenido de fibras de 0.2% y 0.4% en sustitución al peso de la arena y una longitud de 10 mm y 30 mm, las muestras se curaron en un periodo de 28 días. Las propiedades mecánicas se realizaron mediante la prueba de resistencia a la compresión, flexión, tensión y de impacto. Para los ensayos electroquímicos las muestras estuvieron inmersas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3 %, simulando un ambiente agresivo, durante 365 días. Las técnicas electroquímicas utilizadas consistieron en pruebas de potencial de media celda (HCP), ruido electroquímico (EN), resistencia a la polarización lineal (RPL) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Los resultados experimentales mostraron un incremento en la resistencia a la compresión para las muestras con fibras de mango con porcentaje de 0.4% y geometría corta. Mientras que la resistencia a la flexión aumentó marginalmente en 2.3% en cantidades pequeñas de fibra largas de mango y HDPE. Se observó un efecto positivo de las fibras naturales tratadas con aceite de motor usado con dimensiones cortas sobre los procesos de corrosión de la barra de acero, disminuyendo la velocidad de corrosión, debido a la formación de una película protectora en la interfaz acero/concreto.

ABSTRACT

In this thesis project, the electrochemical behavior of reinforced concrete was studied using natural palm and mango fibers with and without surface treatment, in addition to the use of synthetic high-density polyethylene (HDPE) fibers. Likewise, a study was carried out on the green corrosion inhibitor in the cement paste through the ethanolic extract of the mango peel. The physical properties of the materials for sand and gravel were evaluated, such as: dry and loose volumetric weight, compact dry volumetric weight, and aggregate granulometry. For the fibers, moisture content, absorption and density were analyzed. In addition, cylindrical, cubic and beam specimens with low fiber content of 0.2% and 0.4% were produced to replace the weight of sand and a length of 10 mm and 30 mm. The samples were cured over a period of 28 days. The mechanical properties were determined by compressive, flexural, tensile and impact strength tests. Likewise, for electrochemical tests, the samples were immersed in a 3% sodium chloride (NaCl) solution, simulating an aggressive environment, for 365 days. The electrochemical techniques used consisted of half-cell potential (HCP), electrochemical noise (EN), linear polarization resistance (LPR), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) tests.

The experimental results showed an increase in compressive strength for samples with mango fibers with a percentage of 0.4% and short geometry. In contrast, the flexural strength increased marginally by 2.3% in small amounts of long mango and HDPE fibers. A positive effect of natural fibers treated with used motor oil with short dimensions on the corrosion processes of the steel bar was observed, reducing the corrosion rate, due to the formation of a protective film at the steel/concrete interface.

AGRADECIMIENTO

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) por permitirme ser parte de esta institución y al programa de doctorado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo económico otorgado durante el inicio y termino de esta investigación, con No. de convenio 966914.

A mis asesores de tesis, el Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín y la Dra. Elsa C. Menchaca Campos por permitirme ser parte de sus asesorados, su paciencia, consejos y dedicación durante estos años de investigación.

A mi comité revisor, Dr. José Gonzalo González Rodríguez, Dr. Isaí Rosales Cadena, Dra. Miriam Flores Domínguez, Dr. René Guardian Tapia y la Dra. Ana Karen Gálvez Larios por sus recomendaciones y revisiones en este trabajo.

Al laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Guerrero, por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos de construcción.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación:

A mis **padres, hermanos y hermanas**, por sus sabios consejos, orientaciones y apoyo.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis.....	12
1.4 Objetivo general	12
1.4.1 Objetivos específicos	12
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Concreto.....	13
2.2 Corrosión del acero de refuerzo en el concreto	13
2.3 Procesos de corrosión	14
2.4 Resistencia a la compresión	15
2.5 Resistencia a la flexión	16
2.6 Resistencia al impacto Charpy	17
2.7 Inhibidor verde de la corrosión.....	18
2.8 Isotermas de adsorción	18
2.9 Técnicas electroquímicas	20
2.9.1 Potencial de corrosión o de media celda.....	21
2.9.2 Ruido electroquímico	22
2.9.3 Resistencia a la polarización lineal.....	25
2.9.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica	26
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
3.1 Nomenclatura	28
3.2 Reciclado de las fibras naturales	29
3.3 Reciclado de las Fibras HDPE.....	31
3.4 Características físicas de las fibras.....	32
3.4.1 Determinación del contenido de humedad	32
3.4.2 Determinación del porcentaje de absorción de humedad	33
3.4.3 Determinación de la densidad	34
3.5 Tratamiento de las fibras naturales.....	35

3.6	Características mecánicas de las fibras naturales.	37
3.6.1	Ensayo de tensión de las fibras	37
3.7	Extracto etanólico de cáscara de mango para inhibidor de la corrosión	38
3.7.1	Caracterización química del extracto de mango	40
3.7.2	Preparación de la superficie metálica y la solución.	41
3.7.3	Mediciones electroquímicas del inhibidor en el acero dulce	41
3.8	Materiales utilizados para la elaboración de concreto.	43
3.9	Dosificación del concreto y mortero	45
3.10	Elaboración del concreto	46
3.10.1	Elaboración de especímenes	48
3.10.2	Curado de especímenes	51
3.11	Técnicas electroquímicas	52
3.11.1	Potencial de media celda	52
3.11.2	Medición de ruido electroquímico	53
3.11.3	Medición de resistencia a la polarización lineal	54
3.11.4	Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica	54
CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		55
4.1	Resultados caracterización química del extracto etanólico de mango 55	
4.2	Pruebas físicas de las fibras	57
4.2.1	Resultado del contenido de humedad	57
4.2.2	Resultado del porcentaje de absorción de agua	58
4.2.3	Resultado densidad	59
4.2.4	Resultado absorción de fibras tratadas	60
4.2.5	Resultado pruebas mecánicas de las fibras	62
4.3	Pruebas físicas del concreto	64
4.3.1	Revenimiento	64
4.3.2	Temperatura del concreto	66
4.3.3	Contenido de aire	67
4.3.4	Porosidad de la pasta de concreto	68
4.4	Resultados pruebas de impacto Charpy para muestras con fibras	70

4.5	Resultados pruebas mecánicas de compresión.....	72
4.6	Resultados prueba de resistencia a la flexión del concreto.....	79
4.7	Técnicas electroquímicas	84
4.7.1	Resultados de mediciones electroquímicas del inhibidor en el acero dulce	84
4.7.2	Resultados de isothermas de adsorción	86
4.7.3	Resultado potencial de media celda.....	87
4.7.4	Resultados de ruido electroquímico	92
4.7.5	Resultados de resistencia a la polarización lineal	100
4.7.6	Resultados de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.....	108
4.7.7	Circuitos equivalentes en el sistema acero/concreto	120
4.8	Resultado del análisis visual de las probetas de acero de refuerzo.....	123
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		128
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		132
ANEXOS		157

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla 2.1. Criterio para medir el potencial de corrosión en el concreto reforzado.....	21
Tabla 2.2. Rango de valores de índice de localización.	24
Tabla 2.3. Rango de valores en la estimación de vida útil del concreto reforzado....	25

CAPITULO 3

Tabla 3.1. Nomenclatura empleada para las pruebas mecánicas y electroquímicas.	28
Tabla 3.2 Propiedades químicas del aceite de motor usado.	35
Tabla 3.3. Propiedades físicas de los agregados.	45
Tabla 3.4. Diseño de mezcla para concreto de $F'c = 300 \text{ Kg/cm}^2$	45
Tabla 3.5. Porcentajes de fibra con respecto al agregado fino 1 m^3	46
Tabla 3.6. Dosificación de diseño de mezcla para 80 l de concreto con inhibidor, fibras largas, cortas y tratadas.	46
Tabla 3.7. Dosificación de diseño de mezcla de mortero para 1 m^3	46

CAPITULO 4

Tabla 4.1. Valores de porcentaje de humedad de las fibras.....	57
Tabla 4.2. Porcentaje de absorción de las fibras, saturado a 24 horas.	58
Tabla 4.3. Valores de densidad de las fibras.	59
Tabla 4.4. Comparación características físicas de las fibras naturales y sintéticas. .60	
Tabla 4.5. Valores de absorción de fibras naturales, 5 minutos de exposición.	61
Tabla 4.6. Valores de absorción de fibras naturales, 15 minutos de exposición.	61
Tabla 4.7. Valores de absorción de fibras naturales, 30 minutos de exposición.	61
Tabla 4.8. Valores de absorción de fibras naturales, 60 minutos de exposición.	62
Tabla 4.9. Propiedades mecánicas de las fibras.....	64
Tabla 4.10. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras largas, curado máximo de 28 días.....	73
Tabla 4.11. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras cortas, curado máximo de 28 días.	75
Tabla 4.12. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras tratadas, curado máximo de 28 días.....	77
Tabla 4.13. Valores de $F'c$ para las muestras con inhibidor, curado máximo de 28 días.....	78
Tabla 4.14. Valores de $F'f$ para las muestras con fibras naturales y sintéticas, curado a 28 días.....	80
Tabla 4.15. Valores de $f'f$ para las muestras con fibras cortas naturales y sintéticas, curado a 28 días.....	82

Tabla 4.16. Valores de F^f para las muestras con fibras tratadas naturales, curado a 28 días.	83
Tabla 4.17. Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización del acero al carbono en solución de 3.5% de NaCl.	85
Tabla 4.18. Valores de energía libre de adsorción de acero al carbono en presencia de inhibidor verde.	87
Tabla 4.19. Parámetros electroquímicos de las muestras con fibras tratadas obtenidos de los circuitos equivalentes.	122
Tabla 4.20. Parámetros electroquímicos de las muestras con inhibidor y fibras obtenidos de los circuitos equivalentes.	123
Tabla 4.21 Comparación de las propiedades mecánicas y electroquímicas del concreto reforzado.	127

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 3

Figura 3.1 Obtención de fibras naturales.	29
Figura 3.2. a) Limpieza del hueso del mango b) Deshidratado de las hojas de palma.	30
Figura 3.3. Dimensiones de las fibras naturales a) fibra larga palma b) fibra corta mango.	30
Figura 3.4. Obtención de fibras HDPE.	31
Figura 3.5. Medición del peso de las fibras naturales.	32
Figura 3.6. a) Saturación de las fibras b) Secado superficial de las fibras.	33
Figura 3.7. Densidad de las fibras.	34
Figura 3.8. a) impregnación superficial de las fibras b) saturación de fibras durante 5 minutos.	36
Figura 3.9. Saturación de las fibras tratadas.	36
Figura 3.10. Secado superficial de las fibras tratadas.	37
Figura 3.11. Dimensiones de la probeta a) plástico b) naturales.	37
Figura 3.12. Maceración medio ambiente a) Cascara de mango b) Deshidratación 3-5 días de la fruta protegiendo de la luz solar c) almacenamiento de la cascara seca d) solvente etanol e) 3-4 días sumergido la cascara de mango en el solvente f) destilación.	39
Figura 3.13. Equipo de destilación evaporador rotativo.	39
Figura 3.14. Horno de secado, par de muestras con inhibidor.	40
Figura 3.15. Cupones de acero dulce.	41
Figura 3.16. Celda electroquímica.	42
Figura 3.17. Materiales para la elaboración de concreto, a) cemento b) Agregado grueso c) Agregado fino d) barra de acero e) agua de la red pública f) fibra larga de mango g) fibra larga de palma h) fibra larga de polietileno de alta densidad.	44

Figura 3.18. a) pesos de los materiales b) incorporación de las fibras naturales de manera aleatoria.	47
Figura 3.19. Moldes para la mezcla de concreto.	47
Figura 3.20. a) Revenimiento b) Temperatura del concreto c) Masa unitaria d) contenido de aire.	48
Figura 3.21. a) Enrase de las probetas de concreto b) Protección del cilindro por contaminación.	49
Figura 3.22. a) Varillado del concreto b) Enrazado del concreto.	49
Figura 3.23. Probetas para prueba Charpy, con muesca V.	50
Figura 3.24. Dimensiones de los especímenes cúbicos para las técnicas electroquímicas.	51
Figura 3.25. Curado de probetas cilíndricas.	51
Figura 3.26. Muestras inmersas en ambiente salino 3% de cloruro de sodio.	52
Figura 3.27. Medición del potencial de media cea en el acero de refuerzo.	53
Figura 3.28. Medición del ruido electroquímico en el concreto reforzado.	53
Figura 3.29. Técnica de resistencia a la polarización lineal en la barra de acero.	54

CAPITULO 4

Figura 4.1. Espectros de FT-IR de los extractos de cáscara de Mango.	55
Figura 4.2. Espectros de UV-Visible del extracto de cascara de mango.	56
Figura 4.3. Gráfica de esfuerzo-deformación para fibras naturales y HDPE.	63
Figura 4.4. Revenimiento del concreto a) Fibras largas b) Fibras cortas c) Fibras tratadas d) Inhibidor.	65
Figura 4.5. Temperatura del concreto a) Fibras largas b) Fibras cortas c) Fibras tratadas d) Inhibidor.	66
Figura 4.6. Contenido de aire del concreto a) Fibras largas b) Fibras cortas c) Fibras tratadas d) Inhibidor.	68
Figura 4.7. Porosidad del concreto a) Fibras largas b) Fibras cortas c) Fibras tratadas d) Inhibidor.	70
Figura 4.8. Resultado promedio de resistencia de impacto.	71
Figura 4.9. Valores promedio de resiliencia.	72
Figura 4.10. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FL.	74
Figura 4.11. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FC.	76
Figura 4.12. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FCT.	77
Figura 4.13. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para CH.	79
Figura 4.14. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión.	81
Figura 4.15. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión para FC.	82
Figura 4.16. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión para FCT.	83
Figura 4.17. Curvas de polarización del acero en presencia del inhibidor del extracto de cascara de Mango.	85
Figura 4.18. Isotermas de adsorción de Langmuir del inhibidor verde de cáscara de mango sobre una superficie de acero en NaCl al 3%.	86

Figura 4.19. Valores de potencial de media celda para FL.	88
Figura 4.20. Valores de potencial de media celda para FC.	89
Figura 4.21. Valores de potencial de media celda para FCT.	90
Figura 4.22. Valores de potencial de corrosión para muestras con inhibidor.	91
Figura 4.23. Gráfica de las fluctuaciones FL de a) ruido electroquímico y b) velocidad de corrosión.....	93
Figura 4.24. Gráfica de valores de índice de localización.	94
Figura 4.25. Gráfica de las fluctuaciones FC de a) ruido electroquímico y b) velocidad de corrosión.....	95
Figura 4.26. Gráfica de valores de índice de localización para fibras cortas.	96
Figura 4.27. Gráfica de las fluctuaciones para FCT de a) ruido electroquímico y b) velocidad de corrosión.....	97
Figura 4.28. Gráfica de valores de índice de localización para fibras cortas tratadas.	98
Figura 4.29. Gráfica de transitorios para muestras con inhibidor a) ruido electroquímico y b) velocidad de corrosión.	99
Figura 4.30. Gráfica de valores de índice de localización para probetas con inhibidor.	100
Figura 4.31. Valores de resistencia a la polarización lineal, fibras largas.	101
Figura 4.32. Valores de vida útil del concreto, en condiciones agresivas.	102
Figura 4.33. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos FC.	103
Figura 4.34. Valores de vida útil del concreto con fibras cortas.	103
Figura 4.35. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos con fibras cortas tratadas.	104
Figura 4.36. Valores de vida útil del concreto con fibras cortas tratadas.	105
Figura 4.37. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos con inhibidor de mango.....	106
Figura 4.38. Valores de vida útil del concreto con inhibidor.....	107
Figura 4.39. Diagramas de Nyquist, fibras largas a) 1 día b) 28 días c) 168 y d) 365.	109
Figura 4.40. Diagramas de Bode-fase y ángulo, a) 1 día b) 28 días c) 168 días y d) 365 días.....	110
Figura 4.41. Diagramas de Nyquist, fibras cortas a) 1 día b) 28 días, c) 168 días y d) 365 días.....	112
Figura 4.42. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas a) 1 día b) 28 días c) 168 días y d) 365 días.....	113
Figura 4.43. Diagramas de Nyquist, fibras cortas a) 1 día b) 28 días, c) 168 días y d) 365 días.....	115
Figura 4.44. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas tratadas a) 1 día b) 28 días, c) 168 días y d) 365 días.....	116
Figura 4.45. Diagramas de Nyquist, fibras cortas a) 1 día b) 28 días.....	118
Figura 4.46. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas tratadas a) 1 día b) 28, c) 168 días y d) 365 días.....	119

Figura 4.47. Circuito equivalente de Randles modificado con 2 constantes de tiempo.	120
Figura 4.48. Ajuste de datos electroquímicos en los diagramas de Bode-Fase.....	121
Figura 4.49. Varilla de refuerzo en el concreto después de 365 días de inmersión en medio salino. a) Fibras largas b) Fibras cortas c) Fibras tratadas d) Muestra con inhibidor y fibra.	126

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

La corrosión del acero de refuerzo es un problema que afecta el deterioro de las estructuras de concreto reforzado, derivado en implicaciones económicas mayores ([Del Valle Moreno et. al., 2001](#)). El concreto reforzado se deteriora al interactuar con el medio ambiente, siendo el principal responsable de la reducción de la vida de servicio de las estructuras y elementos que lo conforman ([Ixtapan y Moreno, 2006](#)).

Las causas más importantes de corrosión de las armaduras son: la despasivación localizada de las armaduras de acero, debido a la entrada de iones cloruro, agua y oxígeno disuelto; y/o la completa despasivación del refuerzo por acidificación de la solución intersticial como consecuencia de reacciones de la matriz de cemento con dióxido de carbono presente en la atmósfera ([Montemor et. al., 2003](#)).

Normalmente, el acero de refuerzo en el concreto no se corroe, porque siempre se forma una película pasiva compacta protectora y formada entre el agua y las sales del concreto ([Dong et. al., 2011](#)). La estructura del concreto densa y relativamente impermeable proporciona la protección, mientras que la alta alcalinidad de la solución que se encuentra atrapada en los poros proporciona la protección química contra la corrosión ([Almusallam, 2001](#)). La protección proporcionada por el concreto a las barras de refuerzo puede ser reducida e incluso anulada por la alta porosidad o la presencia de grietas ([Tittarelli y Moriconi, 2008](#)).

Para disminuir los efectos de la corrosión, numerosas investigaciones han buscado diferentes procesos para obtener materiales alternativos sintéticos, naturales o de desecho para proteger al concreto reforzado convencional. Dentro de los materiales reciclados que se han utilizado en la mezcla se

encuentran: plásticos, vidrio, elastómero de llantas, cenizas, escoria de hornos (industria del acero), desechos orgánicos (madera, fibras) y residuos agrícolas ([Gonzalo et. al., 2015](#)). En México, los desechos o subproductos agrícolas (cáscaras, huesos, bagazo, frutas y vegetales dañados o con problemas de madurez y calidad) representan un problema ambiental, al no contar con políticas enfocadas para su apropiado manejo ya que la mayoría de las veces son desechadas en los basureros sin ningún control ([Martinez et. al., 2012](#)).

Así mismo, los desechos de plástico como polietileno de alta densidad, polipropileno, polietileno tereftalato etc., se localizan en todas las ciudades urbanas y rurales, representan un problema ambiental en todo el mundo y especialmente en México, donde existe una problemática muy importante de contaminación de estos tipos de materiales de desechos inorgánicos.

Las grandes cantidades de volumen de residuos que se generan diariamente y que reciben escaso o nulo tratamiento adecuado; si bien por sus características de peligrosidad la mayoría de los plásticos sintéticos no representan un riesgo para el ambiente, sí son un problema mayor porque no pueden ser degradados por el entorno ([Frías et. al., 2003](#)).

El uso de residuos es una alternativa a la eliminación de los problemas de contaminación ([Hınıslioğlu y Ağar, 2004](#)). En esa búsqueda de alternativas, el utilizar fibras naturales y sintéticas en el concreto reforzado presenta las características de una solución con viabilidad técnica y económica ([Osorio et. al., 2007](#)).

Los concretos compuestos reforzados con fibras son llamados concretos fibroreforzados, y son aquellos elaborados a partir de un conglomerado hidráulico (generalmente cemento Portland), agregados (fino y grueso), agua, y fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Es así como se desarrolla toda una tecnología con la adición al concreto de

fibras de los más diversos materiales; agrupándose hoy según gran parte de la literatura especializada en cuatro grandes grupos: metálicas, vidrio, naturales y sintéticas ([Vidaud et. al., 2015](#)).

Según su origen, las fibras pueden ser clasificadas en sintéticas y naturales: las fibras sintéticas o artificiales generalmente provienen de materiales sintéticos como los petroquímicos ([El Nemr, 2012](#)). Las fibras naturales incluyen aquellas producidas por plantas, animales y procesos geológicos, son biodegradables con el tiempo ([Quintero, 2003](#)).

Las fibras naturales para reforzar los materiales se pueden obtener a un bajo costo, usando la mano de obra local y las técnicas adecuadas para su obtención, estas fibras son llamadas típicamente fibras naturales no procesadas ([Juarez Alvarado et. al., 2003](#)). Algunos de los materiales naturales que se incluyen en estas mezclas son: yute, bambú, coco, cáscara de arroz, bagazo de caña y aserrín ([Martínez-Barrera et. al., 2005](#)).

En las últimas décadas, se analizan nuevos materiales alternativos fibrosos naturales y sintéticos que contienen características específicas, que agregados al concreto modifican o pueden mejorar sus diferentes propiedades.

La cascara de mango (*Mangifera indica* L.) y la palma real (sabal mexicano) son nuevos materiales naturales que se están estudiando con este propósito, que no son tan dañinos con el medio ambiente que pueden ser incorporados en la tecnología de la industria de la construcción. Actualmente, existen pocos reportes en la literatura sobre el estudio del uso de estos materiales compuestos incorporados en la pasta de concreto.

Asimismo, estudios sobre el concepto de uso de fibra naturales discontinua para abordar la agresividad de los problemas medioambientales son escasos ([Ramli et. al., 2013](#)).

El mango (*Mangifera indica* L.) es un importante fruto tropical por su gran demanda en el mercado internacional, dónde México, es uno de los principales exportadores ([Perez-Lopez, 2009](#)). Por otra parte, las cáscaras y el hueso del mango que pueden considerarse desechos pueden ser una fuente importante de compuestos bioactivos, tales como la pectina, polifenoles y mangiferina en las cáscaras, ácidos grasos poliinsaturados en el hueso y compuestos de naturaleza fenólica con actividad antioxidante y antiinflamatoria ([Martinez et. al., 2012](#)). Las principales características morfológicas de las variedades de mangos son: un peso promedio de 150 g; una composición promedio de 56.39% de pulpa, 21.54 % de cáscara y 22.09% de semilla ([García, 2003](#)). Dependiendo de la variedad de mango, la cáscara puede constituir 15 a 18% del peso total del fruto y el hueso 13 a 29%, por lo que junto con la pulpa que queda adherida a estos, un importante volumen de desechos se genera en las plantas procesadoras (deshidratadoras y despulpadoras) de mango ([Bangerth y Carle, 2002](#)).

De acuerdo con los datos ([Sagarpa, 2018](#)) a nivel nacional, el estado de Guerrero ocupa el primer lugar en producción de mango con un estimado de 364 mil toneladas y un valor de 1,526 millones de pesos. Las regiones de la costa grande y parte de tierra caliente del estado de Guerrero genera la mayor producción de mango estatal ([Siap, 2016](#)), cuyas principales variedades son Ataulfo, Criollo, Haden, Kent y Tommy Atkins, con una superficie total de 15 278.91 ha sembradas.

La conocida palma de guano o sabal mexicana es un género de palmas solitarias y hermafroditas de hasta 25 metros de altura. El género es estrictamente del nuevo mundo e incluye 15 especies, las cuales se distribuyen en el suroeste de Estados Unidos, México, las Antillas y el norte de Colombia y Venezuela ([Escalante, 2018](#)).

En México la palma real (sabal mexicana), se distribuye desde Tamaulipas hasta Campeche por el lado del Golfo de México y desde Guerrero a

Chiapas en la vertiente del Pacífico, puede medir hasta 20 m, los troncos son regularmente gruesos y conservan restos de las vainas foliares en gran parte de su longitud y hasta mucho después de la caída de la hoja. Las hojas son alternas y están ordenadas helicoidalmente. La lámina de la hoja está formada de numerosos segmentos que se fusionan en la base, formando una palma larga, y que miden entre 1.5 y 2 m de longitud y de 4 a 6 cm de ancho en su fase adulta, además tienen una nervadura central prominente que, en corte transversal, tiene forma rectangular. La lámina posee una costa que es muy recurvada; la hástula tiene 12 cm de longitud en promedio, en hojas adultas ([Quero, 1992](#)).

Las hojas adultas se usan para techar casas rurales y las hojas inmaduras se utilizan para diversas artesanías. Se consumen las yemas apicales ("cogollos" o "palmitos") y los pecíolos se utilizan para cercados ([Pérez y Rebollar, 2003](#)). Este material se utiliza principalmente para la venta, elaboración de escobas, sombreros, muebles, techos de casa, petate, lazos, como combustible (leña), y la utilización de los troncos como parte estructural de las construcciones de las casas.

El Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es un polímero termoplástico semicristalino, que pertenece al grupo de las poliolefinas y es fabricado mediante la polimerización de etileno, con la ayuda de catalizadores ([Heper et. al., 2003](#)).

El HDPE es uno de los polímeros más utilizados que se encuentran en botellas de leche, detergente, cosméticos, bidones; en el post consumo, genera grandes cantidades de desechos contaminantes que no son fácilmente reciclados.

El HDPE es el grado de polietileno con la mayor rigidez y la menor cantidad de flexibilidad, es ligero, no tóxico, fácilmente reciclable y sirve cada vez más como una alternativa al uso de sustancias menos amistosas ([Wani, et. al.,](#)

2022). Los bienes producidos con HDPE de calidad comercial tienen diferencias características sutiles, causada por variaciones en las tecnologías de polimerización, residuos de catalizador, estructuras moleculares de las cadenas poliméricas y aditivos utilizados. La comprensión de estas diferencias y el uso de las mejores características hacen posible su optimización para aplicaciones específicas ([Rahim et. al., 2013](#)).

Otros beneficios sobre el uso de los desechos orgánicos (frutas) para la protección del acero de refuerzo en el concreto son inhibidores orgánicos verdes contra la corrosión, que tienen compuestos naturales procedentes de especias, hierbas plantas medicinales y frutas, que pueden dificultar la corrosión de materiales en medios agresivos ([Popola, 2019](#)).

El uso de inhibidores verdes a partir de extractos de frutas es una alternativa atractiva para enfrentar este fenómeno de corrosión, debido a que son amigables para el medio ambiente y son abundantes. Los compuestos naturales tienen estructuras moleculares complejas que constan de una gran cantidad de diversos productos químicos constituyentes que contienen anillos aromáticos, carbonilo ($-C=O$), carboxilo ($-COOH$), hidroxilo ($-OH$) y grupos amina ($-NH$, $-NH_2$), como resultado, estos compuestos pueden ser inhibidores potenciales del proceso de corrosión del acero dulce ([Ramezanzadeh et al., 2019](#); [Ramya y Muralimohan, 2016](#)).

Con base en lo anterior, la presente investigación tiene como propósito el reciclamiento de las fibras naturales y sintéticas como son: mango (*Mangifera indica* L.), la palma real (sabal mexicano) y el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) incorporados al concreto reforzado, además de conseguir un inhibidor verde a partir de la cascara del mango, para obtener un material que puede mejorar las propiedades físicas y electroquímicas, alargando la durabilidad de las estructuras en el concreto.

A través de los años, las fibras fueron usadas como material de construcción. En las últimas tres décadas hubo un crecimiento por el interés en su uso en el concreto premezclado, concreto prefabricado y lanzado; para lo cual, se han realizado investigaciones con fibras naturales y sintéticas dentro de la matriz de la pasta de concreto.

De igual manera, investigadores a nivel mundial han enfatizado el uso de fibras como material de refuerzo en estructuras compuestas, cuyos resultados han sido presentados en diversos congresos y simposios internacionales ([García et. al., 2006](#)).

Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción ([Kosmatka et. al., 1992](#)). Los parámetros que describe una fibra son su longitud, su diámetro y su aspecto o esbeltez, que es la relación existente entre la longitud y el diámetro ([García et. al., 2006](#)).

Las fibras, en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento (fisuración) y disminuir la abertura de las fisuras en el concreto aumentando así la resistencia, ductilidad y tenacidad ([Kosmatka et. al., 1992](#); [Ede y Agbede, 2015](#)).

Las fibras vegetales están constituidas por una compleja asociación de sustancias poliméricas. La composición química varía en función del tipo y origen de las fibras ([García et. al., 2006](#)).

A pesar de que los concretos producidos con fibras naturales presentan propiedades mecánicas buenas, tienen algunos problemas de durabilidad, que están relacionados con la capacidad de resistir variaciones de temperatura, humedad y ataques de sulfatos o cloruros ([Torgal y Jalali, 2011](#)). Muchas de estas fibras son altamente susceptibles a los cambios de volumen debido a variaciones de la humedad que contienen, estos pueden

afectar drásticamente la adherencia entre la fibra y la matriz ([Kosmatka et. al., 1992](#)).

Muchas de las fibras naturales requieren cierto tratamiento que le confiere a estas algunas propiedades como; aspereza y por lo tanto es posible lograr una mejor adherencia entre la fibra tratada y la matriz cementante ([Paricaguán et. al., 2013](#)).

Ede y Agbede ([1992](#)), realizaron estudios al concreto con fibras de coco, y reportaron que la presencia de esta fibra mejora significativamente la tenacidad y el comportamiento de ductilidad del concreto. ([Lumingkewas et. al., 2017](#), estudiaron el efecto de la adición de fibra de coco en una longitud de 20 mm y 40 mm en hormigón demostrando que reduce la resistencia a la tracción.

Juárez et. al., ([2013](#)) experimentaron la aplicación de lechuguilla como refuerzo de compuestos a base de cemento, obteniendo buenos resultados en lo concerniente a las pruebas a flexión para reducir el efecto de la matriz alcalina y además para contrarrestar la cualidad hidrofílica de las fibras, propuso aislar las fibras con diversos compuestos químicos, obteniendo los mejores resultados con parafina. Como parte de esta investigación concluyó que es preferible tener una matriz densa en cemento, una relación agua a cemento alrededor de 0.35, incrementando la resistencia a la flexión.

Herrera y Quispe ([2019](#)), utilizaron las fibras naturales de agave para su análisis en el concreto hidráulico, incorporaron una pequeña cantidad de fibra de 0.1% obteniendo mayor resistencia a la compresión, el aporte de la fibra natural en el concreto endurecido se reflejó en la menor permeabilidad, mayor resistencia a la compresión, tracción indirecta, flexo tracción, y menor desgaste al impacto, para longitudes de fibra igual a 5.5 cm y 10.0 cm con dosificación de 0.1% de contenido de fibra.

Jiménez y Torres (2020) observaron, que mediante la adición de fibra de bagazo de caña de azúcar, la resistencia a la compresión del concreto tiene una reacción inversamente proporcional, resultando que, a mayor cantidad de fibra la resistencia disminuye, con base en este análisis se concluye que un porcentaje óptimo de fibra en el concreto se encuentra entre el 0.5- 2.5%.

Marroquín y López (2019), analizaron las propiedades mecánicas del concreto con fibras de bejuco, utilizando porcentajes con el 0.3%, 0.5% y 0.7% del peso total de la mezcla para agregar las fibras, con una longitud entre 1 y 2 cm, distribuidas de manera aleatoria en toda la mezcla. Concluyeron que la mezcla perdía maleabilidad, debido a la capacidad de absorción de la fibra. En la resistencia a la compresión recomiendan un porcentaje de 0.3% fibra de bejuco en la elaboración de concretos para su posible uso en estructuras verticales.

Pocos estudios se han enfocado en las fibras naturales a exposiciones en ambiente altamente agresivos como son los cloruros.

Ramli et. al., (2013), evaluaron las fibras de coco incorporadas en el concreto con porcentaje de humo sílice como aglutinante; reportaron que, en sus experimentos, para los climas más severos como el de las costas marinas, fueron identificados dos factores que influyeron en la penetración de cloruros en el hormigón, a saber, la severidad de exposición a la fuente de cloruro y la permeabilidad de las muestras.

Otras investigaciones han incorporado fibras sintéticas proveniente de varios tipos de plásticos incorporados a la pasta de concreto principalmente polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (HDPE).

Los estudios han mostrado resultados variables en la trabajabilidad del concreto fresco, la mayoría de los autores han informado una disminución de la trabajabilidad con respecto al aumento del porcentaje de reemplazo de las

fibras sintéticas ([Almeshal et. al., 2020](#); [Nibudey et. al., 2013](#); MC y KB 2011). Al mismo tiempo se desarrollaron investigaciones en torno a la incorporación de las fibras sintéticas; que añadidas al concreto conseguían también mejorar sus propiedades (sobre todo en estado plástico) y presentando otras ventajas adicionales, tales como menor peso si se compara por ejemplo con las del acero, y sobre todo la ausencia de corrosión de este tipo de fibras ([Vidaud et. al., 2015](#)),

En las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de HDPE, ([Malagavelli y Patura, 2011](#)), analizaron la resistencia a compresión y tensión utilizando porcentajes de fibras de 0.5 a 6%; los resultados mostraron que hubo un aumento tanto de la resistencia a la compresión como de la resistencia a la flexión del concreto utilizando las fibras hasta un máximo de 2%. Otros autores investigaron las propiedades mecánicas del concreto utilizando diámetros de fibra 0.25 mm y 0.40 mm y tres series con 0.40%, 0.75% y 1.25% de fracción volumétrica de fibras. En el estudio concluyeron que el módulo de flexión (rotura) aumentó marginalmente, entre 3% y 14% en presencia de fibras de HDPE, además, mejoraron las propiedades de capacidad de agrietamiento y permeabilidad al agua ([Pešić et. al., 2016](#)).

Hossain et. al., ([2020](#)), estudiaron el comportamiento de la corrosión acelerada en una solución de cloruro de sodio al 5 %, a través del potencial de media celda, en las fibras de alcohol polivinílico (PVA), el caucho granulado (CR) y las fibras de polietileno de densidad (HDPE), concluyeron que las fibras de HDPE disminuyen la permeabilidad del ion cloruro, ya que obtuvieron lecturas de potencial de media celda (HCP) más bajas para el HDPE con respecto a las fibras de PVA y CR, sin embargo, mostró un 90 % de probabilidad de corrosión.

La incorporación de inhibidores verdes de corrosión en el concreto se ha incrementado en los últimos años, Valdez-Salas et. al., ([2021](#)), investigó el efecto del extracto de hoja de Azadirachta indica (Neem) como inhibidor de la

corrosión del acero en el concreto armado los resultados sugieren que los tratamientos con Neem no alteraron la integridad del hormigón ni los parámetros fisicoquímicos, y alcanzó una protección contra la corrosión a largo plazo del 95% tras 182 días de evaluación.

Hadi et al., (2020) estudiaron el uso del extracto de hojas de juncos y la evaluación se realizó mediante ensayos de Tafel realizados en muestras de mortero sumergidas durante 180 días en una solución de NaCl al 3.5% en peso. Se encontró que, al aumentar la concentración de inhibidor, la eficiencia crece hasta el 76.98% a 0.5%.

Wang et al., (2019) estudiaron el efecto inhibidor del extracto ecológico de jengibre en materiales cementicios, comprobaron que la adición del inhibidor puede reducir el riesgo de corrosión de las barras de acero incrustadas en los morteros de cemento.

1.2 Justificación

La corrosión del acero de refuerzo es un problema que actualmente afecta a las estructuras de concreto reforzado al ser expuestas en ambientes altamente agresivos. Las propiedades del material se van perdiendo conforme avanza el tiempo de exposición causando disminución del periodo de vida útil del concreto. Lo anterior, tiene una gran importancia sobre el estudio de este material.

Así mismo, los desechos orgánicos y sintéticos como las frutas, algunas hojas de las palmas y el plástico, en grandes cantidades es una fuente de contaminación ambiental, por lo cual, la reutilización de estos materiales presenta un recurso de bajo costo que pueden ser incorporados en la tecnología de la industria de la construcción.

Con base en lo anterior, en la presente investigación propone la incorporación de las fibras naturales (mango y hoja de palma) y sintéticas (Polietileno de alta densidad HDPE) como sustituto parcial del agregado fino

al concreto reforzado, además de utilizar inhibidor verde de la corrosión a base de extracto de cáscara de mango para obtener un material que puede mejorar las propiedades mecánicas y electroquímicas, estimando la durabilidad de las estructuras en el concreto, además de proporcionar información sobre nuevos materiales en la industria de la construcción.

1.3 Hipótesis

El uso de fibras naturales y sintéticas con diferentes relaciones y dimensiones incorporado en la pasta del concreto reforzado, así como la concentración de inhibidor verde de la corrosión, mejoran las propiedades físicas y electroquímicas de este material.

1.4 Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico y electroquímico del concreto reforzado con adición de fibras naturales y sintéticas y la incorporación de inhibidor verde a base de extracto de cascara de mango.

1.4.1 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto en las propiedades mecánicas del concreto reforzado incorporando diferentes porcentajes de fibras naturales y sintéticas.
- Analizar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo en el concreto adicionando diferentes porcentajes de fibras naturales y sintéticas.
- Evaluar la eficiencia del inhibidor verde de la corrosión a base de extracto de cascara de mango en las propiedades mecánicas y electroquímicas del concreto reforzado.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Concreto

El concreto simple es un material con características similares a las de los materiales rocosos, que se obtiene mediante la mezcla de agregados pétreos (gravas y arenas) ligados por medio de una pasta de cemento hidráulico ([Lamus y Andrade, 2015](#)).

2.2 Corrosión del acero de refuerzo en el concreto

La corrosión en las barras de acero es uno de los principales problemas que afecta a nivel global los elementos estructurales, y ocasiona la disminución de su vida útil. Las barras de acero se encuentran en un estado pasivo inmerso en el concreto, debido al alto pH de la pasta, la corrosión inicia cuando la estructura al ser expuesta a ambientes agresivos de cloruros (sales de mar); estos llegan a través de los poros en la interfaz acero/concreto e interactúan en el metal y empiezan a desprender la capa pasiva y deterioran la estructura.

La vida útil de una estructura de concreto armado se puede dividir en dos períodos de tiempo desde la perspectiva de la corrosión del refuerzo: iniciación y propagación. La iniciación se puede decir que es el tiempo necesario para que los agentes externos penetren en el concreto y causar la despasivación del acero de refuerzo, mientras que el período de propagación se caracteriza por corrosión activa, con disolución del hierro, asociada a las regiones anódicas ([Tutti, 1982](#)).

La condición de la superficie del acero y la falta de homogeneidad local en la interfaz acero-hormigón parecen tener un efecto importante en la fase de iniciación de la corrosión ([Rodríguez et. al., 2021](#)).

Así mismo, la durabilidad del concreto dependerá de la permeabilidad de este, y esta a su vez depende de factores como la capacidad y el número de

fisuras que se presenten durante y después del fraguado ([Lamus y Andrade, 2015](#)). La densidad del hormigón con una buena adherencia al acero bloquea la difusión lejos de los productos de corrosión y, por lo tanto, facilita la repasivación ([Yonezawa et. al., 1988](#)).

Las consecuencias de la corrosión en el concreto reforzado empiezan en la segunda fase (propagación) principalmente en la reducción de la sección transversal de la barra de acero, así mismo, al aumentar la cantidad de productos de corrosión disminuye la adherencia en la interfaz acero/concreto, perjudicando las propiedades mecánicas del elemento estructural. Si bien el área de la sección transversal de las barras de acero se reduce debido a la corrosión, los productos de corrosión alrededor de las barras de acero provocan una expansión volumétrica ([Bicer et. al., 2018](#)).

2.3 Procesos de corrosión

La corrosión es un proceso natural, definido como la degradación o deterioro de una sustancia y/o de sus propiedades, generalmente un metal, debido a la exposición ambiental ([Davis, 2003](#)).

Este es un proceso a medida que el metal tiende hacia el estado de energía más bajo posible. Por lo tanto, metales como el acero tienen una tendencia natural a volver a su estado de energía más bajo cuando se combina con oxígeno y agua para formar óxidos de hierro (productos de corrosión) ([Zarras y Stenger-Smith, 2014](#)).

Aunque los metales permanecen estables durante períodos muy largos en el vacío, se corroen cuando se exponen a la atmósfera o ambientes acuosos sin protección. La superficie se oxida y tienen lugar reacciones electroquímicas en la interfase entre el metal y el medio ambiente ([Souto et. al., 2007](#)).

El proceso de corrosión acuosa o, como se le llama comúnmente, húmedo consta de tres elementos importantes que son necesarios para que el proceso de corrosión pueda ocurrir: reacción anódica, reacción catódica y solución electrolítica o líquido conductor (Zarras y Stenger-Smith, 2014).

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 (Fernández, 1984).

Reacción anódica (oxidación):

La disolución del metal



Reacción catódica (Reducción)

Cualquier proceso de reducción, por ejemplo



2.4 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se considera a menudo como un indicador de la calidad del concreto porque está directamente relacionada con la estructura del concreto y de la pasta de cemento hidratada (Neville et. al., 1987). Estos parámetros o propiedades están determinados por la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos o cúbicos (Jurowski y Grzeszczyk, 2018).

Durante la etapa de diseño, los diseñadores deben dimensionar los elementos de concreto para resistir las cargas impuestas basadas en algunas clases de resistencia a la compresión. Los grados de resistencia elegidos se utilizan posteriormente para definir la mezcla de concreto para ser utilizado en la construcción (Vu et. al., 2020).

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, de acuerdo con la Norma ASTM C 39/C 39M, y la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE.

$$f'_c = \left(\frac{F}{A}\right) \quad (4)$$

2.5 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del concreto, también llamada módulo de ruptura (MOR), es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una propiedad esencial en el diseño de hormigón estructural porque afecta el agrietamiento por flexión, la resistencia al corte, las características de deflexión y relación de fragilidad del hormigón (Meisuh et. al., 2018).

Esta resistencia se determina mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

Bajo la carga del tercer punto, son posibles dos escenarios. Para fracturas que ocurren dentro del tercio medio, el MOR se calcula como; (Meisuh et. al., 2018).

$$f_r = \left(\frac{Pl}{bd^2}\right) \quad (5)$$

Donde:

f_r = Es el módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²).

P = Es la carga máxima aplicada, en N (kgf).

l = Es la distancia entre apoyos, en cm.

b = Es el ancho promedio del espécimen, en cm.

d = Es al peralte promedio del espécimen, en cm

Para fracturas que se presentan fuera del tercio medio del claro, en no más del 5% de su longitud, el MOR se calcula como;

$$f_r = \left(\frac{3Pa}{bd^2} \right) \quad (6)$$

a = Es la distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga en mm.

2.6 Resistencia al impacto Charpy

La prueba Charpy se usa comúnmente en metales, pero también se aplica a compuestos, cerámicas y polímeros. Con la prueba Charpy, comúnmente se evalúa la dureza relativa de los materiales como tal, se usa como una prueba rápida ([Demirci et. al., 2014](#)). El dispositivo de impacto Charpy consta de tres partes principales de especímenes, un yunque donde el espécimen se apoya libremente y también un péndulo con una masa definida unido a un brazo giratorio fijado en el cuerpo de la máquina ([Ghasemnejad et. al., 2010](#)). Las pruebas de impacto Charpy se realizan según normas internacionales ASTM E23 en las cuales se especifican las dimensiones de las probetas.

La energía absorbida (E_a) del material se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_a = mg(h - h') = mgL(\cos\beta - \cos\alpha) \quad (7)$$

Donde: m es la masa del péndulo, g la aceleración de la gravedad y L la longitud del brazo del péndulo, y el ángulo inicial de aplicación de la carga (α) y el ángulo final (β) ([Ortega, 2006](#)).

El cálculo de la resiliencia (R_e) se obtiene dividiendo la energía absorbida en el ensayo por el área (A) de la probeta en la zona de ruptura.

$$A = b\bar{h} - b\bar{h}talle \quad (8)$$

$$Re = \frac{Ea}{A} \quad (9)$$

2.7 Inhibidor verde de la corrosión

El inhibidor de la corrosión es una sustancia añadida en pequeña concentración a un medio, reduce eficazmente la velocidad de corrosión de un metal expuesto a ella. Los extractos de plantas se consideran una fuente de compuestos naturales que generalmente se denominan compuestos "verdes", algunos con estructura molecular bastante compleja y que tienen una variedad de propiedades físicas, químicas y biológicas, son considerados ambientalmente aceptables ([Sivakumar y Srikanth, 2020](#)).

La eficacia de estos inhibidores orgánicos de la corrosión está relacionada con la presencia de grupos funcionales polares con átomos de S, O o N en la molécula, compuestos heterocíclicos y electrones π . Los grupos funcionales polares suelen considerarse como el centro de reacción para el establecimiento del proceso de adsorción ([de Souza y Spinelli, 2009](#)).

2.8 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción se utilizan generalmente para predecir el comportamiento de adsorción del inhibidor de corrosión verde sobre la superficie. La actividad inhibidora de la corrosión se debe principalmente a la adsorción de varios componentes de las especies vegetales sobre la superficie del metal particularmente la adsorción de los constituyentes básicos como alcaloides, flavonoides, polifenoles, productos de hidrólisis de proteínas y compuestos amínicos presentes en el extracto de la planta que promueve la actividad anticorrosiva de las especies vegetales analizadas ([Sivakumar y Srikanth, 2020](#)).

Las isothermas de adsorción más utilizadas son las de Langmuir, Temkin, Frumkin y Flory-Huggins ([Rocha et. al., 2014](#); [Bajaj y Khurpade, 2024](#)).

En cada caso, una función de la superficie (θ) frente a una función de la concentración de inhibidor (C) y los parámetros de adsorción asociados se calculan a partir de la pendiente, el punto de intersección o ambos. Las funciones termodinámicas que definen la naturaleza de la interacción entre el inhibidor y el metal también pueden obtenerse a partir de algunos de estos parámetros ([Ituen et. al., 2017](#)).

La isoterma de Langmuir es quizás la más utilizada para los inhibidores de la corrosión debido a su simplicidad y en los que se basa su derivación ([Ituen et. al., 2017](#)).

Una isoterma de Langmuir ideal debe tener una pendiente igual a la unidad. Los valores de pendiente superiores o inferiores a la unidad indican que existe una interacción con la especie adsorbida ([Lima et. al., 2015](#)).

La eficacia de la inhibición (n) es directamente proporcional a la fracción de la superficie cubierta por moléculas adsorbidas (θ), que en este caso se calculó mediante la ecuación ([Rocha et. al., 2014](#)).

$$\theta = \frac{n}{100} \quad (10)$$

El cálculo de la energía libre de adsorción es una de las formas más importantes de obtener información sobre el tipo de adsorción, se puede utilizar la siguiente ecuación ([Obot et. al., 2012](#)).

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (11)$$

A partir de las intersecciones de las rectas en el eje C/θ , se calcularon los valores de la constante de equilibrio de adsorción (K) ([Gopiraman et. al., 2012](#)).

Debe tenerse en cuenta que la unidad de concentración de moléculas de agua debe ser similar a la del inhibidor, ya que se trata de un error común en muchos estudios sobre la inhibición de la corrosión. La mayoría de la literatura utiliza la concentración de agua en la unidad molar (55.5 M a 25 °C) (Rocha et. al., 2014). Por lo que la energía de adsorción (G°_{ads}) debe calcularse según la ecuación (12):

$$G^{\circ}_{ads} = -RT \ln K^{\circ} = -RT \ln (55.5 K_{ads}) \quad (12)$$

donde R es la constante de los gases, T es la temperatura y 55.5 es el calor molar de adsorción del agua.

Los valores negativos de G°_{ads} indican que las moléculas inhibidoras se adsorben espontáneamente en la superficie metálica, de lo contrario significa que no es espontánea. El mecanismo de adsorción es fisisorción cuando el valor es de $\leq -20 \text{ kJmol}^{-1}$ y quimisorción cuando los valores son $\geq -40 \text{ kJmol}^{-1}$ (Ituen et. al., 2017; Wang et. al., 2020).

2.9 Técnicas electroquímicas

Los procesos electroquímicos se basan en 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 (Segura et. al., 2016). Los procesos de corrosión generalmente se monitorean mediante el uso de técnicas electroquímicas convencionales, que permiten tanto la evaluación de las tasas de corrosión como la identificación de los mecanismos de corrosión, a medida que promedian el comportamiento electroquímico de la superficie total, la información obtenida se relaciona con las propiedades globales del sistema corrosivo (Souto et. al., 2007). En la actualidad se emplean diferentes técnicas electroquímicas para el estudio de

la corrosión en metales, en esta investigación se emplearon las técnicas electroquímicas:

- Medición del potencial de Media Celda (E_{corr})
- Ruido electroquímico (R_n)
- Resistencia a la polarización lineal (R_p)
- Espectroscopia de impedancia electroquímica.

2.9.1 Potencial de corrosión o de media celda.

La técnica de potencial de media celda en el concreto reforzado es un método sencillo y no destructivo para los elementos estructurales. De acuerdo con la norma ASTM C876 lo cual establece niveles y condiciones en la probabilidad de corrosión para las barras de refuerzo en el concreto. Con los valores de potencial registrados, es factible elaborar un diagnóstico del nivel de corrosión en las infraestructuras de concreto (Flores-Nicolás et. al., 2021). El estudio de potenciales de corrosión en las barras de refuerzo se realiza utilizando un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado (Ag/AgCl), siguiendo los parámetros de la norma basados en un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado se realizó la conversión sumando +50 mV como se muestra en la Tabla 2.1 (Berkeley et. al., 1990; Chess et. al., 1998).

Tabla 2.1. Criterio para medir el potencial de corrosión en el concreto reforzado (ASTM C876).

Potencial de corrosión (mV)		Probabilidad de corrosión
mV vs Cu/CuSO ₄	mV vs Ag/AgCl	
> -200	> -150	10% probabilidad de corrosión
Entre -200 A -350	Entre -150 A -300	Zona de Incertidumbre
< -350	< -300	90% probabilidad de corrosión

2.9.2 Ruido electroquímico

La medición del ruido electroquímico (R_n) es un método no destructivo y técnica no intrusiva capaz de monitorear cambios básicos en un sistema electroquímicamente activo. El principio del método cuando es aplicado al metal desnudo es lograr una medida de la velocidad de las reacciones electroquímicas de equilibrio a través de la reacción anódica, por ejemplo, la disolución del hierro y la reacción catódica asociada a la reducción del oxígeno (Jamli y Mills, 2016). El ruido se produce por fluctuaciones en el proceso electroquímico, y fluctuaciones más grandes suelen ser indicativo de un proceso más localizado (Al-Mazeedi et. al., 2004).

El método de medición convencional de ruido electroquímico utiliza tres electrodos, dos de estos son electrodos de trabajo, entre los que se mide el ruido de corriente electroquímica, utilizando un amperímetro de resistencia cero, de modo que los dos electrodos de trabajo tienen el mismo potencial, al mismo tiempo que se mide el ruido potencial electroquímico, como la fluctuación en el potencial del electrodo de trabajo con respecto a un electrodo de referencia (Al-Mazeedi et. al., 2004).

Otro método para medir el ruido en potencial se realiza a través de la medición de las oscilaciones del potencial de corrosión respecto a un electrodo nominalmente “idéntico”. El ruido en corriente se obtiene midiendo las oscilaciones de la corriente entre dos electrodos idéntico o de un solo electrodo bajo control potencioestático (Tamayo y Chavarín, 2002).

Es factible medir el potencial y ruido en corriente simultáneamente, y se pueden derivar parámetros adicionales utilizando los dos registros de tiempo, los parámetros más simples se obtienen por simples combinaciones de la desviación estándar (u otros parámetros estadísticos) de potencial y corriente (Cottis, 2001).

El uso de las desviaciones estándar de potencial (σV) e intensidad de corriente (σI) para la interpretación de los registros de ruido puede hacerse bien por separado, o bien mediante su cociente, denominado resistencia de ruido electroquímico (R_n) con la expresión (Sanchez et. al., 2005).

$$R_n = \left(\frac{\sigma V}{\sigma I} \right) \quad (13)$$

Varios investigadores han analizado la relación entre la resistencia de ruido (R_n) y la resistencia a la polarización (R_p) y algunos afirman que los dos son equivalentes en algunos sistemas (Cottis, 2001).

Como R_n es equivalente a la resistencia de polarización (R_p), R_p se puede reemplazar en (Ec. 14) por R_n , resultando en (Ec. 15) (Arellano-Pérez et. al., 2022; Sanchez-Amaya et. al., 2007; Stern y Geary, 1957).

$$R_p = \left(\frac{B}{i_{corr}} \right) = \quad (14)$$

$$i_{corr} = \left(\frac{B}{R_n} \right) \quad (15)$$

donde la i_{corr} representa la densidad de corrosión en corriente y B es relacionado con las pendientes de Tafel catódica (β_a) y anódica (β_c) del sistema (Arellano-Pérez et. al., 2022).

El tipo de corrosión que se presenta en el metal puede estar determinado por un parámetro estadístico del ruido electroquímico, llamado Índice de picadura o localización.

El índice de localización (Ec. 16), el cual es un parámetro que evalúa la variación del ruido en corriente y la compara con el valor medio, se calcula a través de la razón de la desviación estándar en corriente (σI) y la raíz media cuadrática de la corriente (I_{rms}) (Estupiñan-López et. al., 2011).

$$L.I = \left(\frac{\sigma I}{I_{rms}} \right) \quad (16)$$

Se demostró que el LI no está relacionado con el mecanismo de corrosión predominante, pero refleja el grado de desviación de los dos electrodos de prueba utilizados para mediciones simultáneas de las fluctuaciones de potencial y/o corriente a partir del comportamiento ideal asumido (Mansfeld et. al., 2001).

En la Tabla 2.2 se aprecia el rango de los valores de índice de localización para el tipo de corrosión en el metal (Arellano-Pérez et. al., 2022; Flores-Nicolás et. al., 2021).

Tabla 2.2. Rango de 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

Para el cálculo de 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 de acuerdo con la siguiente ecuación 17 (Lock, 1991).

$$V_{corr} = k \left(\frac{P_{eq}}{\rho} \right) i_{corr} \quad (17)$$

Donde la V_{corr} expresada en (mm/año), y k tiene un valor de 3.225×10^{-3} es el factor de conversión, P_{eq} peso equivalente del material expresado en (g/eq), ρ la densidad del material expresado en (g/cm²), i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión en $\mu A/cm^2$.

Reemplazando los valores para el estudio de la corrosión del acero la ecuación queda de la siguiente manera (Ec. 18).

$$V_{corr} = 0.011 * i_{corr} \quad (18)$$

2.9.3 Resistencia a la polarización lineal

La resistencia de polarización lineal (RPL) método propuesto por (Stern y Geary, 1957). Este método electroquímico se basa en medir la resistencia a la polarización del medio metálico mediante una corriente externa en el rango de potencial, donde se cumple un carácter lineal de la curva de polarización en las coordenadas de corriente-potencial (Faritov et. al., 2016). La pendiente de la curva resultante sobre el potencial de corrosión E_{corr} es la resistencia de polarización (Brown et. al., 2014).

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right) = \quad (19)$$

Cuando el acero de refuerzo está en la etapa de pasivación, $B = 52$ mV, y cuando el refuerzo está en la etapa de corrosión, $B = 26$ mV, β_a y β_c son constantes de Tafel en el procesos de ánodo y cátodo, de acuerdo a la siguiente expresión (Da et. al., 2018).

$$B = \left(\frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \right) = \quad (20)$$

$$i_{corr} = \left(\frac{B}{R_p} \right) \quad (21)$$

En este estudio y monitoreo de corrosión en el concreto reforzado se aplicó una constante $B = 26$ mV (Andrade et. al., 2004). En la Tabla 2.3 se muestra los rangos de valores que puede estimar la vida útil del acero de refuerzo en el concreto a partir de la densidad corriente (i_{corr}) (Andrade y alonso, 1996).

Tabla 2.3. Rango de valores en la estimación de vida útil del concreto reforzado.

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

2.9.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica para caracterizar una amplia variedad de sistemas electroquímicos y para determinar la contribución de los procesos electrolíticos o de electrodos en estos sistemas, se puede usar para investigar la dinámica de cargas enlazadas o móviles en el volumen de regiones de interfaz o cualquier material líquido o sólido y asume que un circuito relativamente elaborado puede representar el comportamiento del acero embebido dentro del concreto ([Ribeiro y Abrantes, 2016](#)).

La técnica de EIS se ha empleado para estudiar la formación de capas pasivas en diferentes metales y aleaciones, la solución altamente alcalina de los poros del concreto promueve la formación de una capa pasiva estable en la superficie de la barra de refuerzo de acero ([Sánchez et. al., 2007](#)).

Puede considerarse un método informativo debido a que no solo mide la resistencia de polarización, sino que también evalúa los procesos físicos dentro del concreto y en la interfase acero/concreto ([Sobhani y Najimi, 2013](#)).

Se aplica una perturbación inicial de corriente alterna (CA) a través de un par de electrodos debido a un voltaje de CA aplicado ([Hong y Harichandran, 2005](#)), y la respuesta del electrodo se compara midiendo el cambio de fase de los componentes de corriente y voltaje y midiendo sus amplitudes, esto se puede hacer en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia ([Ribeiro et. al., 2015](#)).

Sin embargo, la impedancia eléctrica a menudo depende de la frecuencia. Cuando la excitación, la señal es armónica, la señal de respuesta también es armónica en la misma frecuencia con una amplitud y un ángulo de fase. La impedancia, Z , es una cantidad de valor complejo y se define como la relación entre el voltaje de excitación, $V(t)$, y la corriente de respuesta, $I(t)$ ([Hong y Harichandran, 2005](#)).

$$Z = \left(\frac{V(t)}{I(t)} \right) = \quad (22)$$

Para una señal de excitación de CA armónica, $V(t)$ se puede expresar como:

$$V(t) = V_0 (\cos \omega t + j \sin \omega t) \quad (23)$$

donde ω =frecuencia natural circular del voltaje aplicado expresada en rad/s;
 V_0 =amplitud de la señal de excitación; y j =número imaginario unitario.

La respuesta de corriente armónica $I(t)$ puede expresarse como:

$$I(t) = I_0 [\cos(\omega t - \theta) + j \sin (\omega t - \theta)] \quad (24)$$

donde I_0 =amplitud de la corriente armónica; y θ =Angulo de fase.

La impedancia eléctrica en la Ec.16 es entonces:

$$Z = Z_0 (\cos \theta) + j \sin \theta) \quad (25)$$

donde $Z_0 = V_0 / I_0$ es la magnitud de la impedancia. Ambos, la magnitud y la fase varían con la frecuencia de excitación ([Hong y Harichandran, 2005](#)).

La impedancia de una resistencia, R , es $Z_R = R$ y tiene valor real. La impedancia de un capacitor C , es puramente imaginario y es $Z_C = 1/(j\omega C)$. El elemento de fase constante CPE se usa a menudo en un circuito equivalente para representar la respuesta de los sistemas electroquímicos del mundo real ([Hong y Harichandran, 2005](#)).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este capítulo describe el desarrollo de las actividades realizadas durante la tesis para la fabricación de especímenes de concreto reforzado, características físicas de los agregados fino y grueso, las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexión se efectuaron en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Autónoma del Estado de Guerrero. Las técnicas electroquímicas se realizaron en el Centro de Investigación en ingeniería y Ciencias Aplicadas, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

3.1 Nomenclatura

La nomenclatura para los ensayos de las pruebas de resistencia a compresión, flexión y técnicas electroquímicas se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Nomenclatura empleada para las pruebas mecánicas y electroquímicas.

Diseño	Tipo de fibra	Porcentaje de fibras	Dimensiones fibras	Clave
Concreto (C)	--	--	--	C-00
	Mango (M)	0.2	Largas (L)	ML-02
	Mango (M)	0.4	Largas (L)	ML-04
	Palma (P)	0.2	Largas (L)	PL-02
	Palma (P)	0.4	Largas (L)	PL-04
	HDPE (H)	0.2	Largas (L)	HL-02
	HDPE (H)	0.4	Largas (L)	HL-02
	Mango (M)	0.2	Cortas (C)	MC-02
	Mango (M)	0.4	Cortas (C)	MC-04
	Palma (P)	0.2	Cortas (C)	PC-02
	Palma (P)	0.4	Cortas (C)	PC-04
	HDPE (H)	0.2	Cortas (C)	HC-02
	HDPE (H)	0.4	Cortas (C)	HC-02
	Mango (M)	0.2	Cortas Tratadas (CT)	MCT-02
	Mango (M)	0.4	Cortas Tratadas (CT)	MCT-04
	Palma (P)	0.2	Cortas Tratadas (CT)	PCT-02
	Palma (P)	0.4	Cortas Tratadas (CT)	PCT-04
	Inhibidor (H)	50 ppm	-	CH-50
	Inhibidor fibra M	0.2	Cortas (C)	CHM-02
Pruebas de impacto Charpy	Mortero	--	---	Co
	Mango (M)	0.2	Cortas (C)	Mc
	Palma (P)	0.2	Cortas (C)	Pc
	HDPE (H)	0.2	Cortas (C)	Hc

Donde se muestra el tipo de fibra empleado en las muestras, seguido del porcentaje de contenido de fibras, después la dimensión de fibras y finalmente, se muestra la clave de identificación de las probetas. Para las pruebas de impacto Charpy se agregó una nomenclatura diferente debido a que se realizó una pasta de mortero, sin la presencia de grava por lo limitado de la prueba.

3.2 Reciclado de las fibras naturales

El reciclado de las fibras naturales se explica en el diagrama de flujo Figura 3.1

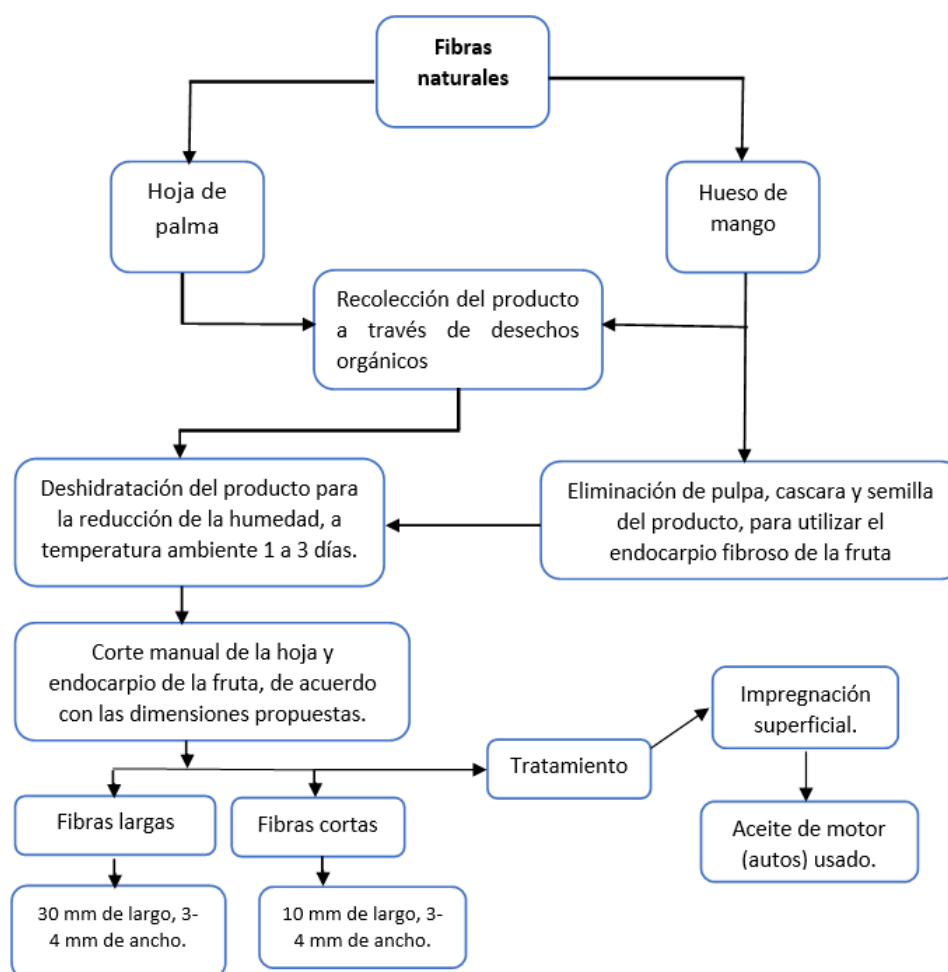


Figura 3.1 Obtención de fibras naturales.

La obtención de los diferentes tipos de fibras naturales fue a través de la recolección de los desechos orgánicos, en el caso del mango se realizó la eliminación de la pulpa, cascara y semilla, consiguiendo el hueso como parte final del material. Se realizó una limpieza previa y posteriormente el deshidratado de las mismas piezas como se observa en la Figura 3.2.

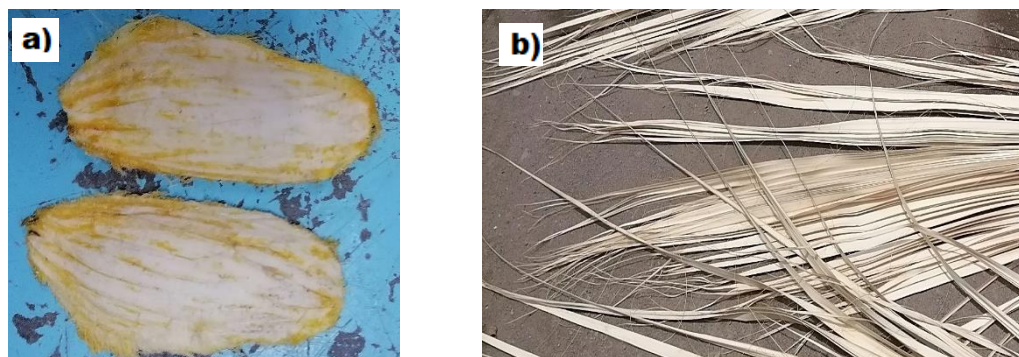


Figura 3.2. a) Limpieza del hueso del mango **b)** Deshidratado de las hojas de palma.

Las fibras naturales largas se cortaron de manera manual, con dimensiones 30 mm de largo y 3-4 mm de ancho, las fibras cortas con dimensiones de 10 mm de largo y 3-4 mm de ancho, como se aprecia en la Figura 3.3.

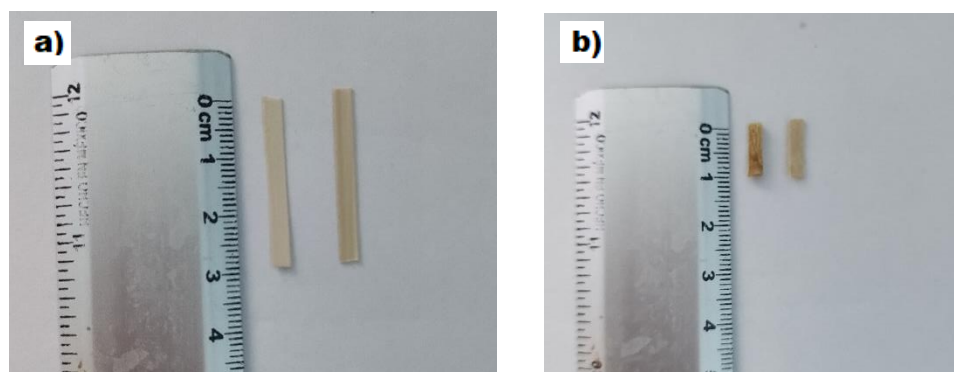


Figura 3.3. Dimensiones de las fibras naturales a) fibra larga palma **b)** fibra corta mango.

3.3 Reciclado de las Fibras HDPE

El reciclado de las fibras HDPE, se realizó con el diagrama de flujo de la Figura 3.4.

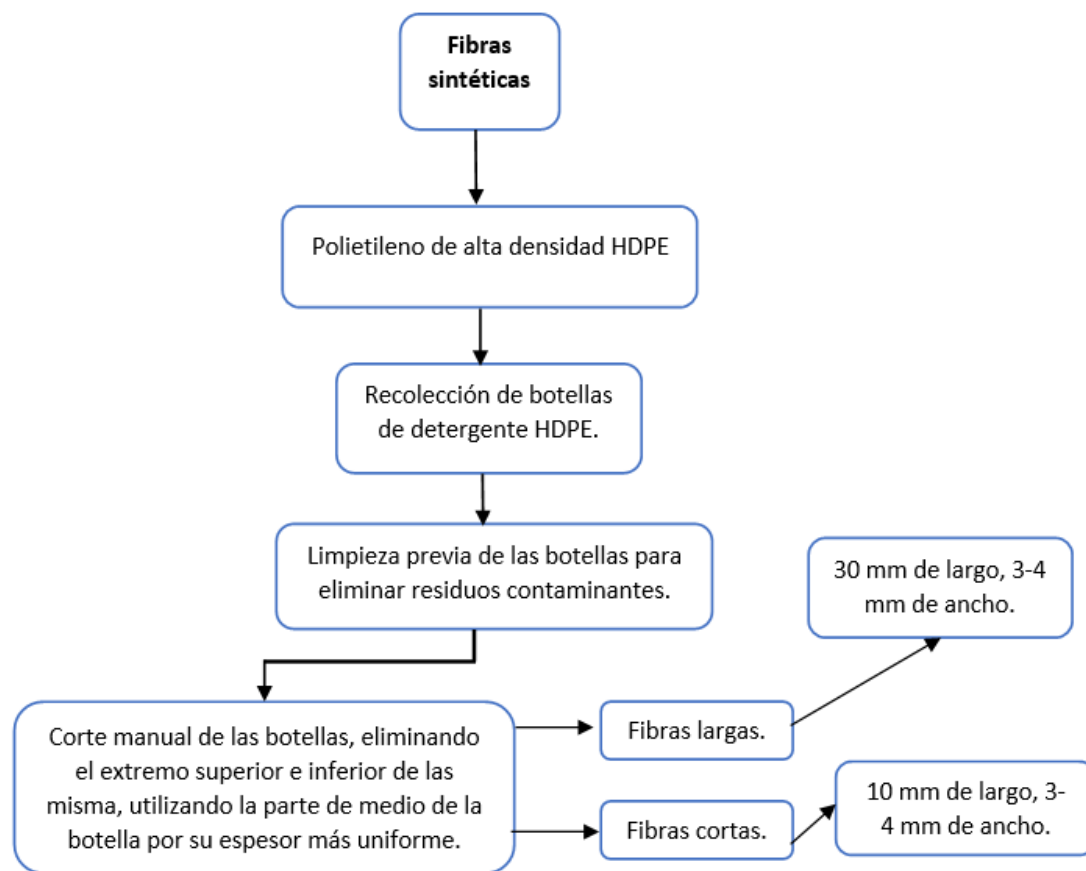


Figura 3.4. Obtención de fibras HDPE.

La obtención de las fibras se realizó a partir de la recolección del post-producto de las botellas de detergente de uso común, se limpiaron previamente eliminando contaminantes de grasa, polvo. Las dimensiones de las fibras HDPE son con longitud de 30 mm, 10 mm, espesor 0.01 mm y de ancho 3-4 mm.

3.4 Características físicas de las fibras

3.4.1 Determinación del contenido de humedad

Como la mayoría de los materiales lignocelulósicos, el contenido de agua en equilibrio de las fibras vegetales depende de la temperatura, las propiedades físicas y especialmente la humedad relativa (Bouasker et. al., 2014). El contenido de humedad de las fibras se evaluó a temperatura ambiente, por el método de diferencia de peso (Moreno et. al., 2007).

Se determinó el peso seco a temperatura ambiente de una muestra de 30 haces para las fibras de mango y palma y 50 haces de HDPE en una báscula electrónica Denver Instrument con precisión 0.0001 g como se muestra en la Figura 3.5. El proceso de secado de la fibra se realizó a 70 °C durante una hora, finalmente se pesó nuevamente para determinar su peso seco.

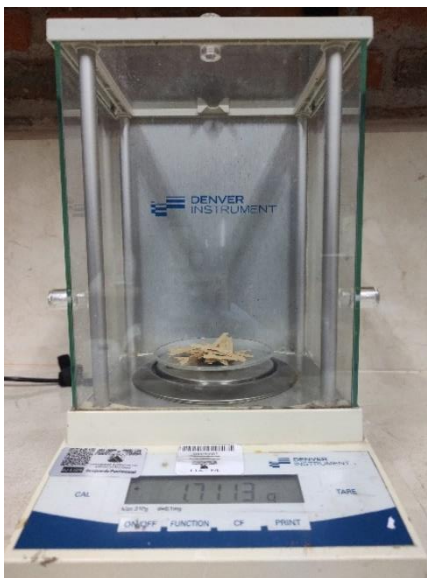


Figura 3.5. Medición del peso de las fibras naturales.

El porcentaje de contenido de humedad se calculó a partir de la siguiente expresión (López et. al., 2013):

$$\%H = \left(\frac{P_h - P_o}{P_h} \right) * 100 = \quad (26)$$

Donde: %H es el porcentaje de humedad, P_h es el peso seco ambiente y P_o es el peso seco a 70 °C.

3.4.2 Determinación del porcentaje de absorción de humedad

Para determinar el porcentaje de absorción se tomó una muestra de 30 haces de fibras mango y palma y 50 haces de HDPE, se sumergieron en agua destilada durante 24 horas como se observa en la Figura 3.6. Posteriormente, se tomó la muestra del material saturado en agua destilada y con una tela absorbente se secó el exceso del agua del material, hasta obtener un secado superficial. Finalmente, la muestra superficialmente seca se pesó y se realizó el proceso de secado a 70 °C durante una hora, para nuevamente ser pesada la muestra. Las fibras son capaces de absorber una masa de agua mayor que su propio peso (Bouasker et. al., 2014).

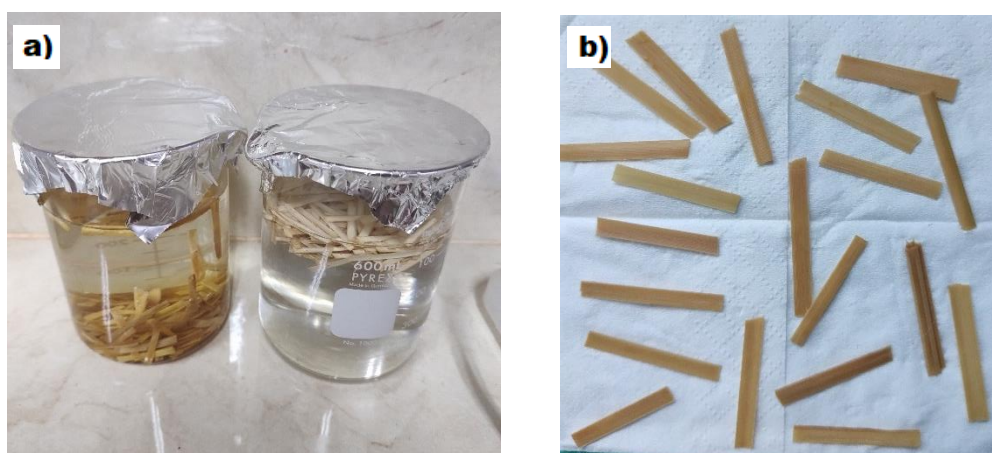


Figura 3.6. a) Saturación de las fibras b) Secado superficial de las fibras.

El porcentaje de contenido de absorción se determinó a partir de la Ec.27.

$$\%A = \left(\frac{P_{hs} - P_0}{P_{hs}} \right) * 100 = \quad (27)$$

Donde: %A es el porcentaje de absorción, P_{hs} es el peso húmedo saturado y P_0 es el peso seco a 70 °C.

3.4.3 Determinación de la densidad

La relación de peso (m) y volumen (v) determina la densidad de la fibra (Sathishkumar et. al., 2013). Para determinar la densidad aparente se utilizó el método de desplazamiento de volumen, se tomaron 30 haces de fibras saturadas durante 24 horas, posteriormente se pesaron en la báscula electrónica, las muestras se colocaron en probetas de 50 ml, agregando agua destilada a una afore de 30 ml como se observa en la Figura 3.7. Las fibras fueron completamente sumergidas en agua destilada y el desplazamiento de volumen se obtuvo de acuerdo con la Ec:

$$\rho = \left(\frac{m}{v} \right) = \quad (28)$$

Donde: ρ es la densidad, m la masa promedio de las fibras saturadas y v es el volumen desalojado.



Figura 3.7. Densidad de las fibras.

3.5 Tratamiento de las fibras naturales

El tratamiento superficial de las fibras altera las energías superficiales y características estructurales de las fibras naturales a través de la modificación de superficies poco profundas de pared celular sin afectar su composición química (Ferreira et. al., 2019).

Para el tratamiento superficial de las fibras se utilizó una sustancia con característica hidrófoba, de fácil obtención, reciclado y económico, con la finalidad de disminuir la alta absorción de agua, y dar protección al alto pH alcalino del concreto. Se utilizó aceite de motor usado o comúnmente llamado aceite quemado, las propiedades químicas se aprecian en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Propiedades químicas del aceite de motor usado.

Composición química	Aceite de motor usado (%)	Referencia
Azufre (SO ₃)	31- 37	(Assaad et. al., 2013; Shafiq et. al., 2018).
Cloruro (Cl-)	14.9-15.9	(Assaad et. al., 2013; Shafiq et. al., 2018).
Contenido principal (mg/kg)	3.6	(Assaad et. al., 2013).
Zinc (ZnO)	17.7-19.2	(Assaad et. al., 2013; Shafiq et. al., 2018).
Nitrito (Ni)	5.5	(Assaad et. al., 2013).
P ₂ O ₅	8.95	(Shafiq et. al., 2018).
Otros	4.12	(Shafiq et. al., 2018).

Se realizó el tratamiento superficial de las fibras utilizando impregnación por capilaridad. Se tomaron 30 haces de fibras naturales cortas de mango y 50 haces de fibras cortas de palma, debido a que estas geometrías de fibras presentaron la mejor respuesta en las propiedades mecánicas del concreto. Posteriormente, se sumergieron en el aceite quemado, a una temperatura de 70 °C durante 5, 15, y 30 minutos. Buscando que la sustancia penetrara completamente la fibra como se aprecia en la Figura 3.8.

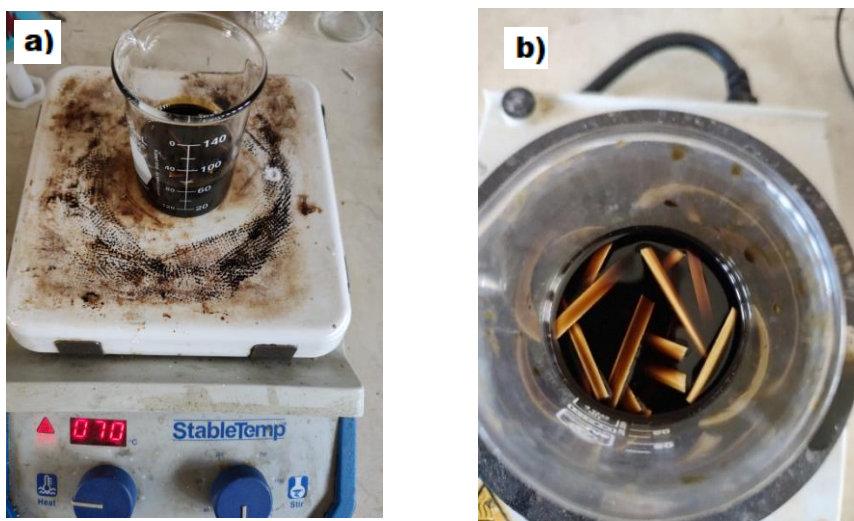


Figura 3.8. a) impregnación superficial de las fibras **b)** saturación de fibras durante 5 minutos.

Posteriormente, se determinó la absorción de humedad, saturando la fibra en agua destilada durante 24 horas como se aprecia en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Saturación de las fibras tratadas.

Con una tela absorbente se quitó el exceso de agua hasta tener un secado superficial de la fibra ver en la Figura 3.10, después se pesó y se secó la muestra a temperatura de 70 °C durante una hora, para finalmente ser

pesado. Se utilizó la ecuación (27) para el cálculo de absorción, los resultados se compararon con los diferentes tiempos de inmersión.



Figura 3.10. Secado superficial de las fibras tratadas.

3.6 Características mecánicas de las fibras naturales.

3.6.1 Ensayo de tensión de las fibras

Para las pruebas de tensión de las fibras naturales y sintéticas se utilizó una prensa universal marca MTS modelo 3156, de 2000 KN de carga máxima. Se fabricaron probetas de tipo I para las fibras de plástico y tipo IV para las fibras naturales, en forma de hueso de acuerdo con los parámetros de la norma ASTM D-638, las dimensiones se muestran en la Figura 3.11.

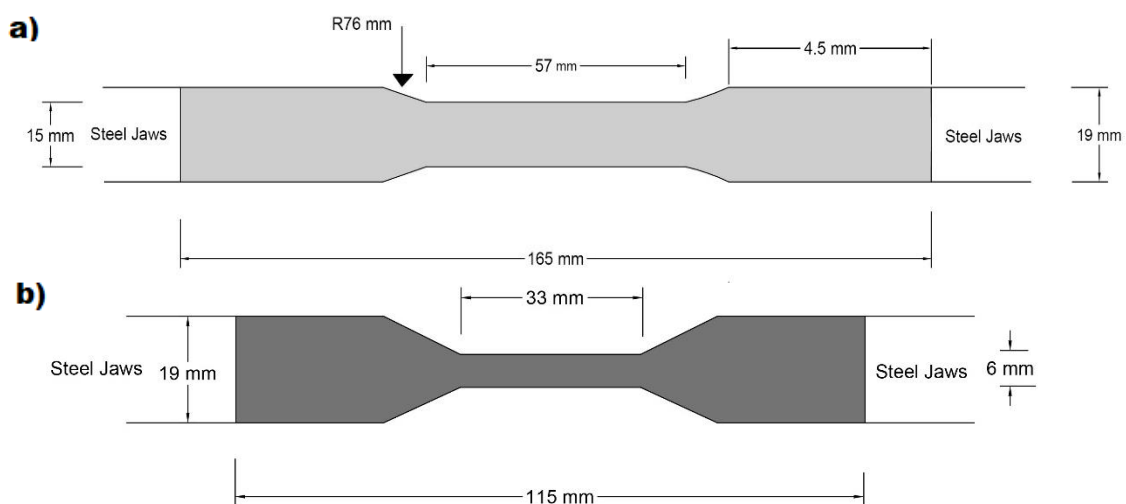


Figura 3.11. Dimensiones de la probeta **a)** sintéticas **b)** naturales.

La resistencia a la tensión de las fibras (σ) se calcula dividiendo el esfuerzo máximo (F_{max}) obtenido durante el ensayo entre el área de la sección (A) de la probeta.

$$\sigma = \left(\frac{F_{max}}{A} \right) \quad (29)$$

El módulo elástico (E) se calculó como la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación.

$$E = \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \right) \quad (30)$$

La tenacidad se utiliza para describir una combinación de propiedades de resistencia y ductilidad evaluando el área total bajo la curva tensión-deformación (Foulk et. al., 2004).

3.7 Extracto etanólico de cáscara de mango para inhibidor de la corrosión

La maceración es un proceso de extracción que consiste en sumergir una muestra en un disolvente orgánico a temperatura ambiente. También se denomina digestión del material vegetal en una solución de extracción como agua, etanol o metanol. El material de desecho restante se deposita en el fondo como sedimento. Luego, la solución de extracción se separa mediante un proceso de filtración (Muliastri et. al., 2021). El extracto de Mango se realizó con el método de maceración de acuerdo con el procedimiento descrito por algunos autores, con ligeras modificaciones (Safdar et. al., 2017; Adilah et. al., 2018). El proceso de extracción del inhibidor verde se observa en la Figura 3.12, las cáscaras de mango se secaron a temperatura ambiente durante 3 o 4 días, después se vertieron en botellas de vidrio y se remojaron en 500 ml de etanol durante 48 horas. Durante las 48 horas, la mezcla se filtró a través de un papel filtro, los residuos de la cáscara se maceraron por segunda vez con el objetivo de maximizar el proceso de extracción, y ambos volúmenes conseguidos se combinaron.

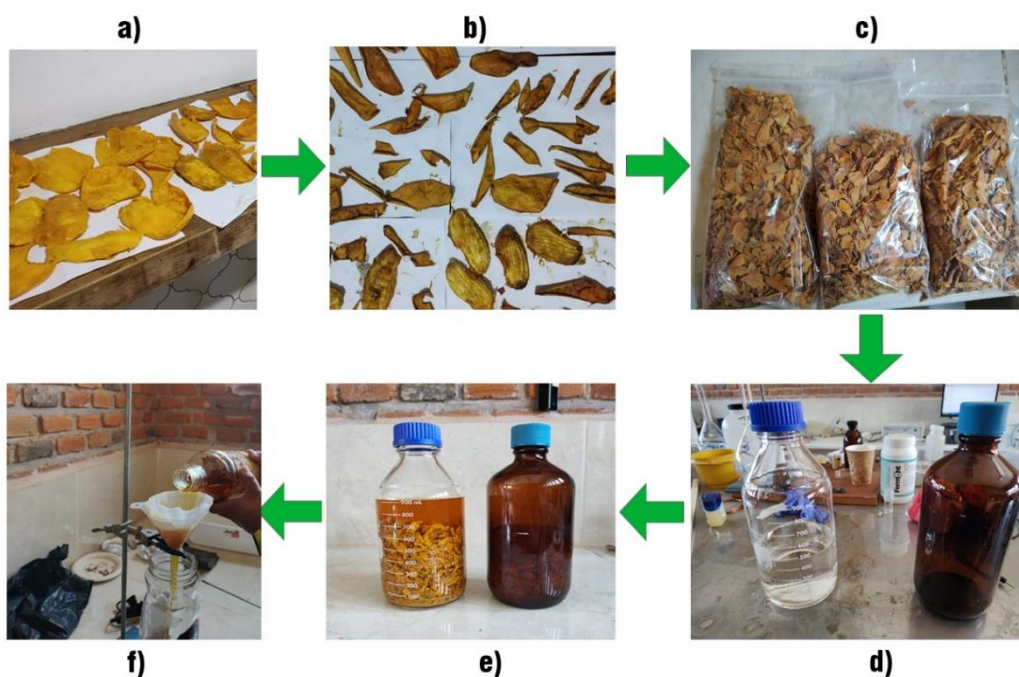


Figura 3.12. Maceración medio ambiente **a)** Cascara de mango **b)** Deshidratación 3-5 días de la fruta protegiendo de la luz solar **c)** almacenamiento de la cascara seca **d)** solvente etanol **e)** 3-4 días sumergido la cascara de mango en el solvente **f)** destilación.

Para eliminar la cantidad de exceso del solvente se realizó la destilación a presión reducida con un rota vapor, como se muestra en la Figura 3.13.



Figura 3.13. Equipo de destilación evaporador rotativo.

Después las muestras se colocaron en un horno de secado a 70 °C durante 24 horas, para acelerar el proceso de evaporación del solvente como se aprecia en la Figura 3.14.



Figura 3.14. Horno de secado, par de muestras con inhibidor.

La masa total del extracto de mango fue de 82.27 g, se empleó un material vegetal total de 688.6 g. Con base a estos datos se obtuvo un rendimiento de la extracción del inhibidor de 11.94% de acuerdo con la siguiente formula (Sathish et. al., 2023; Flórez Arroyave, 2016):

$$\text{Rendimiento inhibidor} = \left(\frac{\text{Extracto obtenido}}{\text{material vegetal usado}} \right) \times 100 \quad (31)$$

3.7.1 Caracterización química del extracto de mango

La caracterización de los compuestos químicos presentes en el extracto de mango se realizó a través del análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) en un rango de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} (Ramezanzadeh et al., 2019), y se utilizó un equipo Varian 660-IR spectrophotometer. Así mismo, se realizaron los espectros de absorción mediante Genesys 10S UV-Vis spectrophotometer en intervalo de longitud de onda de 200-800 nm (Desalegn et. al., 2019).

3.7.2 Preparación de la superficie metálica y la solución.

Se prepararon cupones de electrodos de trabajo W para las pruebas electroquímicas del acero dulce, se encapsularon varillas de acero al carbono de diámetro 3/8" en resina epoxi con un área expuesta de 0.71 cm² como se observa en la Figura 3.15.

La superficie expuesta del acero fue pulida mecánicamente con papel lija de 400 y 600 posteriormente lavado con agua destilada y después secado.



Figura 3.15. Cupones de acero dulce.

El inhibidor verde se disolvió 0.1 g en 100ml de agua destilada, posteriormente, el acero dulce se colocó en una solución salina, 3% en peso de cloruro de sodio (NaCl) que contenía 20, 50 y 100 ppm del inhibidor de extracto de Mango.

3.7.3 Mediciones electroquímicas del inhibidor en el acero dulce

Se realizaron las mediciones de curvas de polarización potenciodinámica del proceso de inhibición del extracto de mango sobre la corrosión del acero, se utilizó una celda electroquímica compuesta por un electrodo de trabajo (w1), se utilizó electrodo de referencia de plata-cloruro de plata saturado (Ag/AgCl) y cerrando el circuito se utilizó un tercer electrodo auxiliar compuesto de una barra de grafito como se observa en la Figura 3.16.

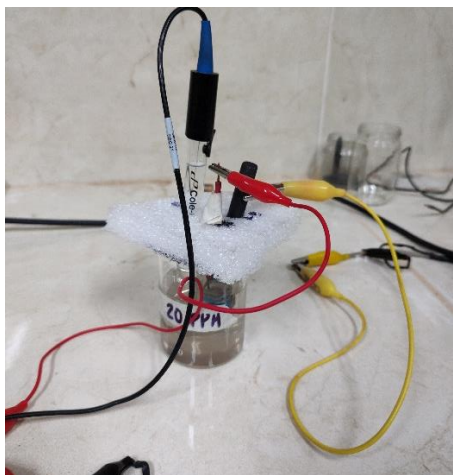


Figura 3.16. Celda electroquímica.

Para hacer las curvas de polarización se aplicó una señal de voltaje en el intervalo de -1000 mV a +500 mV, con una velocidad de barrido de 100 mV/min. La corrosión de las muestras tiene una relación directa con la densidad de corriente (i_{corr}) y una relación inversa con el potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistencia a la polarización (R_p); todos estos valores se obtuvieron extrapolando las pendiente anódica y catódica de la curva de polarización (Veedu et. al., 2019). La eficiencia de inhibición de la corrosión se ha calculado utilizando la siguiente relación (Benali et. al., 2013; Mehdipour et. al., 2015):

$$\eta\% = \left(\frac{i_{corr}(0) - i_{corr}(inh)}{i_{corr}(0)} \right) \times 100 \quad (32)$$

Donde η representa la eficiencia del inhibidor, $i_{corr}(inh)$ y $i_{corr}(0)$ representa la presencia y ausencia del inhibidor respectivamente, que se obtienen a partir de las curvas de polarización.

Previamente se realizó un estudio y análisis sobre el potencial de inhibición del extracto etanólico de mango en la corrosión del acero dulce, con el objetivo de obtener la eficiencia y concentración óptima del inhibidor para la elaboración de muestras de concreto.

3.8 Materiales utilizados para la elaboración de concreto.

Se presenta una lista de los materiales para la elaboración de muestras de concreto.

- Agua de red pública.
- Cemento Portland CPC 30 RS de acuerdo con la norma ASTM C-150.
- Arena del río Mezcala, región centro, Guerrero, México; y grava triturada tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4") de la misma región especificado por la norma ASTM C-136.
- Fibras sintéticas de HDPE cortas y largas a partir de botellas de detergente.
- Fibras naturales cortas y largas a partir de hoja de palma y el endocarpio del mango (ataulfo).
- Varilla de acero de bajo carbono 1018 (3/8").
- Cloruro de sodio NaCl.
- Inhibidor de la corrosión.

Estos materiales mencionados se provieron de casas de materiales de la región centro del Estado de Guerrero. Las barras de acero se limpiaron previamente por medio de una lija, removiendo la parte de óxido de la superficie para su uso en la mezcla de concreto. En la Figura 3.17, se observa los materiales empleados para la dosificación de la mezcla de concreto.



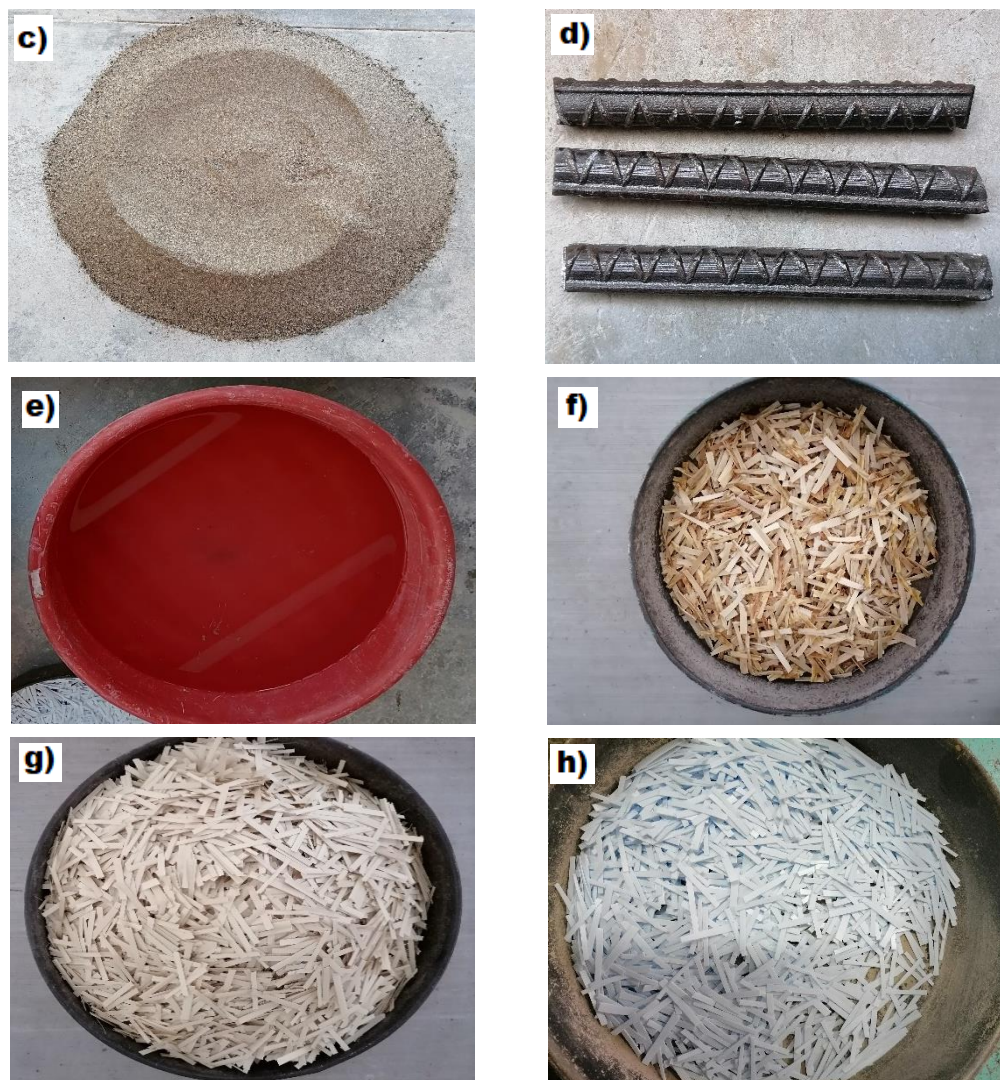


Figura 3.17. Materiales para la elaboración de concreto, **a)** cemento **b)** Agregado grueso **c)** Agregado fino **d)** barra de acero **e)** agua de la red pública **f)** fibra larga de mango **g)** fibra larga de palma **h)** fibra larga de polietileno de alta densidad.

Posteriormente, se colocó cinta de teflón alrededor de la varilla de acero aproximadamente de 2.5 cm, sobre la interfaz de la pasta con la barra de acero, aislando del medio ambiente.

Se realizaron las pruebas físicas a los agregados fino y grueso para las proporciones del diseño del concreto como; granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico varillado y suelto, módulo de finura, los resultados obtenidos se observan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades físicas de los agregados.

Datos de los materiales			
Propiedades físicas	Agregado grueso	Agregado fino	Cemento
Peso volumétrico seco suelto (PVSS) (kg/m ³)	1477.09	1546.06	--
Peso volumétrico varillado Suelto (PVVS) (kg/m ³)	1573.99	1649.36	--
Densidad (gr/cm ³)	2.70	2.47	3.01
% Absorción	0.39	2.13	--
T.M.N.A (mm)	19.00	4.75	--
Módulo de Finura	--	2.33	--
Banco	Piedra triturada	Rio Mezcala	--

3.9 Dosificación del concreto y mortero

En las Tablas 3.4 y 3.5 se muestra las proporciones de los componentes para 1 m³ de concreto, se diseñó una mezcla teórica de 300 kg/cm², agregando porcentaje de fibra de 0.2 % y 0.4% con respecto al peso del agregado fino. En la Tabla 3.6 se muestra los diseños de concreto con la incorporación de las fibras de palma, mango y HDPE. Se aprecia que la relación agua/cemento es de 0.54. No se utilizó aditivo a la pasta, y las cantidades de agua, cemento y grava, no se modificaron. En la incorporación del inhibidor de las muestras CH-50 y CHM-02, se observa que la cantidad de agua disminuyó debido a la adición del inhibidor en 50 ppm. La Tabla 3.7 se observa la dosificación para 1 m³ de mortero en las pruebas de impacto por el método de Charpy.

Tabla 3.4. Diseño de mezcla para concreto de F'c= 300 Kg/cm².

Material	Porción por m ³	Porción unitaria en peso (kg)	Proporción por 50 kg cemento	Proporción en botes con respecto a bulto de cemento	Observaciones
Cemento (Kg)	366.07	1.000	50	1	Arena 1546.06 MVSS
Agua (l)	197.65	0.540	27	1.5	
Arena (Kg)	650.63	1.777	89	3.2	
Grava (Kg)	1047.65	2.862	143	5.4	Grava 1477.09 MVSS
Fibra	0	0.000	0.000	0.000	
Suma	2262.00				

Tabla 3.5. Porcentajes de fibra con respecto al agregado fino 1 m³.

% Arena	% Fibra	Cantidades de Arena (Kg)	Cantidades de fibra (Kg)	Total (Kg)
100	0	650.63	0	650.63
99.8	0.2	649.33	1.30	650.63
99.6	0.4	648.03	2.60	650.63

Tabla 3.6. Dosificación de diseño de mezcla para 80 l de concreto con inhibidor, fibras largas, cortas y tratadas.

<i>Material</i>	<i>C-00</i>	<i>0.2% de fibra</i>	<i>0.4% de fibra</i>	<i>CH-50</i>	<i>CHM-02</i>
Cemento (Kg)	13.545	13.545	13.545	13.545	13.545
Agua (l)	7.313	7.313	7.313	6.948	6.948
a/c	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Arena (Kg)	24.073	24.025	23.977	24.073	24.025
Grava (Kg)	38.763	38.763	38.763	38.763	38.763
Fibra (Kg)	0	0.048	0.096	--	0.048
Inhibidor (l)	--	--	--	0.365	0.365
Suma	83.7	83.7	83.7	83.7	83.7

Tabla 3.7. Dosificación de diseño de mezcla de mortero para 1 m³.

<i>Material</i>	<i>Co</i>	<i>Mc</i>	<i>Pc</i>	<i>Hc</i>
Cemento (Kg)	366.1	366.1	366.1	366.1
Agua (l)	197.7	197.7	197.7	197.7
a/c	0.54	0.54	0.54	0.54
Arena (Kg)	1698.3	1694.9	1694.9	1694.9
Fibra (Kg)	----	3.4	3.4	3.4

3.10 Elaboración del concreto

Para la fabricación del concreto, se pesaron los materiales a utilizar de acuerdo con el diseño de dosificación. Se utilizaron 2 recipientes con capacidad de 40 litros cada uno, por lo cual la mezcla total fue de 80 litros. El vaciado del material se realizó en el siguiente orden: agregado grueso, después el agua, agregado fino, cemento, finalmente la incorporación de las fibras naturales o sintéticas, distribuyéndolo alrededor de la pasta de manera aleatoria, como se muestra en la Figura 3.18.

Para la fabricación del concreto con inhibidor de mango se mezcló el inhibidor a la concentración óptima con el agua de mezclado de la pasta.



Figura 3.18. a) pesos de los materiales **b)** incorporación de las fibras naturales de manera aleatoria.

Después de vaciar todos los materiales, se dio un tiempo de 4 minutos a la revoltura de la pasta, posteriormente se dejó reposar 2 min. En este tiempo con una varilla se procedió a despegar parte del concreto en las zonas reducidas de la olla, con la finalidad de evitar grumos a la pasta. Así mismo, con una jerga húmeda se tapó la parte principal de la olla, finalmente se procedió a revolver 3 min más para vaciarlo en los moldes como se observa en la Figura 3.19.

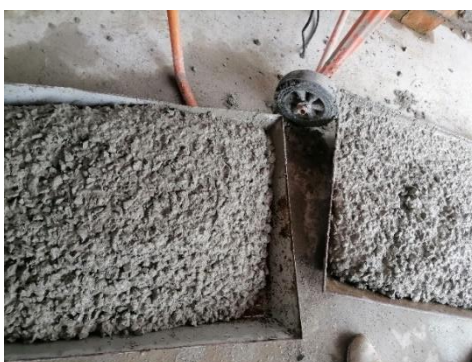


Figura 3.19. Moldes para la mezcla de concreto.

Al concreto recién mezclado se le realizaron las pruebas físicas de revenimiento, temperatura del concreto, masa unitaria y contenido de aire en

la mezcla, de acuerdo con las normas ASTM C- 143, C- 1064, C- 138, y C- 231 con la finalidad de tener un mejor control de calidad y consistencia en la pasta de concreto, de acuerdo con el diseño propuesto y así obtener resultados confiables con las especificaciones internacionales, como se aprecia en la Figura 3.20.

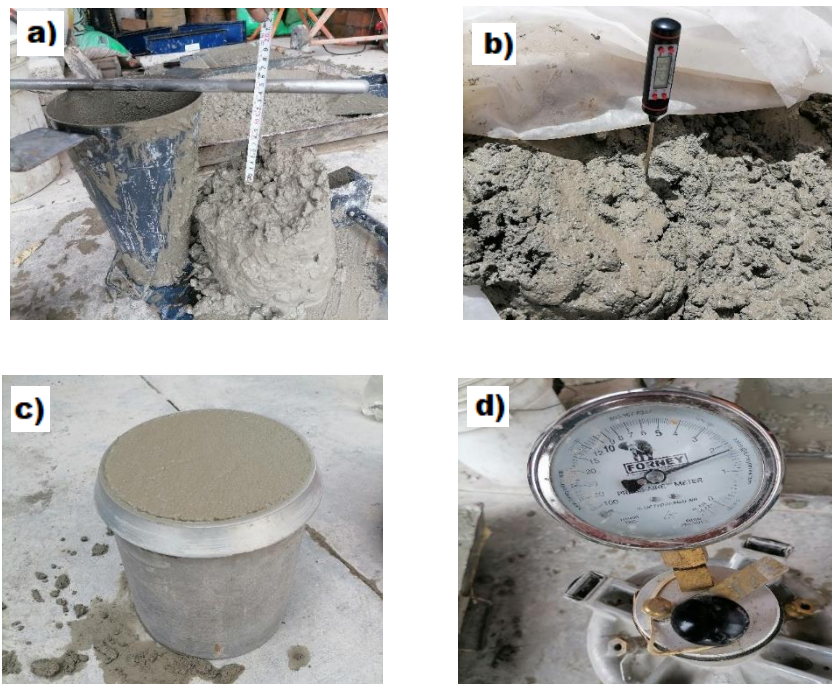


Figura 3.20. a) Revenimiento b) Temperatura del concreto c) Masa unitaria d) contenido de aire.

3.10.1 Elaboración de especímenes

Se elaboraron 6 probetas cilíndricas por cada diseño con dimensiones estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de acuerdo con la norma ASTM C-31, para su ensayo a compresión. Se llenó el molde de concreto en 3 capas iguales, cada capa se compactó con 25 golpes con la varilla de apisonamiento, después de compactar cada capa se golpeó con un mazo de hule los lados exteriores del cilindro de 10 a 15 veces. Finalmente, en la última capa se enrazó con una regla metálica enrazadora, dejando la parte superior uniforme como se observa en la Figura 3.21 a, después los cilindros

se colocaron en un lugar limpio y uniforme para evitar movimiento durante el fraguado, se protegió el cilindro de la contaminación a través de esta tapa del molde o bolsa de plástico como se observa en la Figura 3.21 b).

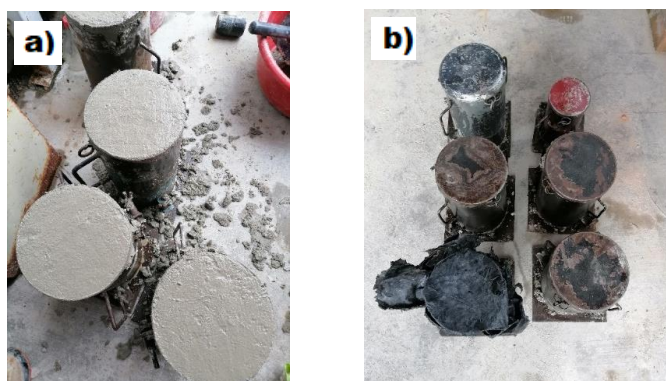


Figura 3.21. a) Enrase de las probetas de concreto **b)** Protección del cilindro por contaminación.

Se elaboraron 9 vigas de concreto rectangulares con moldes de acero de dimensiones 50 cm de largo, 15 cm de ancho y 15 de altura, de acuerdo con la norma ASTM C-31. Las vigas se realizaron del equivalente del diseño de concreto, se llenó en 2 capas de igual proporción. Se compactó con 54 golpes distribuidos alrededor del molde como se aprecia en la Figura 3.22 a. Después, se golpeó 25 veces con el mazo de hule en los lados exteriores del molde para una mejor mezcla homogénea. Finalmente, se enrazó la parte final de la capa con el objetivo de tener una superficie lisa, para las pruebas de flexión Figura 3.22 b).



Figura 3.22. a) Varillado del concreto **b)** Enrazado del concreto.

Para las pruebas de impacto a través del método Charpy, se elaboraron 10 probetas prismáticas de cada muestra, de acuerdo con la norma ASTM E23 se realizó el espécimen Charpy A, la muesca se encuentra en el centro de la longitud total del espécimen, tiene una forma de tipo V, a un ángulo de 45° como se observa en la Figura 3.23.

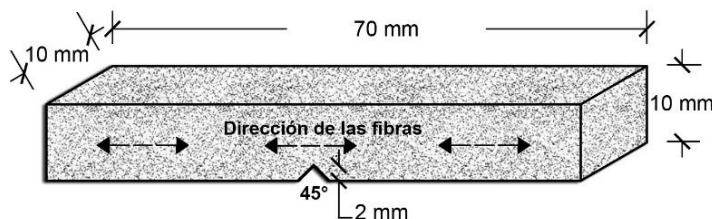


Figura 3.23. Probetas para prueba Charpy, con muesca V.

Se elaboró una pasta de mortero debido a lo limitado del tamaño de la probeta, así mismo, se agregó fibras cortas de mango, palma y HDPE en un porcentaje de 0.2%. La dirección de las fibras cortas se realizó en sentido horizontal distribuida a lo largo de la probeta. Algunos autores han planteado la necesidad de un método estandarizado para la prueba de impacto Charpy de una composición de cemento ([Thomas y Sorensen, 2018](#)). La limitación de la prueba Charpy se basa en el tamaño máximo de agregados, debido a que las probetas necesitan tamaños pequeños, es por eso por lo que algunos autores han realizado pasta de cemento endurecido, mortero o sin áridos ([Thomas y Sorensen, 2018](#)).

Para las pruebas electroquímicas se elaboraron de la misma mezcla de concretos cubos de dimensiones 12 cm de largo, 8 cm de ancho y 12 de altura como se observa en la Figura 3.24, se incrustaron 3 varillas de acero de bajo carbón n° 1018, en la parte de la interfaz acero/concreto se aisló con cinta de teflón para evitar contaminación. Los cubos de concreto se diseñaron con un recubrimiento de 3.5 cm, simulando estructuras de

concreto expuestos en ambientes agresivos, el área expuesta de las varillas de acero en contacto con el concreto fue de 22.30 cm^2 .

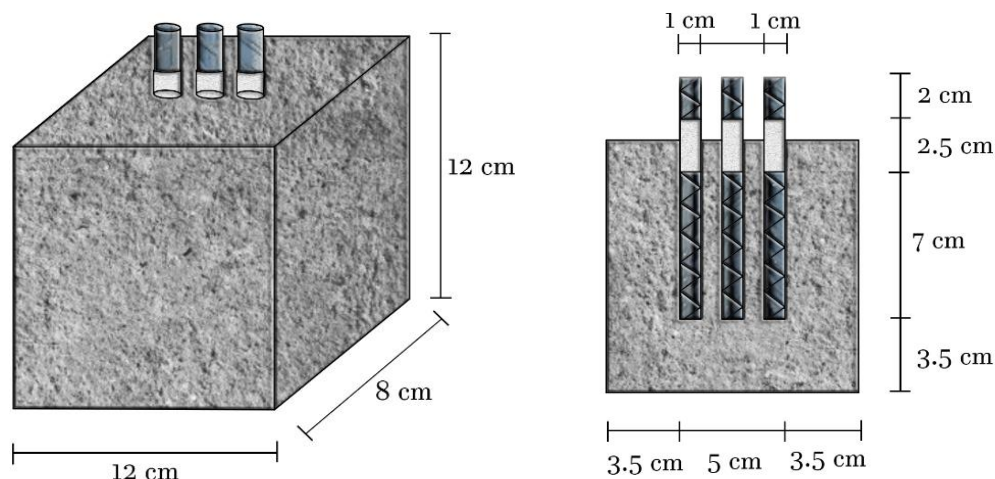


Figura 3.24. Dimensiones de los especímenes cúbicos para las técnicas electroquímicas.

3.10.2 Curado de especímenes

Las muestras estuvieron 24 horas en un lugar limpio y liso, posteriormente se desmoldaron y transportaron en un cuarto con condiciones adecuadas de humedad, las muestras cilíndricas, cubicas y rectangulares, siempre permanecieron inmersas en agua durante un periodo de 28 días como se observa en la Figura 3.25.



Figura 3.25. Curado de probetas cilíndricas.

Después del curado a 28 días, las muestras cubicas se expusieron en un ambiente agresivo salino (agua con 3% de cloruro de sodio NaCl en peso), simulando el contacto directo de las estructuras de concreto a las sales de mar, como se muestra en la Figura 3.26.



Figura 3.26. Muestras inmersas en ambiente salino 3% de cloruro de sodio.

3.11 Técnicas electroquímicas

En este estudio se realizó las técnicas de potencial de media celda, ruido electroquímico (R_n), resistencia a la polarización lineal (RPL) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), para el análisis de los procesos de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

3.11.1 Potencial de media celda

Se monitoreó los potenciales de corrosión electroquímico del acero embebido en el concreto, comparando sus potenciales, con respecto a un potencial de referencia Ag/AgCl. Las mediciones se realizaron 24 horas después de sumergir las muestras parcialmente en la solución, en un periodo semanal, durante 365 días. Se utilizó un cable en serie con Multímetro y un interruptor que conecta los dos electrodos, de trabajo y de referencia como se muestra en la Figura 3.27. Se determinó y reportó el promedio de las mediciones de las 3 lecturas de cada electrodo de trabajo (barras de acero).



Figura 3.27. Medición del potencial de media cea en el acero de refuerzo.

3.11.2 Medición de ruido electroquímico

Para la medición de ruido electroquímico se utilizó equipo potenciostato, marca Gill AC-ACM Instruments. La configuración de la celda electroquímica se efectuó con dos electrodos de trabajo w_1 y w_2 , el tercer electrodo de acero nominalmente idéntico como contraelectrodo y un electrodo de referencia de Ag/AgCl, como se observa en la Figura 3.28.

Se monitorearon 1024 lecturas en potencial y corriente, la velocidad constante fue de 1 punto/segundo con un intervalo de 30 mV. Los resultados en la serie de datos se realizó la remoción de la tendencia.



Figura 3.28. Medición del ruido electroquímico en el concreto reforzado.

3.11.3 Medición de resistencia a la polarización lineal

En la técnica de RPL. se aplicó una pequeña señal de voltaje entre -50 mV y +50 mV de acuerdo con la norma ASTM G-59, y una velocidad de barrido de 60 mV/min. El equipo utilizado fue un potenciostato marca Gill AC-ACM Instruments, así mismo, la configuración de celda electroquímica se realizó a través de un electrodo de referencia, como se aprecia en la Figura 3.29. Los resultados obtenidos en la técnica de R.P.L se efectuó de manera gráfica y se calculó la pendiente de esta, que es la R_p .



Figura 3.29. Técnica de resistencia a la polarización lineal en la barra de acero.

3.11.4 Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica

Para la aplicación de la técnica EIS, principalmente se ajustó el rango de frecuencia de 0.01 Hz. a 10000 Hz, y una señal aplicada de voltaje de ± 20 mV. Se utilizó un equipo potenciostato y la celda electroquímica compuesta de 2 electrodos de trabajo w1 y w2, un contraelectrodo de barra de acero nominalmente idéntico y un electrodo de referencia Ag/AgCl.

CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados caracterización química del extracto etanólico de mango

Los espectros de FT-IR del extracto etanólico de Mango se muestra en la Figura 4.1, se observan bandas de vibración de estiramiento de O-H de fenoles y ácidos carboxílicos a 3304 cm^{-1} (Endah et. al., 2023). El pico de 2925 cm^{-1} corresponde al enlace alcano o compuestos de ácidos alifáticos (C-H) (Yang et. al., 2014). La banda de absorción de 1696 cm^{-1} se asignó a grupos carbonilo (C=O) de ácidos carboxílicos en compuestos fenólicos y aromáticos (C=C) (Thivagaran et. al., 2023). Los picos observados a 1327 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de los ácidos carboxílicos C-OH (Cheng et. al., 2021). Las bandas a 1193 cm^{-1} y 821 cm^{-1} se asignan a las vibraciones de estiramiento C-O de los compuestos de ácido carboxílico en el extracto de mango (Isnaeni et. al., 2021).

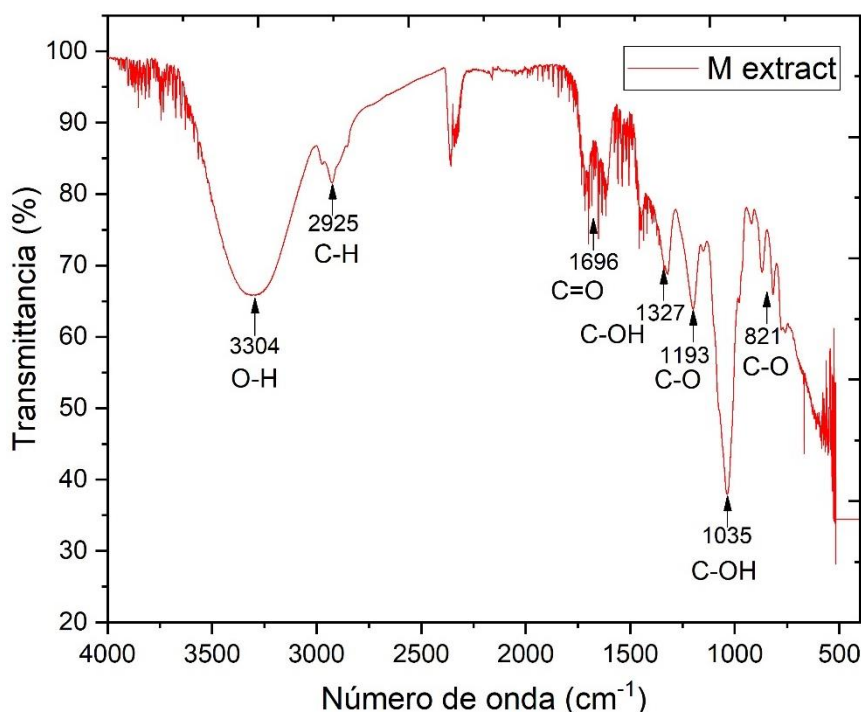


Figura 4.1. Espectros de FT-IR de los extractos de cáscara de Mango.

Los espectros de UV-Vis proporcionan información práctica sobre los grupos funcionales del compuesto orgánico existente en la solución huésped (Rahmani et. al., 2024). El espectro del extracto de mango se observa en la Figura 4.2, éste presenta absorción de manera continua en un rango de longitudes de onda de 200-400 nm. El pico de resonancia de 298 nm es resultado de la transición electrónica $\pi \rightarrow \pi^*$ de los grupos funcionales aromáticos C=C.

Las bandas de absorción a 314 y 359 corresponden a intensidades bajas y se asignan a la transición electrónica de $n \rightarrow \pi^*$ al grupo funcional carbonilo C=O (Ramezanzadeh et. al., 2019; Thivagaran et. al., 2023). Estos pueden ser los grupos funcionales que existen en la estructura del ácido gálico, la mangiferina y la iriflofenona (Ramezanzadeh et. al., 2019).

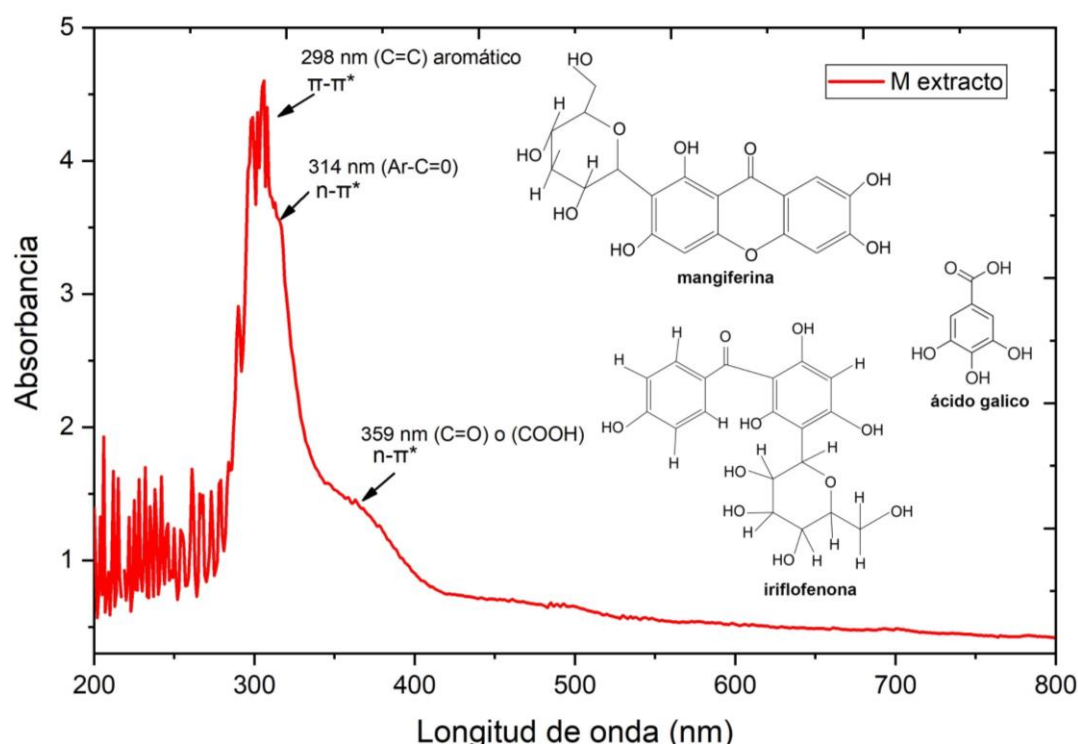


Figura 4.2. Espectros de UV-Visible del extracto de cascara de mango.

4.2 Pruebas físicas de las fibras

4.2.1 Resultado del contenido de humedad

En la Tabla 4.1 se puede observar el contenido de humedad (CH) para las fibras empleadas en esta investigación. Como se aprecia las fibras naturales presentan altos valores de CH con respecto a las fibras sintéticas, debido a la alta porosidad en su estructura superficial. Un alto contenido de humedad es perjudicial para el comportamiento del concreto porque se produce una acumulación interna de agua responsable del debilitamiento del compuesto (de Azevedo et al., 2020).

Las fibras de palma presentan el mayor contenido de humedad a temperatura ambiente con valores de 4.12 % seguido de las fibras de mango con valor de 4.00 %, esto puede indicar que un alto contenido de humedad origina debilitamiento en el tejido del soporte o tejido parenquimático de la fibra (Gonzales y Tam, 2014).

Tabla 4.1. Valores de porcentaje de humedad de las fibras.

Fibra determinación contenido de humedad 25 °C					
Material	N° muestra	Peso seco ambiente (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Contenido de humedad (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.864	2.747	4.095	4.00
	M2	2.851	2.735	4.092	
	M3	2.900	2.789	3.820	
Palma	M1	1.690	1.619	4.201	4.12
	M2	1.702	1.632	4.077	
	M3	1.748	1.677	4.094	
HDPE	M1	1.834	1.833	0.082	0.08
	M2	1.886	1.885	0.085	
	M3	1.852	1.851	0.086	

4.2.2 Resultado del porcentaje de absorción de agua

En la Tabla 4.2 se aprecia los valores de absorción de las fibras naturales y sintéticas saturados a 24 horas, la fibra de palma presenta el mayor porcentaje de absorción con un valor de 56.90 %. La alta absorción de agua está relacionada con la porosidad de la fibra, es decir las fibras naturales son de naturaleza hueca y, por lo tanto, permiten la difusión de moléculas de agua en los compuestos (Yorseng et. al., 2020). Además, el agua que absorben las fibras origina una inestabilidad en su volumen que propicia la pérdida de adherencia con la matriz de concreto (Juarez et. al., 2004).

Se puede apreciar la propiedad hidrofílica de las fibras naturales en comparación a las fibras sintéticas de HDPE. Esto puede indicar, que al agregarse las fibras naturales a la matriz de cemento estas pueden absorber una mayor cantidad de agua del mezclado, durante y después del fraguado, por lo que se debe realizar una corrección en la dosificación de los materiales para la elaboración del concreto.

Tabla 4.2. Porcentaje de absorción de las fibras, saturado a 24 horas.

Determinación absorción					
Material	N° muestra	Peso húmedo saturado (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Porcentaje de absorción (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.880	1.706	40.773	39.33
	M2	2.903	1.683	42.010	
	M3	2.864	1.855	35.235	
Palma	M1	1.770	0.734	58.511	56.90
	M2	1.714	0.727	57.587	
	M3	1.762	0.799	54.618	
HDPE	M1	1.815	1.811	0.220	0.25
	M2	1.865	1.860	0.279	
	M3	1.844	1.839	0.266	

4.2.3 Resultado densidad

La densidad de las fibras se aprecia en la Tabla 4.3, se muestra los valores de densidad de las fibras naturales de mago y palma, de 1.09 g/cm^3 y 1.21 g/cm^3 , para la fibra sintética de HDPE, obtuvo una densidad de 0.94 g/cm^3 .

La Tabla 4.4, nos muestra una comparación de las fibras naturales más conocidas y empleadas en la fabricación de concretos reforzados. Se puede observar que las fibras estudiadas de mango y palma presentan valores bajos de densidad con respecto a las demás fibras conocidas. Estos valores representan una disminución del peso del compuesto frente a la matriz, lo que le da un valor agregado al compuesto, con un peso ligeramente inferior (Hidalgo y Quintana, 2012).

Tabla 4.3. Valores de densidad de las fibras.

Determinación densidad estado seco saturado							
Material	N° Muestras	Peso fibras (g)	Aforo (ml)	Desplazado (ml)	Volumen desplazado (ml)	Densidad (g/ml)	Promedio (g/ml)
Mango	M1	2.893	30	32.8	2.8	1.033	1.09
	M2	2.926	30	32.6	2.6	1.125	
	M3	2.843	30	32.5	2.5	1.137	
Palma	M1	1.671	30	31.2	1.2	1.393	1.21
	M2	1.715	30	31.5	1.5	1.143	
	M3	1.768	30	31.6	1.6	1.105	
HDPE	M1	1.866	30	32.2	2.2	0.848	0.95
	M2	1.897	30	31.8	1.8	1.054	
	M3	1.830	30	31.9	1.9	0.962	

Tabla 4.4. Comparación características físicas de las fibras naturales y sintéticas.

Tipo de fibra	contenido de humedad (%)	densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Referencia
Bonote	--	1.29	--	(Defoirdt et al., 2010)
Fique	13.2	1.29	--	(Moreno et al., 2007)
Yute	12.5	1.37	--	(Moreno et al., 2007)
Lino	11.5	1.50	--	(Moreno et al., 2007)
Lechuguilla	--	1.88	98.00	(Juarez et al., 2004)
Cáñamo	3.5-8.0	1.48	--	(Madsen et al., 2007)
Plátano	10.0-11.0	1.35	--	(Iducula et al., 2006)
Palma de abanico	--	0.5-0.8	100-200	(Machaka et al., 2014).
Sisal	--	1.45	--	(Salvador et al., 2008).
G. Angustifolia	7.13	1.38	45.88	(Moreno et al., 2007).
Palma sabal mexicana	4.12	1.21	56.91	Este estudio.
Mango	4.00	1.09	39.34	Este estudio.
HDPE	--	0.92	--	(Arrakhiz et al., 2012)
HDPE	--	0.95	--	(Awad et al., 2019)
HDPE	0.084	0.95	0.25	Este estudio.

4.2.4 Resultado absorción de fibras tratadas

En las siguientes Tablas 4.5, 4.6 4.7 y 4.8 se aprecian los resultados del tratamiento superficial de las fibras naturales inmersa por 5, 15, 30 y 60 minutos en aceite de auto usado, de manera general se puede notar las diferencias en los porcentajes de absorción de las fibras naturales de mango y palma. La absorción de agua disminuyó en las fibras tratadas a 15 minutos de exposición en el medio hidrófobo, es decir este tiempo de tratamiento tiene mejor respuesta a la resistencia de absorción del material comparado con la absorción de las fibras sin tratar, por lo cual se utilizó este tiempo para la elaboración del concreto.

Tabla 4.5. Valores de absorción de fibras naturales, 5 minutos de exposición.

Absorción					
Fibra	Muestra	Peso húmedo saturado (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Porcentaje de absorción (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.430	1.543	36.499	34.69
	M2	2.346	1.575	32.890	
	M3	2.161	1.444	33.182	
Palma	M1	1.657	0.989	40.309	37.71
	M2	1.707	1.108	35.042	
	M3	1.428	0.888	37.801	

Tabla 4.6. Valores de absorción de fibras naturales, 15 minutos de exposición.

Absorción					
Fibra	Muestra	Peso húmedo saturado (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Porcentaje de absorción (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.847	1.974	30.660	31.24
	M2	2.241	1.503	32.910	
	M3	2.252	1.573	30.171	
Palma	M1	1.504	0.934	37.879	37.64
	M2	1.538	0.965	37.220	
	M3	1.444	0.898	37.830	

Tabla 4.7. Valores de absorción de fibras naturales, 30 minutos de exposición.

Absorción					
Fibra	Muestra	Peso húmedo saturado (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Porcentaje de absorción (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.364	1.663	29.650	29.84
	M2	2.233	1.592	28.709	
	M3	2.793	1.922	31.186	
Palma	M1	1.498	0.827	44.780	45.64
	M2	1.509	0.829	45.041	
	M3	1.495	0.790	47.118	

Tabla 4.8. Valores de absorción de fibras naturales, 60 minutos de exposición.

Determinación absorción 60 minutos 70 °C					
Fibra	Muestra	Peso húmedo saturado (g)	Peso seco a 70 °C (g)	Porcentaje de absorción (%)	Promedio (%)
Mango	M1	2.280	1.659	27.218	29.92
	M2	2.078	1.468	29.343	
	M3	2.114	1.412	33.199	
Palma	M1	1.450	0.662	54.339	50.33
	M2	1.506	0.787	47.730	
	M3	1.482	0.757	48.941	

4.2.5 Resultado pruebas mecánicas de las fibras

En la Figura 4.3 se observa la curva de esfuerzo-deformación de las fibras naturales y de plástico, sometidas a esfuerzo de tensión directa, los datos específicos de las propiedades mecánicas se observan en la Tabla 4.9.

El esfuerzo máximo de ruptura de la fibra de mango con valor promedio de 18.98 Mpa, y palma con valor de 17.53 Mpa, estos resultados son menores que los reportados por algunos autores en la literatura de algunas fibras naturales en un rango de valores 70-300 Mpa ([Machaka, et. al., 2014](#); [Defoirdt et. al., 2010](#); [Chandramohan y Marimuthu, 2011](#)), pero también estos resultados son similares a los reportados por otros autores como ([Narváez-Muñoz, et. al., 2016](#); [Ramakrishna y Sundararajan, 2005](#)), por lo que se demuestra las propiedades mecánicas de las fibras naturales pueden variar dependiendo de su composición ([Arsené, et. al., 2003](#)), las dimensiones, el espesor, el área.

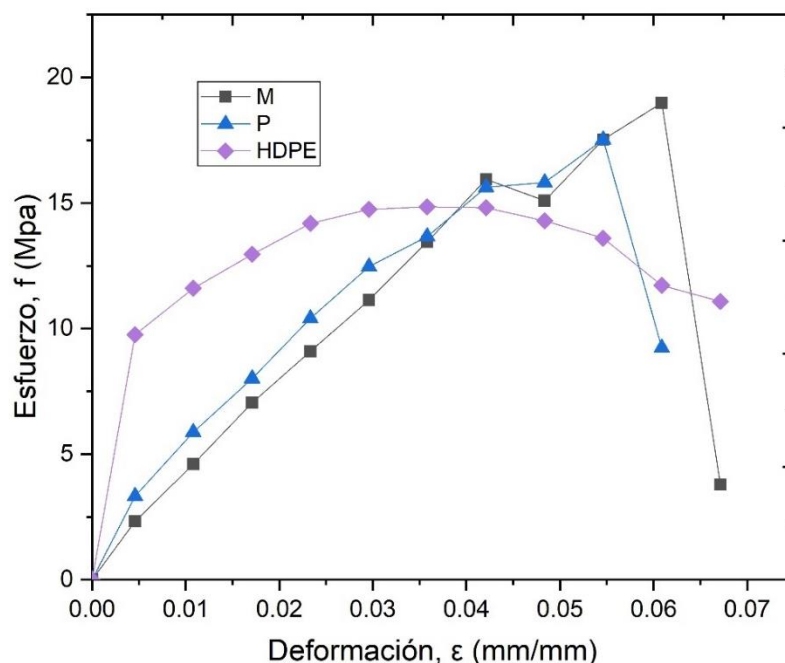


Figura 4.3. Gráfica de esfuerzo-deformación para fibras naturales y HDPE.

Se observa un bajo módulo de elasticidad para las fibras naturales, por consecuencia son materiales menos rígidos, un material con un módulo de elasticidad pequeño sufrirá grandes deformaciones con pequeños esfuerzos (Guede y Caeiro, 2013).

La fuerza máxima de ruptura de la fibra HDPE tiene un valor promedio de 15 MPa, su resistencia a la tensión es menor comparado con HDPE puro reportado por otros autores 25.7 y 28.8 MPa (Foulk, et. al., 2004; Colom et. al., 2003), o con otras fibras recicladas de HDPE de 37.7 MPa (Pešić, et. al., 2016), esto podría deberse a diversos factores, uso, degradación del material y proceso de reciclaje. El módulo de elasticidad para la fibra de HDPE se observa un valor de 463 MPa, este resultado es muy similar a reportados por algunos investigadores (Pešić, et. al., 2016; Foulk, et. al., 2004), nos indica que las fibras recicladas de HDPE, son un material flexible, debido a que valores altos de módulo de elasticidad nos indica un material rígido y viceversa.

La tenacidad se utiliza para describir una combinación de propiedades de resistencia y ductilidad evaluando el área total bajo la curva tensión-deformación (Foulk, et. al., 2004), se puede observar que todas las fibras tienen bajos valores de tenacidad, indicando una menor absorción de energía del material.

Tabla 4.9. Propiedades mecánicas de las fibras.

Propiedades	Unidades	Mango	Palma	HDPE
Resistencia a la tensión	MPa	18.98	17.53	15.05
Módulo de elasticidad	MPa	385	457	463
Tenacidad	MPa	0.73	0.67	2.46

4.3 Pruebas físicas del concreto

4.3.1 Revenimiento

La mezcla de concreto se diseñó para un revenimiento de 12 ± 2 cm, con el objetivo de que la pasta de concreto tenga mejor consistencia y sea más fácil el moldeo de los especímenes, de acuerdo con la norma ASTM C-143.

Se puede apreciar en la Figura 4.4 a) que el concreto incorporado con mayor cantidad de fibra larga al 0.4%, con respecto al agregado fino obtiene menor trabajabilidad y consistencia, en la Figura 4.4 b) la trabajabilidad de las muestras disminuye obteniendo valores de revenimiento de 9 cm-11 cm.

La muestra HC-04 es el que presenta menor trabajabilidad en la pasta de concreto debido a que la fibra es menos flexible comparado con las fibras naturales ocasionando menor resistencia al movimiento de los agregados (Nibudey et. al., 2013).

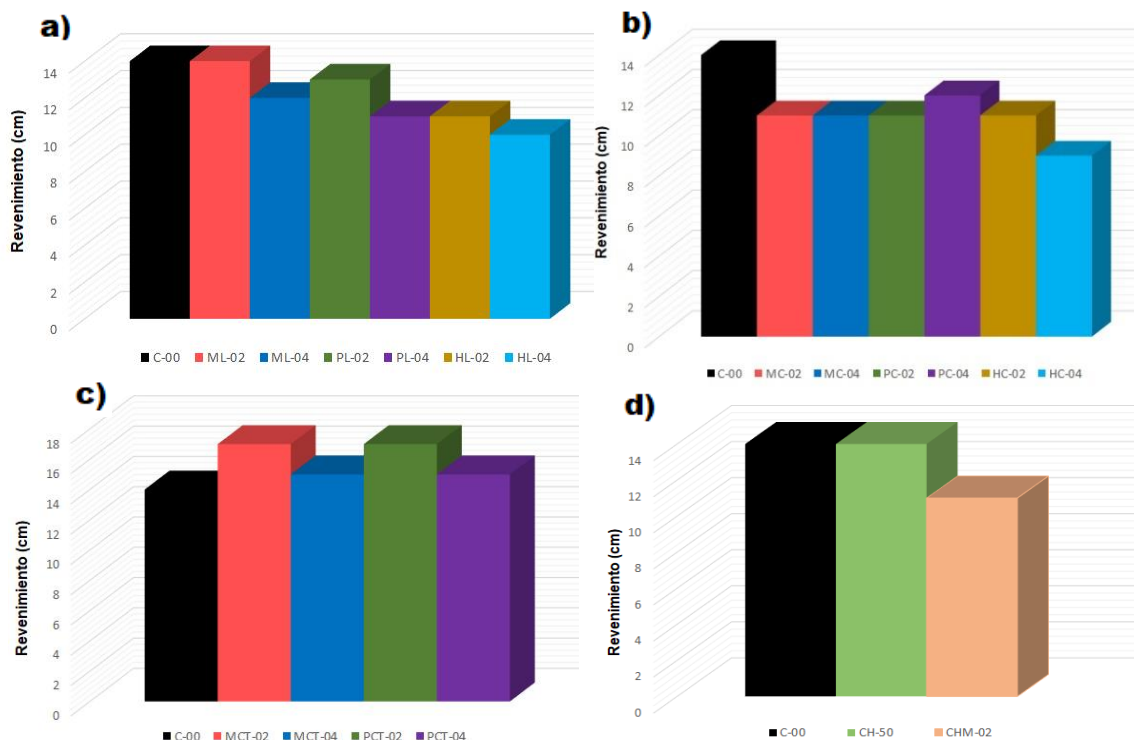


Figura 4.4. Revenimiento del concreto **a)** Fibras largas **b)** Fibras cortas **c)** Fibras tratadas **d)** Inhibidor.

En la Figura 4.4 c), al agregar fibras naturales tratadas (FNT) se observa un aumento en el revenimiento esto debido a que las FNT reducen la cantidad de agua a consecuencia del aceite tiene un efecto hidrofóbico. El aumento del revenimiento es atribuido al contenido alto de SO_3 del aceite quemado (Shafiq et. al., 2018; Björnström y Chandra, 2003).

Se demostró que las partículas de aceite actúan como un superplastificante en la mezcla de concreto estos resultados concuerdan con otros autores (Varghese y Sakaria, 2017; Hasan y Ali, 2023).

En la Figura 4.4 d), se aprecia que la incorporación del inhibidor no alteró el revenimiento, sin embargo, cuando se agregó el 0.2% de fibras de mango se observa una disminución, esto hecho podría deberse al efecto de absorción de agua de las fibras naturales.

4.3.2 Temperatura del concreto

En la Figura 4.5, se muestran los resultados de la medición de la temperatura interna del concreto, se puede apreciar la variación de las diferentes muestras debido a los horarios de elaboración de las probetas, y a la temperatura del lugar. De acuerdo con la norma ASTM C-143 y supervisión en obra ([Gonzales, 2006](#)), el concreto debe mantener una temperatura inferior a los 32° C, si es más alta existe la probabilidad de un fraguado más rápido de la mezcla y fisuras ([Ortiz, 2005](#)).

Todas las muestras mantuvieron un rango de temperatura interna de la pasta de concreto entre 25 y 29 °C. Estos resultados demuestran un buen control de calidad de los materiales sin que perjudique algunas otras propiedades físicas o mecánicas del concreto.

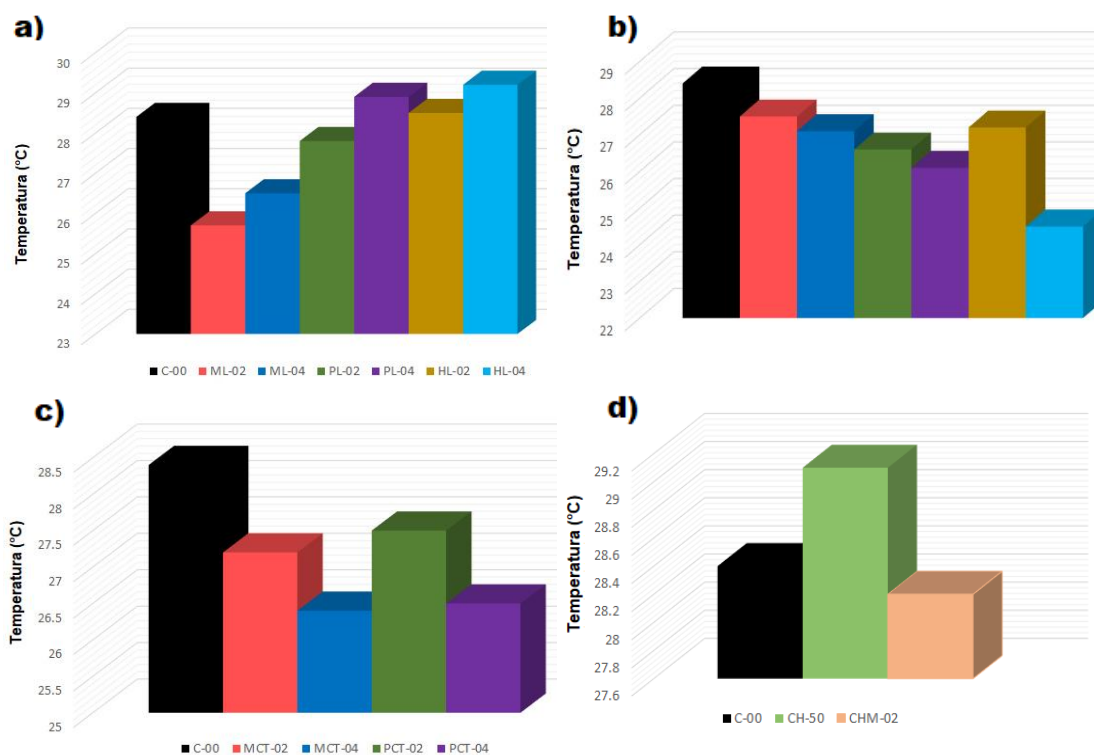


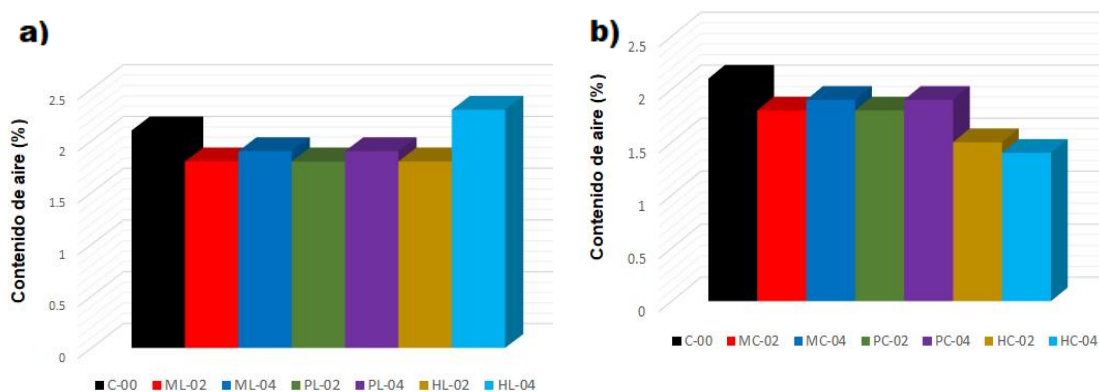
Figura 4.5. Temperatura del concreto **a)** Fibras largas **b)** Fibras cortas **c)** Fibras tratadas **d)** Inhibidor.

4.3.3 Contenido de aire

La Figura 4.6, ilustra los resultados del contenido de aire del concreto fresco, esta propiedad física es fundamental para evaluar los vacíos de aire atrapado en la pasta y la durabilidad del concreto, es decir mayor cantidad de vacíos en la matriz cementante afecta el rendimiento final en las propiedades mecánicas del producto y viceversa. En la Figura 4.6 a) se puede observar que al agregar menor cantidad de fibras largas (FL) naturales y sintéticas el contenido de aire disminuye con respecto a la mezcla control, debido a que el área de contacto entre la matriz y el refuerzo disminuye a medida que disminuye el porcentaje de fibra (de azevedo et. al., 2021). La muestra HL-04 presenta el mayor contenido de aire, este hecho se puede indicar que hay más burbujas dentro de la pasta debido a la mayor cantidad de fibras de HDPE, por lo cual ocasiona vacíos en contacto con los agregados.

Al agregar las fibras cortas (FC), todas las muestras disminuyen el contenido de aire con respecto a la muestra control como se muestra en la Figura 4.6 b), debido a que las menores dimensiones de las fibras se acomodan dentro de la pasta de concreto cubriendo los poros dejados por el agregado grueso.

Las muestras HC-02 y HC-04 presentan un menor contenido de aire con respecto a las fibras naturales, debido a la flexibilidad de las fibras de HDPE y además tienen mejor distribución en la estructura cementante (Flores Nicolás et. al., 2024).



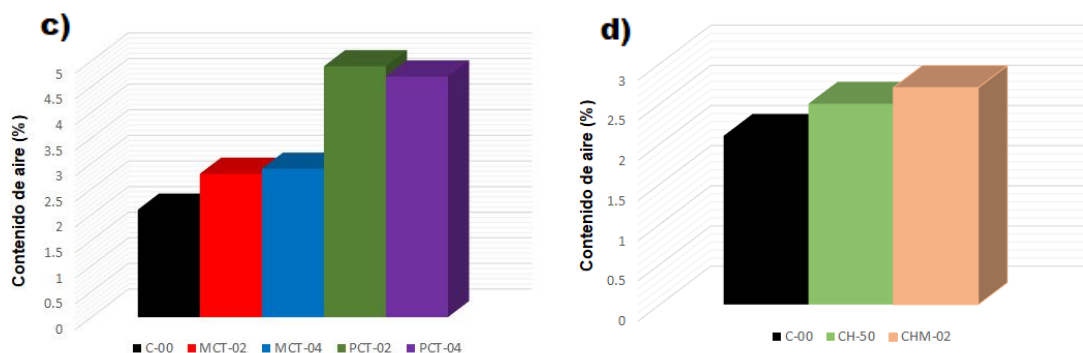


Figura 4.6. Contenido de aire del concreto **a)** Fibras largas **b)** Fibras cortas **c)** Fibras tratadas **d)** Inhibidor.

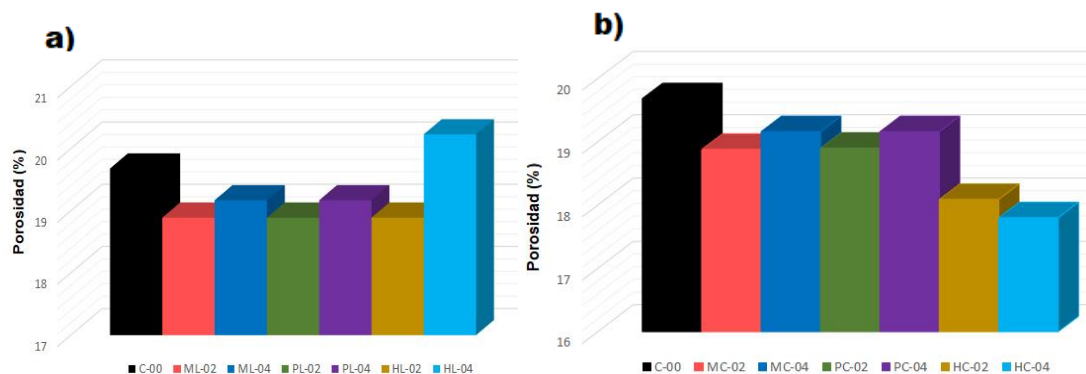
Para las fibras tratadas (FT) como se muestra en la Figura 4.6 c) el contenido de aire aumenta para todas las muestras con respecto a la muestra control, pero en especial las muestras PCT-02 y PCT-04, el contenido aumenta prácticamente el doble con valores entre 4.5 y 5%, podría indicar que el uso de aceite provocó una mala interacción entre la pasta y fibra, es decir, la adherencia disminuyó drásticamente. Los resultados en las muestras con inhibidor y fibra se observan en la Figura 4.6 d), el contenido de aire aumentó para ambas muestras, estos datos demuestran que el inhibidor verde ocasionó una mala reacción en la hidratación del cemento, en consecuencia, los poros capilares aumentaron.

4.3.4 Porosidad de la pasta de concreto

La porosidad se puede calcular a través de los resultados de contenido de aire (Solís-Carcaño et. al., 2006). En la microestructura compleja de hormigón, los poros pueden estar presentes desde la escala nanométrica a la macroescala (Lian et. al., 2011). En la Figura 4.7 se observan los resultados obtenidos del porcentaje de porosidad del concreto, además, se aprecia que la muestra control (C-00), tiene un porcentaje de porosidad de 19% con una relación de a/c de 0.54, estos resultados son muy similares reportados por otros autores (Flores Nicolas et. al., 2021; Solís-Carcaño y

[Alcocer-Fraga, 2019; Wang et. al., 2021](#)). En la Figura 4.7 a) se observa que las muestras ML-02 y PL-02, disminuyeron su porcentaje de porosidad con respecto a la mezcla control, en consecuencia, el material es menos permeable comparado con las muestras con mayor contenido de fibras. La muestra HL-04 presenta mayor porosidad y por consecuencia un aumento en la permeabilidad del material, por lo cual, los agentes agresivos pueden penetrar la matriz del concreto y llegar a interactuar con el acero de refuerzo, este hecho puede afectar directamente su resistencia a la compresión ([Nicolas, 2021](#)).

En la Figura 4.7 b) se observan las FC, se puede apreciar que la menor porosidad de todas las muestras se presenta para las fibras sintéticas con valor de 18% con respecto a la muestra control de 20%, considerando una mayor resistencia a la permeabilidad del agua y a agentes agresivos. En la Figura 4.7 c) se aprecian las FT, como se analizó en los resultados de contenido de aire, todas las muestras presentan altos porcentajes de porosidad principalmente las muestras de PCT-02 y PCT-04, con una gran cantidad de poros en la matriz cementante. El inhibidor y las fibras afectaron la interacción de los materiales en la formación de fase cristalina del hidrato de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, esto conduce a un aumento en el diámetro de los microporos en la pasta de cemento endurecida ([Asipita et. al., 2014](#)), al presentar valores de porosidad por encima de la muestra control como se aprecia en la Figura 4.7 d).



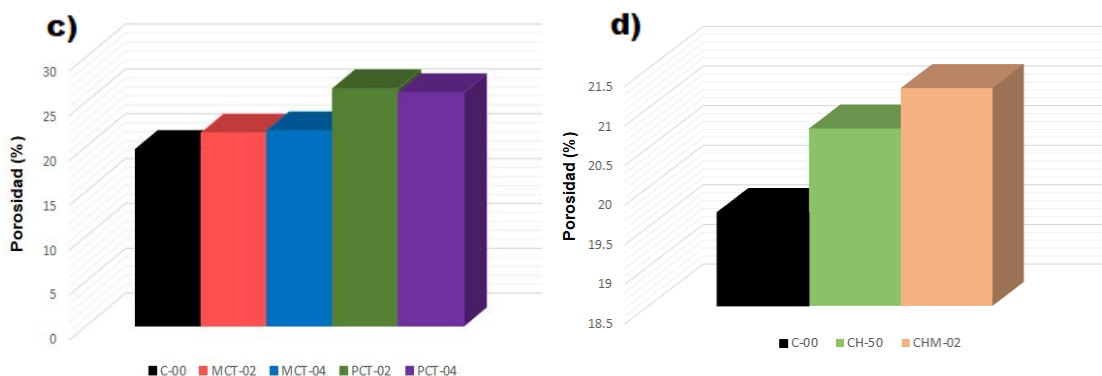


Figura 4.7. Porosidad del concreto **a)** Fibras largas **b)** Fibras cortas **c)** Fibras tratadas **d)** Inhibidor.

4.4 Resultados pruebas de impacto Charpy para muestras con fibras

En la Figura 4.8 se muestra los resultados de la prueba de impacto, la probeta de fibra de mango corto (Mc) tiene una energía de impacto promedio de 25.5 J un aumento del 3% con respecto al concreto control de 24.6 J, y a las muestras de palma (Pc) y HDPE (Hc), con valores de 24.6 J y 24.7 J.

La baja resistencia de corte contribuye a una transferencia ineficiente de esfuerzos de la matriz a la fibra (Monterio et al., 2006), y la mayor adherencia de la fibra de mango en la interfaz pasta/fibra ocasiona una mayor energía de absorción.

Es conocido que cualquier proceso de fractura consta de dos estados: la formación y la propagación de una grieta, para lo cual se requiere una determinada absorción de energía (Ortega, 2006). Para las fibras naturales de Pc, su energía de impacto es ligeramente menor al del concreto control, puede ser por diferentes razones la falta de una adherencia de la matriz de cemento, y además la degradación de la fibra en el medio alcalino de la pasta de concreto, así mismo debilitan el refuerzo y esto ocasiona que la energía de absorción sea deficiente.

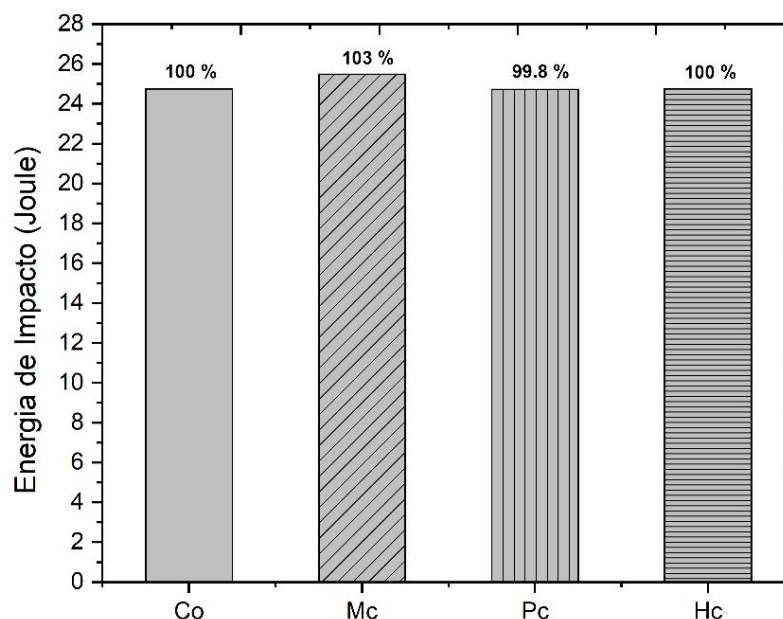


Figura 4.8. Resultado promedio de resistencia de impacto.

Las muestras de Hc, se aprecia que la energía de impacto no se modificó, podría influir su estructura lisa y la menor adherencia de la pasta de concreto. Todas las muestras presentaron una tenacidad frágil debido a que las probetas se rompieron fácilmente durante el ensayo.

En la Figura 4.9 se puede observar la resiliencia de las probetas, conociendo el trabajo total de la deformación de rotura, es posible obtener la característica esencial que se obtiene como resultado de los ensayos, la resiliencia o resistencia del material al impacto ([Monroy et. al., 2009](#)).

Para la muestra Mc se observa un aumento del 2% de resistencia de impacto con respecto a la muestra control, pero la muestra Pc, se puede ver una disminución de 8.7% de resiliencia, esto podría indicar una degradación de las fibras de palma y así mismo una menor adherencia en la interfaz pasta/fibras. Para las muestras Hc se mantuvo una resistencia similar al del concreto control.

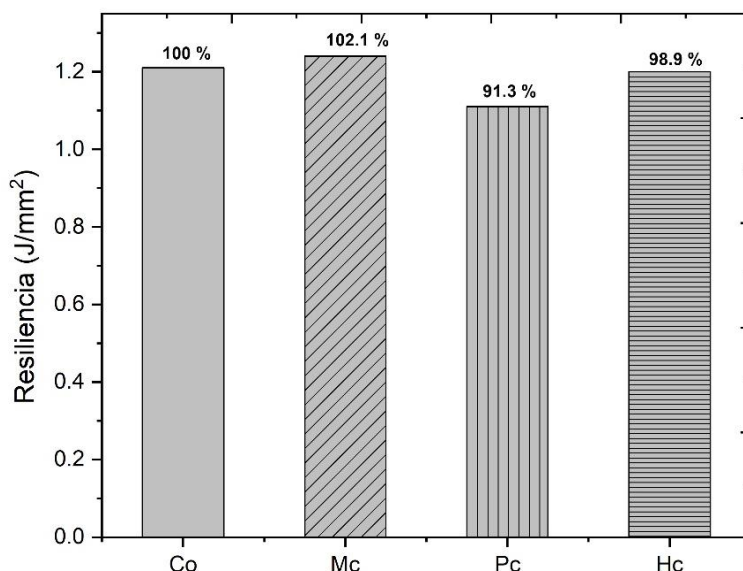


Figura 4.9. Valores promedio de resiliencia.

4.5 Resultados pruebas mecánicas de compresión

➤ Fibras largas

En la Tabla 4.10, se pueden apreciar los valores de resistencia mecánica a la compresión (F'_c) del concreto, y la desviación estándar de las muestras. La muestra control C-00 en el ensayo experimental presentó una resistencia final de 330.7 kg/cm^2 , superando el diseño teórico propuesto de 300 Kg/cm^2 .

Se puede observar que la muestra ML-04, obtuvo una resistencia inicial promedio a los 7 días de 304.5 kg/cm^2 , este diseño presenta el mayor incremento a temprana edad del concreto comparado con la muestra control. Finalmente, a los 28 días obtuvo un F'_c promedio de 331.1 kg/cm^2 , obteniendo un valor de resistencia similar a la muestra control y a la muestra ML-02.

Tabla 4.10. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras largas, curado máximo de 28 días.

Resistencia a la compresión							Prom. F'c 7 días (kg/cm²)	Prom. F'c 28 días (kg/cm²)	Desv. E 28 días (kg/cm²)
Edad	7 días			28 días					
Muestra	N° 1	N°2	N°3	N° 1	N°2	N°3			
C-00	270.3	330.7	262.1	336.7	328.4	326.9	265.0	330.7	4.31
ML-02	269.8	329.2	259.2	334.5	327.8	325.4	263.2	329.2	3.82
ML-04	312.4	331.1	305.5	331.0	333.7	328.6	304.5	331.1	2.09
PL-02	221.5	274.9	224.3	280.7	269.9	274.1	224.1	274.9	4.42
PL-04	264.5	300.1	253.2	305.3	298.1	296.9	258.7	300.1	3.74
HL-02	267.0	303.9	251.2	306.5	302.4	302.7	258.6	303.9	1.90
HL-04	263.5	294.8	249.7	302.7	291.1	290.6	255.7	294.8	5.58
Diseño	300								

El diseño PL-02, presenta la más baja resistencia a la compresión a temprana edad y a los 28 días de curado con un valor final a los 28 días de 274.9 kg/cm², de acuerdo con los valores de porosidad este diseño presenta una baja permeabilidad, pero considerando los resultados de compresión puede indicar que las fibras están sometidas a un proceso de degradación debido a la alta alcalinidad del concreto.

En la Figura 4.10 se muestran los porcentajes de la resistencia a la compresión de las probetas, en comparación con la muestra control que representa el 100%. Se puede observar que la $F'c$ en las muestras ML-02 y ML-04, se mantiene constante a los 28 días, es decir las fibras naturales del mango no perjudicaron las propiedades mecánicas en la pasta de concreto.

La muestra PL-02, presentó una disminución del 16.87 % de la resistencia a la compresión con respecto a la muestra control, las fibras de palma en menor porcentaje añadido a la pasta de concreto afectan considerablemente sus propiedades mecánicas.

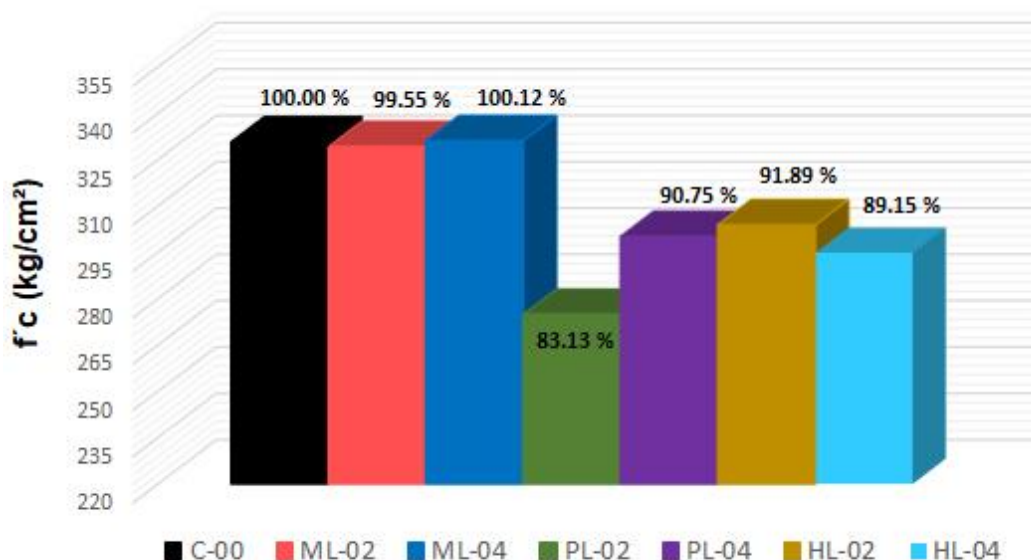


Figura 4.10. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FL.

➤ Fibras cortas

En la Tabla 4.11 se presenta los valores de resistencia a la compresión para las FC. Se puede analizar que las fibras naturales con porcentaje de 0.2% obtienen una resistencia a la compresión a los 7 días con valores de entre 250 kg/cm² y 270 kg/cm² presentando más del 60% de la resistencia total de diseño de 300 kg/cm², este hecho indica la buena interacción de las fibras con los agregados y la pasta de cemento. De manera general las muestras MC-04 y PC-02 a los 28 días de curado presentan valores promedios altos de 372.3 kg/cm² y 373.6 kg/cm² respectivamente, en comparación con la muestra control con valor de 330.7 kg/cm², esto indica una mejor adherencia, menor volumen de vacíos y mejor distribución de ahí que las grietas que van apareciendo en el interior de la matriz tengan que tomar una trayectoria sinuoso, lo que resulta en la demanda de más energía para la propagación futura, lo que a su vez aumenta la carga última (Al-Hadithi y Hilal, 2016), así mismo otros autores han reportado la disminución de la F'c, cuando el

volumen de fibras aumenta (Trabelsi and Kammoun 2020; Elsaid et. al. 2011; Krishna et. al. 2018).

Tabla 4.11. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras cortas, curado máximo de 28 días.

Resistencia a la compresión							Prom. F'c 7días (kg/cm²)	Prom. F'c 28 días (kg/cm²)	Desv. E 28 días (kg/cm²)
Edad	7 días			28 días					
Muestra	N° 1	N°2	N°3	N° 1	N°2	N°3			
C-00	270.3	262.8	262.1	336.7	328.4	326.9	265.0	330.7	4.31
MC-02	264.3	262.8	256.8	328.7	321.1	325.0	261.3	324.9	3.12
MC-04	261.5	260.1	262.9	379.3	369.9	367.8	261.5	372.3	5.04
PC-02	274.7	278.6	259.6	372.3	375.9	372.8	270.9	373.6	1.59
PC-04	127.2	140.4	131.2	319.2	324.3	312.1	132.9	318.5	5.03
HC-02	245.8	250.9	239.7	351.7	345.2	342.6	245.4	346.5	3.81
HC-04	198.5	207.8	214.7	300.2	287.1	288.2	207.0	291.8	5.92
Diseño	300								

En la Figura 4.11 se observa los porcentajes de $F'c$, podemos apreciar que las muestras MC-04 y PC-02 tienen un 12.60 y 12.99% de resistencia mayor a la muestra control, teniendo una mejor respuesta en las propiedades mecánicas, sin embargo, al aumentar en 0.4% el porcentaje de fibras de palma y HDPE, la $F'c$ del concreto disminuye en un 3.68 y 11.75 %, este hecho puede suceder como se ha mencionado al aumento del volumen de las fibras, mayor área de las fibras, y además la débil cohesión de la estructura y el refuerzo.

Las partículas de plástico actúan como barrera y evitan que la pasta de cemento se adhiera a los áridos naturales (Al-Hadithi y Hilal, 2016).

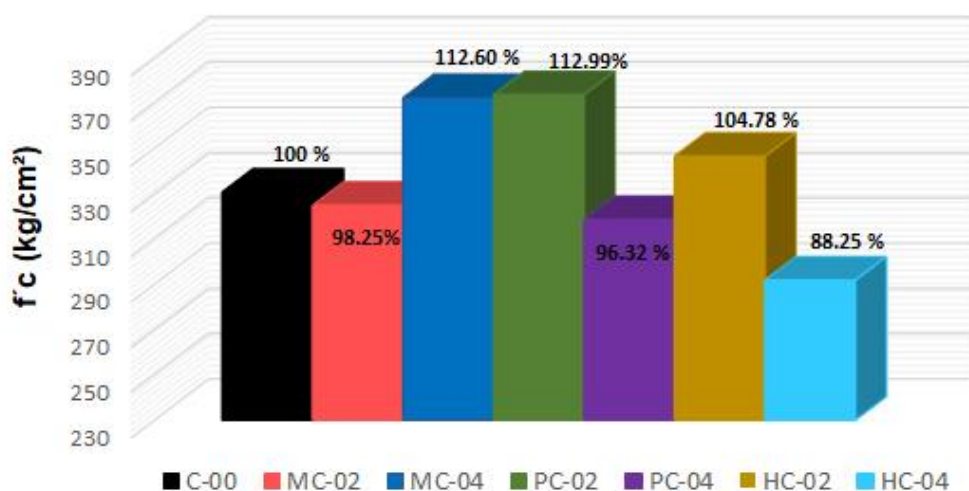


Figura 4.11. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FC.

➤ Fibras cortas tratadas

En la Tabla 4.12 se pueden observar los resultados de las FT, a los 7 y 28 días, de acuerdo con los resultados de porosidad, se puede notar que la muestra control C-00, presenta la mayor resistencia a la compresión ($F'c$) con respecto a las muestras con FT, esto debido a la presencia de aceite en las fibras naturales, causando el aumento en la zona de transición interfacial (ZTI) que rodea los agregados con la fibra. Una ZTI mayor tiene una estructura más débil en comparación con la mayor parte de la pasta y es más frágil a las cargas mecánicas (Yaphary et al., 2020).

Ademas, se demuestra un nivel reducido de reacciones químicas de la hidratación del cemento con la presencia de aceite junto con el debilitamiento de las fuerzas cohesivas (Assaad, 2013). Esta disminucion en la $F'c$ es similar a las reportadas por diferentes autores que agregaron un pequeño porcentaje de aceite en la pasta de concreto (Nuruddin y Beddu, 2011; Burbano-García et al., 2021; Alsadey, 2018; Attom et al., 2020).

En la Figura 4.12, se observan los porcentajes de $F'c$ del concreto con la incorporación de las fibras tratadas. Todas las muestras se encuentran con valores inferiores al concreto control. De manera general, la sustancia hidrófoba afecta considerablemente las propiedades mecánicas del concreto debido a que no existe una interacción con el agua de reacción de la pasta, la porosidad es mucho mayor en la matriz por lo que aumenta su permeabilidad, y no hay una buena adherencia de la fibra con la matriz cementante.

Tabla 4.12. Valores de $F'c$ para las muestras con fibras tratadas, curado máximo de 28 días.

	Resistencia a la compresión						Prom. F'c 7 días (kg/cm²)	Prom. F'c 28 días (kg/cm²)	Desv. E 28 días (kg/cm²)
Edad	7 días			28 días					
Muestra	N° 1	N°2	N°3	N° 1	N°2	N°3			
C-00	270.3	262.8	262.1	336.7	328.4	326.9	265.0	330.7	4.31
MCT-02	202.0	203.9	192.9	287.8	284.4	282.7	199.6	285.0	2.12
MCT-04	187.0	195.4	181.2	299.0	293.1	289.8	187.9	294.0	3.79
PCT-02	194.4	193.3	187.7	266.1	261.4	261.5	191.8	263.0	2.19
PCT-04	260.1	252.7	250.4	293.0	291.0	295.9	254.4	293.3	2.02
Diseño	300								

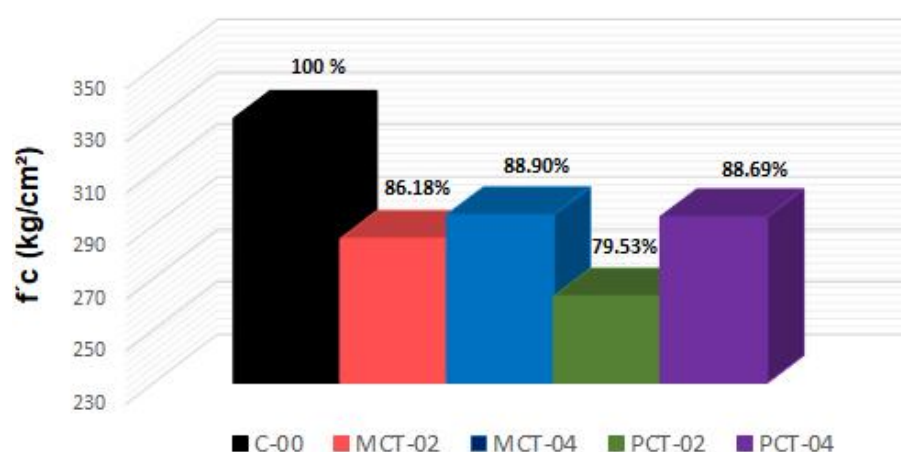


Figura 4.12. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para FCT.

➤ Concreto con inhibidor

La $F'c$ de las muestras de concreto con inhibidor de mango se puede apreciar en la Tabla 4.13. En los primeros 7 días de curado se puede observar que las probetas CH-50 y CHM-02 presentan resistencias menores en comparación a la muestra C-00, con valores promedios de 210.8 kg/cm^2 y 207.5 kg/cm^2 este hecho es a consecuencia de la mayor porosidad presente en la pasta de cemento.

Al final del curado se muestra una baja resistencia a la compresión del concreto, el inhibidor afectó las propiedades mecánicas de la pasta. Sin embargo, de acuerdo con la normativa para infraestructura del transporte en México (2004), el concreto empleado para fines estructurales puede ser de dos clases: clase 1, con peso volumétrico en estado fresco superior a 22 kN/m^3 (2.2 t/m^3) tendrá una resistencia a la compresión ($F'c$) igual a 24.5 Mpa (250 kg/cm^2) o mayor y clase 2 con peso volumétrico en estado fresco comprendido entre 19 y 22 kN/m^3 (1.9 y 2.2 t/m^3) tendrá una resistencia inferior a 25 MPa (250 kg/cm^2) pero no menor que 20 MPa (200 kg/cm^2). Es decir, el concreto es de uso estructural, debido a que la resistencia a la compresión supera los 250 kg/cm^2 el rango mínimo que nos indica la norma.

Tabla 4.13. Valores de $F'c$ para las muestras con inhibidor, curado máximo de 28 días.

	Resistencia a la compresión						Prom. F'c 7 días (kg/cm²)	Prom. F'c 28 días (kg/cm²)	Desv. E 28 días (kg/cm²)
Edad	7 días			28 días					
Muestra	N° 1	N°2	N°3	N° 1	N°2	N°3			
C-00	270.3	262.8	262.1	336.7	328.4	326.9	265.0	330.7	4.31
CH-50	215.5	207.6	209.3	257.7	267.3	255.9	210.8	260.3	5.00
CHM-02	208.1	212	212.4	275.3	283.3	277.8	210.7	278.8	3.34
Diseño	300								

En la Figura 4.13 se muestra el porcentaje de las propiedades mecánicas del concreto con y sin el inhibidor. Se ha observado una disminución del 21.28% la resistencia del concreto después de la introducción del extracto inhibidor. Sin embargo, al combinar el inhibidor con las fibras naturales (CHM-02) se observa que la F_c disminuye un 15.69% a consecuencia de la interacción de la fibra con la pasta. Aun así, estos resultados son inferiores a los mostrados por la muestra C-00. Los valores bajos de resistencia a la compresión son por el incremento de la porosidad lo que aumenta la penetración de los iones de cloruro agresivos (Palanisamy et al., 2018).

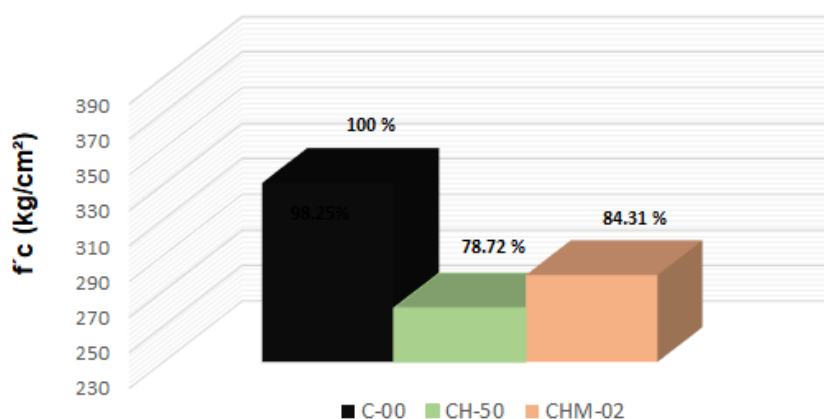


Figura 4.13. Grafica de porcentaje de resistencia a compresión para CH.

4.6 Resultados prueba de resistencia a la flexión del concreto

➤ Fibras largas

La Tabla 4.14 muestra el efecto de las fibras naturales y sintéticas en la resistencia a flexión del concreto (F_f), todas las probetas alcanzaron la máxima carga de ruptura, se puede apreciar que las fibras naturales de mango y palma ML-02, PL-04 en porcentajes de 0.2% y 0.4% respectivamente, presentan la mayor resistencia a flexión comparado con la muestra control, con valores de 47.73 kg/cm² y 47.51 kg/cm², este hecho nos indica que la longitud de la fibra ayuda a retardar y controlar las grietas de la

vigas al tener un área mayor, estos resultados son comparables a estudios de fibras de kenaf del autor Elsaid (2011). La fibra de mango en porcentaje de 0.4% disminuye ligeramente su resistencia a la flexión, sin embargo, supera la resistencia comparada con la muestra control.

La muestra HL-04, con mayor contenido de fibras sintéticas, presenta la menor resistencia a la flexión en el concreto comprado con la muestra control, este hecho puede indicar una deficiencia en la adherencia por el volumen de fibra, así mismo la débil fuerza de unión de la fibra de plástico y el cemento (Flores Nicolás et al., 2024).

Tabla 4.14. Valores de $F'f$ para las muestras con fibras naturales y sintéticas, curado a 28 días.

Muestra	$F'f$ kg/cm ²	$F'f$ (Mpa)
C-00	45.33	4.45
ML-02	47.51	4.66
ML-04	46.88	4.60
PL-02	44.07	4.32
PL-04	47.73	4.68
HL-02	46.67	4.58
HL-04	40.35	3.96

En la Figura 4.14 se ilustran los porcentajes de la resistencia a la flexión del concreto con adición de FL, como se observa las fibras de palma en mayor porcentaje aumentan la resistencia a flexión en 5.29% con respecto a la mezcla control, así mismo, las fibras de mango en menor cantidad aumentan las propiedades mecánicas concreto.

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente el porcentaje de $F'f$ disminuye en 10.99% para la muestra HL-04.

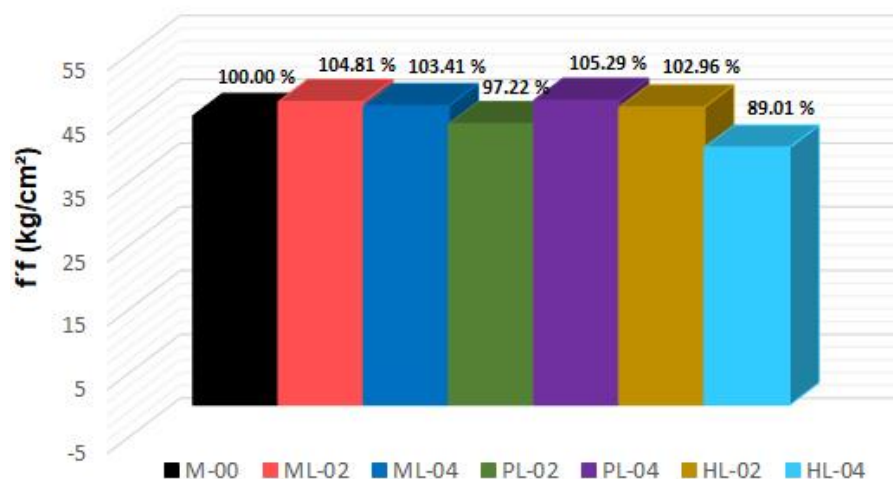


Figura 4.14. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión.

➤ Fibras cortas

En la Tabla 4.15 se pueden observar los valores de $F'f$ del concreto con fibras cortas, los resultados muestran que los concretos con adición de fibras tienen valores inferiores con respecto al concreto control. Podría ser debido a que las dimensiones de la fibra afectan la propagación de la grieta, así mismo las fibras cortas no retardan este proceso y puede ocasionar una fractura durante el esfuerzo con la separación de la fibra y la matriz cementante, otros factores como una menor área y además el procesamiento después del consumo (Flores Nicolás et al., 2024).

En la Figura 4.15 se observa los porcentajes de $F'f$ con respecto a la muestra control, como se mencionó anteriormente, todas las muestras presentan una disminución en las propiedades mecánicas, la muestra HC-04 exhibe la mayor disminución de 22 % por lo que las fibras cortas afectan considerablemente sus propiedades de flexión.

Tabla 4.15. Valores de $f'f$ para las muestras con fibras cortas naturales y sintéticas, curado a 28 días.

Muestra	$F'f$ (kg/cm ²)	$F'f$ (Mpa)
C-00	45.33	4.45
MC-02	40.08	3.93
MC-04	42.9	4.21
PC-02	37.36	3.67
PC-04	38.59	3.79
HC-02	37.53	3.68
HC-04	35.41	3.47

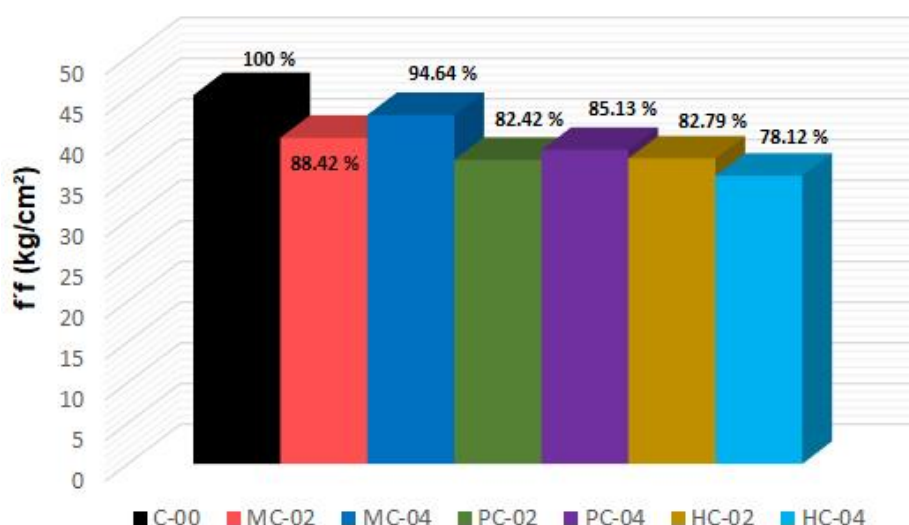


Figura 4.15. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión para FC.

➤ Fibras Tratadas

Los valores de resistencia a la flexión para fibras tratadas se muestran en la Tabla 4.16, de manera general todas las fibras disminuyeron sus valores de 34 kg/cm² y 35 kg/cm² lo que nos indica que el aceite afectó en más del 25% de su resistencia total, como se aprecia en la Figura 4.16.

Estos resultados muestran que las fibras no evitan la propagación de las grietas del concreto cuando el material se encuentra sometido a esfuerzos, además la tenacidad de flexión del concreto disminuye debido a la mala adherencia que ocasiona el aceite con la fibra/pasta y a consecuencia de los

metales pesados como plomo, magnesio, cobre, zinc, cromo, arsénico, cloruros, cadmio y bifenilos policlorados (Chin et al., 2012; Varghese et al., 2017). La disminución en las propiedades mecánicas del concreto con el uso de aceite y fibras son reportada por algunos autores (Hussen, 2016; Al-Attar, 2013; Nadeem et al., 2017).

Tabla 4.16. Valores de $F'f$ para las muestras con fibras tratadas naturales, curado a 28 días.

Muestra	$F'f$ (kg/cm ²)	$F'f$ (Mpa)
C-00	45.33	4.45
MCT-02	34.2	3.36
MCT-04	35.28	3.46
PCT-02	34.19	3.36
PCT-04	35.19	3.45

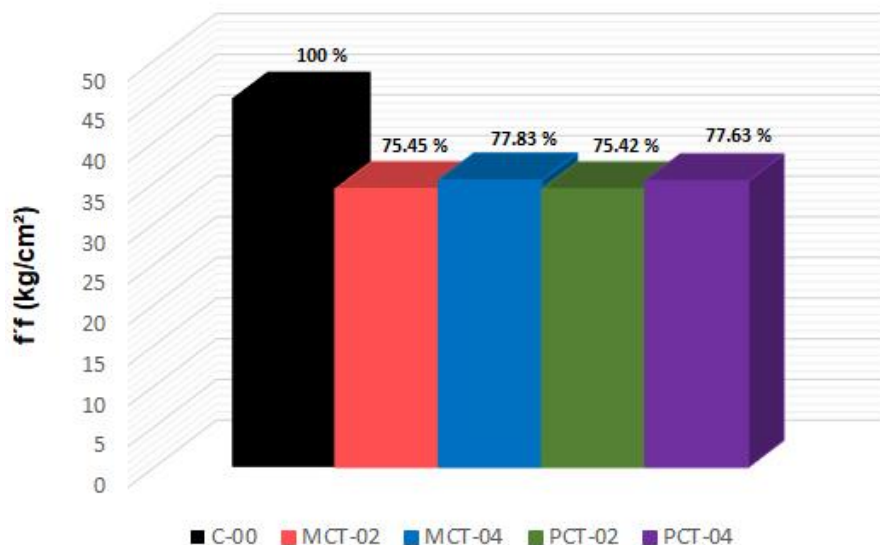


Figura 4.16. Grafica de porcentaje de resistencia a la flexión para FCT.

4.7 Técnicas electroquímicas

4.7.1 Resultados de mediciones electroquímicas del inhibidor en el acero dulce

En la Figura 4.17 se muestra las curvas potenciodinámicas del inhibidor verde de cáscara de Mango en diferentes concentraciones monitoreado a 24 horas. Las curvas de corriente-potencial anódica y catódica se extrapolan hasta su intersección en un punto donde la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}) son obtenidos (Tao et. al., 2012). En la gráficas, las ramas catódicas no presentan cambios significativos para el blanco y con presencia del inhibidor, sin embargo, en las ramas anódicas el potencial de corrosión presentan algunos cambios, es decir, el mecanismo de reacción de desprendimiento de hidrógeno no cambió (rama catódica), pero debido a la adsorción de las moléculas inhibidoras se observó resultó en un cambio significativo en el mecanismo de disolución del hierro (rama anódica), estos resultados son similares a los reportados por otros autores (Veedu et. al., 2019; Ramezanzadeh et al., 2019).

Se observa que al aumentar la concentración del inhibidor el E_{corr} se desplaza hacia valores más nobles, además, la presencia de los extractos provocó disminución en la i_{corr} , probablemente debido a la adsorción de los compuestos orgánicos presentes en los extractos en los sitios activos de la superficie del electrodo, retardando la disolución metálica (Da Rocha et al., 2010; Onukwuli y Omotioma, 2016). En la literatura (Pradityana et. al., 2018; Hussin y Kassim, 2011), se ha informado que si el desplazamiento en E_{corr} comparado a la muestra control es >85 mV, el inhibidor puede verse como un inhibidor de tipo catódico o anódico y si el desplazamiento de E_{corr} es <85 mV, el inhibidor puede verse como de tipo mixto. En este estudio el cambio de potencial de la muestra de 100 ppm es de 62 mV con respecto al blanco, lo que significa que el inhibidor es de tipo mixto en estas concentraciones, con una eficacia anódica predominante.

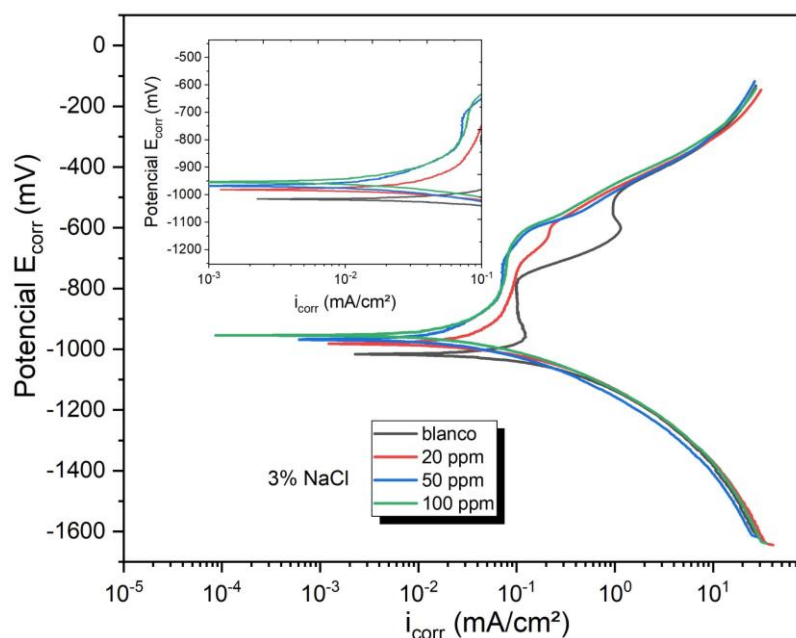


Figura 4.17. Curvas de polarización del acero en presencia del inhibidor del extracto de cascara de Mango.

Los parámetros electroquímicos de E_{corr} , i_{corr} y eficiencia del inhibidor se muestran en la Tabla 4.17. Los valores de E_{corr} aumentan de -1010 a -954 mV cuando la concentración del inhibidor aumenta, así mismo los valores de i_{corr} disminuyen. La eficiencia de inhibición incrementó con una concentración de 50 ppm de extracto etanólico de mango, obteniendo un 63.11%, con valores bajos de i_{corr} de 0.103 a 0.038 $\mu A/cm^2$ y un aumento en la E_{corr} a potenciales más nobles. Por lo tanto, esta concentración se consideró como óptima para utilizarse en la fabricación de muestras de concreto con inhibidor.

Tabla 4.17. Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización del acero al carbono en solución de 3.5% de NaCl.

Mango(ppm)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	η %
blanco	-1016	0.103	---
20	-982	0.053	48.54
50	-965	0.038	63.11
100	-954	0.045	56.31

4.7.2 Resultados de isothermas de adsorción

La adsorción explica principalmente la naturaleza de la interacción entre la superficie del metal y las moléculas del inhibidor. Las moléculas adsorbidas generalmente impiden que se produzcan reacciones de óxido-reducción en la superficie cubierta, mientras que la corrosión se produce sin obstáculos en la zona libre de inhibidor (Ogunleye et al., 2018). Las isothermas de adsorción se utilizan generalmente para predecir el comportamiento de adsorción del inhibidor de corrosión verde sobre la superficie. Una isoterma de Langmuir ideal debe tener una pendiente igual a la unidad. Los valores de pendiente superiores o inferiores a la unidad indican que existe una interacción entre la especie adsorbida (Lima et al., 2015).

Los resultados mostrados en la Figura 4.18, revelan un buen ajuste con la isoterma de adsorción de Langmuir. Se observa que el coeficiente de correlación (R^2) es alto a todas las temperaturas. El elevado R^2 confirma que el inhibidor sigue la isoterma de adsorción de Langmuir.

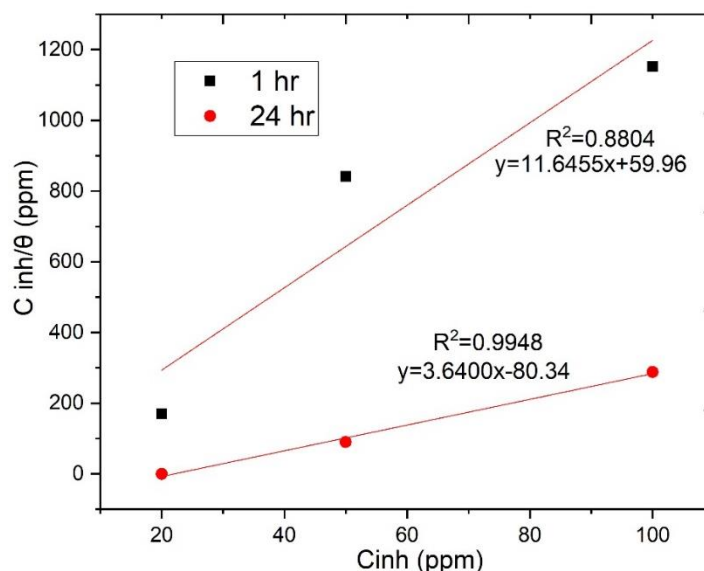


Figura 4.18. Isothermas de adsorción de Langmuir del inhibidor verde de cáscara de mango sobre una superficie de acero en NaCl al 3%.

En la Tabla 4.18 se muestran los resultados de la energía libre de adsorción de las muestras con inhibidor de extracto de cáscara de mango, con un valor estimado de -6.5 kJ/mol, valor que corresponde a las 24 h de medición, además, es negativamente inferior al valor umbral (-40 kJ/mol) requerido para el mecanismo de adsorción química. Por lo tanto, la adsorción del extracto de cáscara de mango es espontánea y se produjo a través del mecanismo de adsorción física (fisisorción), estos datos concuerdan con los reportados por otros autores ([Odiongenyi et al., 2015](#); [Suarez et al., 2020](#)). Se puede expresar que las moléculas de inhibidor son absorbidas en una sola capa en la superficie y no hay interacción con las moléculas adyacentes ([Shamsheera et al., 2020](#)).

Tabla 4.18. Valores de energía libre de adsorción de acero al carbono en presencia de inhibidor verde.

Tiempo	K _{ads}	G° _{ads} (KJ/mol)
1 h	0.0857	-3.9
24 h	0.2524	-6.5

4.7.3 Resultado potencial de media celda

- **Muestras con fibras largas**

Durante el proceso de corrosión, una corriente eléctrica fluye entre los sitios catódico y anódico a través del concreto y este flujo se puede detectar midiendo la caída de potencial en el concreto ([Song y Saraswathy, 2007](#)). Las muestras estuvieron inmersas durante 365 días de exposición en un ambiente salino al 3% de NaCl, que simula la alta agresividad de ataque de sales marinas. El potencial de corrosión (E_{corr}) se midió a partir de un electrodo de referencia, los resultados se muestran en la Figura 4.19. De manera general, en los primeros días de medición las muestras C-00, ML-02 y ML-04 se observan potenciales de corrosión entre -200 mV y -290 mV,

valores ubicados en una zona de incertidumbre, lo cual es un indicativo de que las fibras de mango están actuando como una barrera física que retarda el tiempo que tardan estos iones cloruros agresivos en llegar a la superficie del acero (Blanco et. al., 2020).

Para las muestras HL-02 y HL-04 se aprecia un descenso considerable en los días 1 y 3, con valores más negativos de entre -360 mV a -500 mV, entrando en un rango de 90% de probabilidad de corrosión. Entre los días 120 y 365 se pueden apreciar una caída en los potenciales para todas las muestras con valores de entre -150 mV y -500 mV, a partir de ese hecho las muestras se encuentran en una zona de 90% de probabilidad de corrosión.

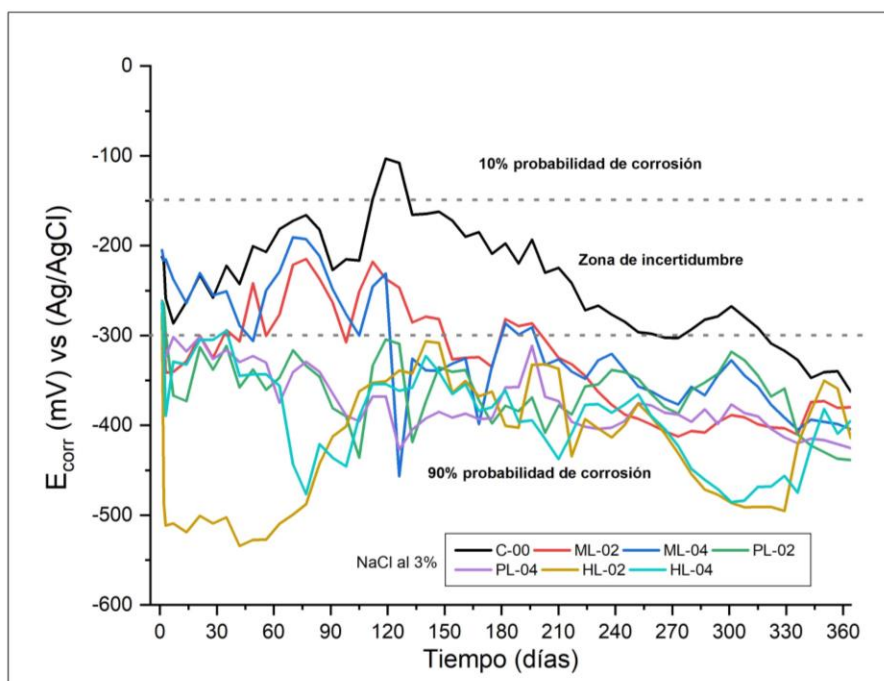


Figura 4.19. Valores de potencial de media celda para FL.

- **Muestras con fibras cortas**

Los especímenes se colocaron en una solución de cloruro de sodio al 3 % simulando un ambiente agresivo, los resultados se muestran en la Figura 4.20. En los primeros días 1 y 7 de medición, la muestra control y las muestra

con fibras de palma (C-00, PC-02 y PC-04) se encuentra en una zona de incertidumbre con valores de potencial de corrosión entre -150 mV y -300 mV. Las muestras de mango y HDPE se encuentran en una zona activa con una probabilidad del 90% de corrosión con valores de -300 mV y -450 mV. Durante el transcurso del tiempo de 40 y 120 días, las muestras HC-02 y MC-02, tienen un ascenso con valores menos negativos de potencial de corrosión entrando en una zona de incertidumbre, podría deberse a la buena distribución de las fibras en la pasta de cemento, apaciguando la difusión de iones cloruros. Durante los 120 días, el resto de las muestras de mango, palma y HDPE, se encuentran en una zona de 90% probabilidad de corrosión, con valores más negativos en comparación con la muestra control de -300 mV y -450 mV. Estos valores a lo largo del tiempo de 365 días de medición empiezan a descender a valores más negativos ocasionando una región activa y la interacción de los iones cloruros con la barra de acero.

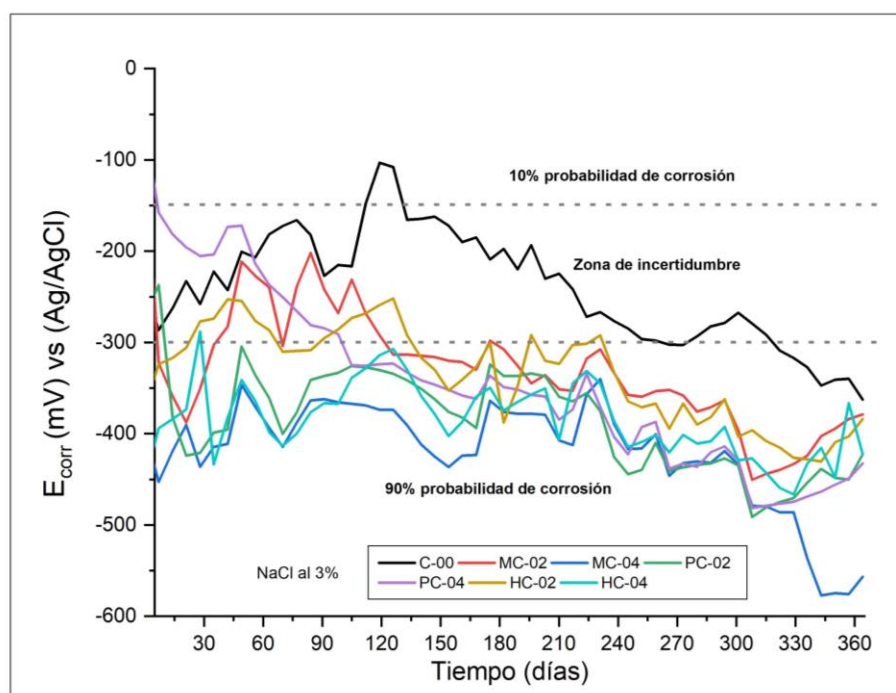


Figura 4.20. Valores de potencial de media celda para FC.

- **Muestras con fibras cortas tratadas**

Los potenciales de corrosión para las fibras tratadas con aceite se aprecian en la Figura 4.21. Al inicio del monitoreo se observa que la muestra MTC-04, presenta valores más positivos de E_{corr} de -100 mV en comparación con las otras muestras, situándose en una zona del 10% de probabilidad de corrosión. Este fenómeno indica una buena distribución de las fibras que retrasan el transporte de fluidos y iones cloruros (Assaad, 2013). Después de 80 días la muestra tiende a tener una caída en los potenciales E_{corr} entrando en una zona de incertidumbre, conforme avanza el tiempo y el día 365 de exposición esta muestra adquiere valores más negativos de -400 mV a -450 mV ingresando en una zona de 90% de probabilidad de corrosión, este hecho podría significar el aumento del contenido de ion cloruro sobre la superficie de la interfaz acero/concreto (Yodsudjai y Pattarakittam, 2017).

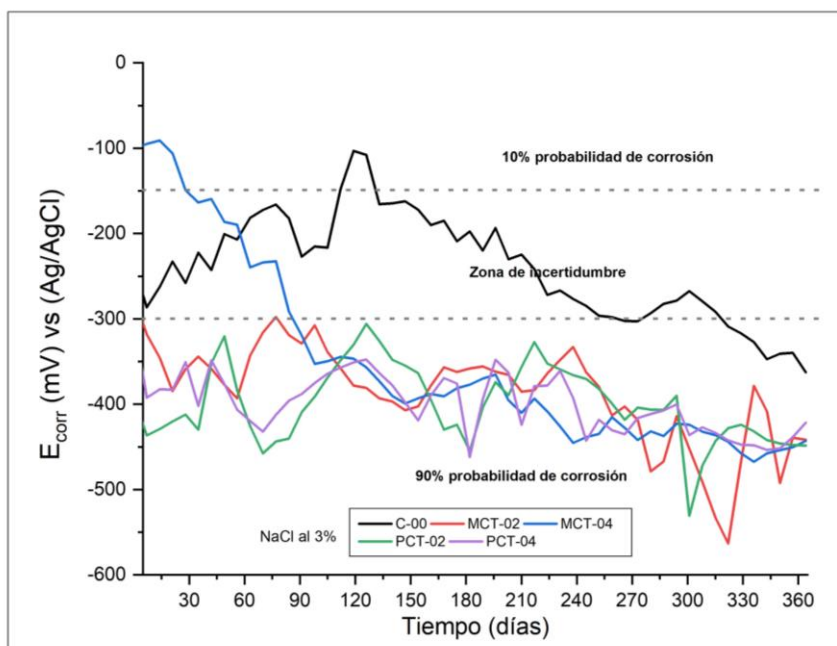


Figura 4.21. Valores de potencial de media celda para FCT.

Las muestras MTC-02, PCT-02 y PCT-04, se encuentran en una zona activa con 90% probabilidad corrosión desde el inicio hasta el final de los días de

medición, debido a la alta porosidad de las muestras lo que conlleva a que existan mayores huecos en la pasta de cemento y la difusión de oxígeno, agua y iones cloruros aumente (Kakooei et al., 2012; Sappakittipakorn y Banthia, 2012).

- **Muestras con Inhibidor**

El monitoreo del potencial de corrosión de las muestras con incorporación de inhibidor y fibras naturales de mango se muestran en la Figura 4.22. Al inicio del día 7 de medición, las dos muestras presentan potenciales menos negativos comparado con la muestra control, valores de -100 mV, ingresando en una zona de 10% de probabilidad de corrosión. Se presenta una caída de potencial para las dos muestras en diferentes tiempos, para la muestra con inhibidor se observa en el día 56, mientras que para la muestra combinada con fibra e inhibidor se observa en el día 70. Estos parámetros pueden atribuirse al aumento de la permeabilidad del concreto (Abdulsada y Török, 2020) lo que indican una mayor concentración de iones cloruros en la barra de acero.

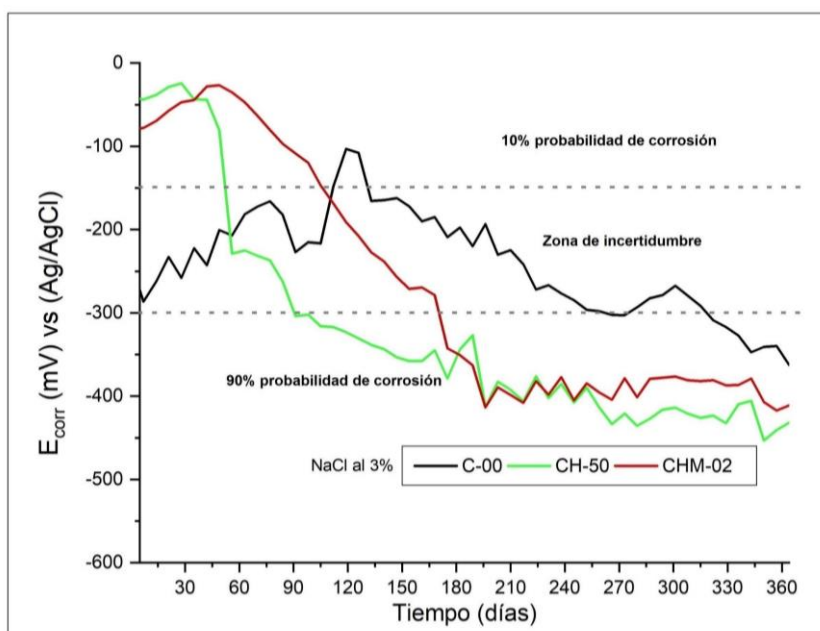


Figura 4.22. Valores de potencial de corrosión para muestras con inhibidor.

Posteriormente, se observan valores más negativos de E_{corr} en la muestra CH-50 durante el transcurso del tiempo de inmersión, entrando en un 90 % de probabilidad de corrosión en el día 90 hasta el día 365, sin embargo, la muestra CHM-02 se observa un retardo en el descenso del E_{corr} ingresando en un 90% de probabilidad en los días 180 hasta el final del monitoreo. Estos resultados indican que las fibras naturales ayudaron a retardar la difusión de los iones cloruros.

4.7.4 Resultados de ruido electroquímico

- **Muestras con fibras largas**

En la Figura 4.23 a), se describen los valores de las fluctuaciones de ruido electroquímico y la velocidad de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto. Al inicio de la prueba, se pueden apreciar de manera general valores altos de R_n de $1E+10 \Omega \cdot cm^2$ y $1E+05 \Omega \cdot cm^2$, lo que nos indica una corrosión moderada para las muestras con fibras largas naturales y sintéticas.

Durante los días 130 y 290 las muestras HL-02 y HL-04, presentan resistencia de ruido más bajo y de manera constante en comparación con las otras muestras, lo que puede indicar una corrosión severa, este comportamiento podría deberse al aumento del volumen de porosidad interfacial en la fibra-matriz que facilitan el transporte del ion cloruro ([Banthia y Sappakittipakorn, 2012](#)).

Al finalizar el periodo de exposición de 365 días, todas las muestras presentan tendencias de R_n bajas y altas, esto puede indicar la presencia de Cl^- en contacto con la interfaz acero/concreto, por lo cual existe una despasivación y pasivación en el metal. Las fibras naturales y sintéticas se comportan como una barrera física para el retardo y difusión de los iones cloruros.

En la gráfica 4.23 b) se aprecia que la velocidad de corrosión es inversamente proporcional al ruido electroquímico, es decir valores altos de R_n la velocidad disminuye. Todas las muestras presentan velocidades de corrosión insignificantes debido a la disminución de los agentes agresivos.

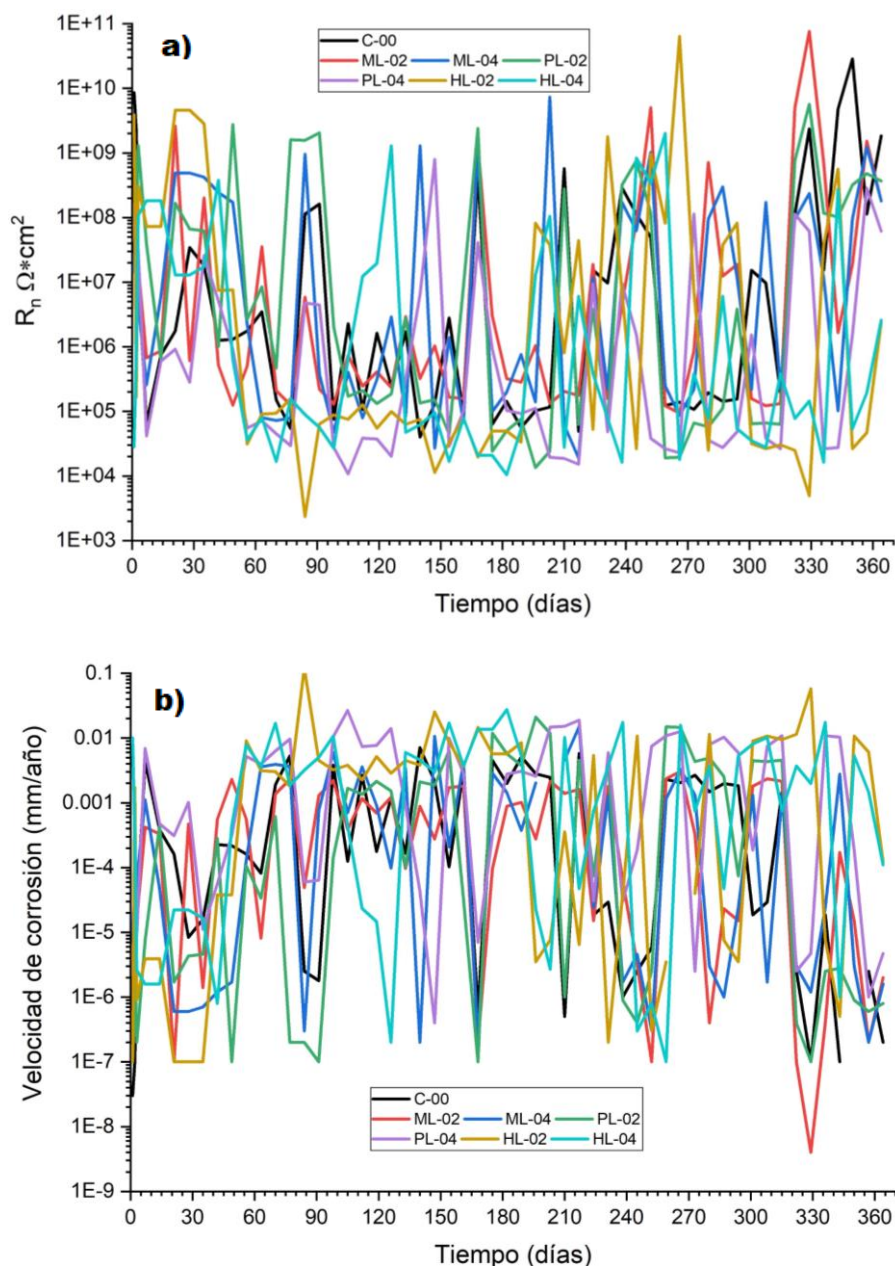


Figura 4.23. Gráfica de las fluctuaciones FL de a) ruido electroquímico y b) velocidad de corrosión.

En la técnica de ruido electroquímico se puede estimar el tipo de corrosión a través de datos estadísticos. En la Figura 4.24 se aprecia que durante el inicio y final de las mediciones el acero de refuerzo mantiene corrosión localizada. La corrosión localizada nos indica que los procesos de oxidación en el metal están ocurriendo en pequeñas superficies o puntos específicos de las barras de acero.

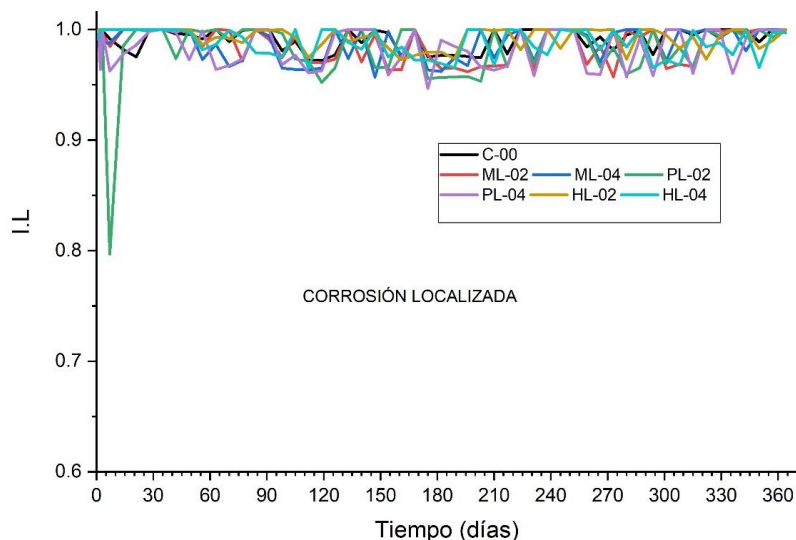


Figura 4.24. Gráfica de valores de índice de localización.

- **Muestras con fibras cortas**

Se llevaron a cabo las mediciones de ruido electroquímico R_n para las muestras con fibras cortas, los resultados se aprecian en la Figura 4.25 a). Al inicio de las mediciones de R_n , se pueden observar valores altos para todas las muestras de orden de magnitud de $1E+10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ indicando una menor velocidad de corrosión en las barras de acero como se aprecia en la Figura 4.25 b). Las fibras cortas naturales y sintéticas parecen retrasar ligeramente el inicio de la corrosión ([Sanjuán y Toledo, 1998](#)).

Al final de los 365 días de medición, las muestras con fibras cortas de mango, ambas concentraciones, presentan mejores valores de R_n comparado con la muestra control entre $1E+9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+08 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

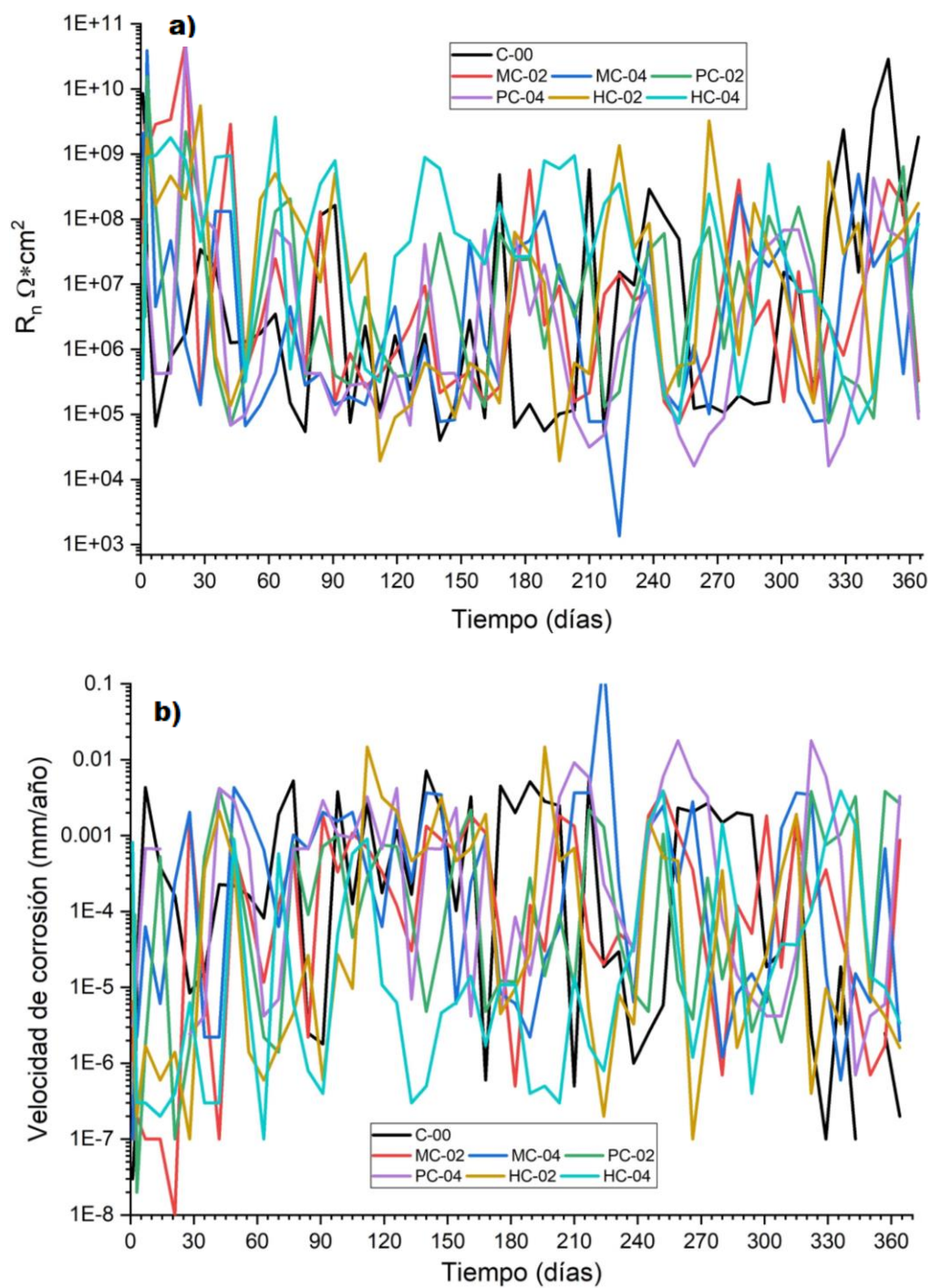


Figura 4.25. Gráfica de las fluctuaciones FC de **a)** ruido electroquímico y **b)** velocidad de corrosión.

Es evidente que todas las muestras de FC exhiben el tipo de corrosión localizada, como se muestra en la Figura 4.26. Es decir, en pequeñas zonas interactúan los iones cloruros con la interfaz acero-pasta de cemento. Con una mayor penetración de iones agresivos, se formarían más picaduras de corrosión y se propagarían a lo largo de la superficie con el tiempo (Tang et al., 2014).

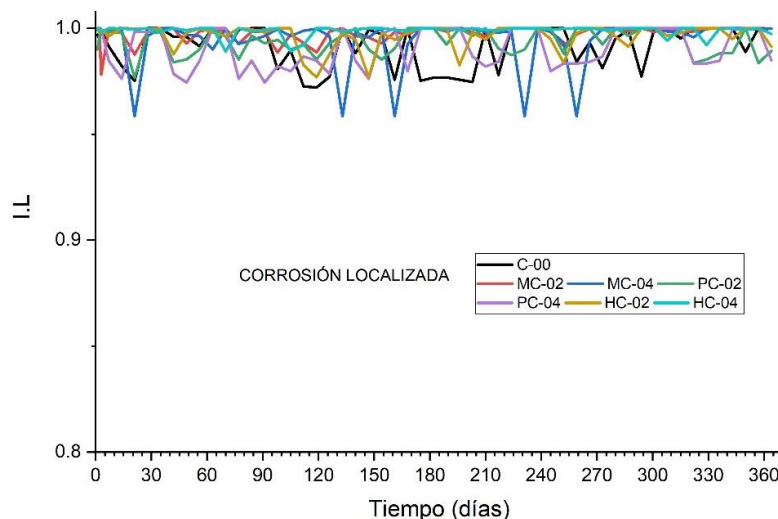


Figura 4.26. Gráfica de valores de índice de localización para fibras cortas.

- **Muestras con fibras cortas tratadas**

En la Figura 4.27 a) y b) se observa los resultados de R_n y velocidad de corrosión, al inicio de las mediciones se aprecia fluctuaciones de ruido con valores de entre $1E+10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Los valores de las muestras tratadas son superiores a la muestra control conforme el tiempo de exposición avanza, conforme aumentan los valores de R_n , la velocidad de corrosión disminuye, la entrada de Cl^- en el concreto reduce los productos de cemento alcalino hidratado que pasivan el acero de refuerzo (Almashakbeh y Al-Akhras, 2022).

Al final del tiempo de exposición, todas las muestras presentan altos y bajos valores de ruido, destacando la muestra MCT-02, que presenta valores constantes de ruido, lo que puede indicar que la fibra tratada y el aceite, se

comporten como barrera física para la difusión de los cloruros, la velocidad de corrosión de las muestras disminuye conforme el tiempo de exposición aumenta.

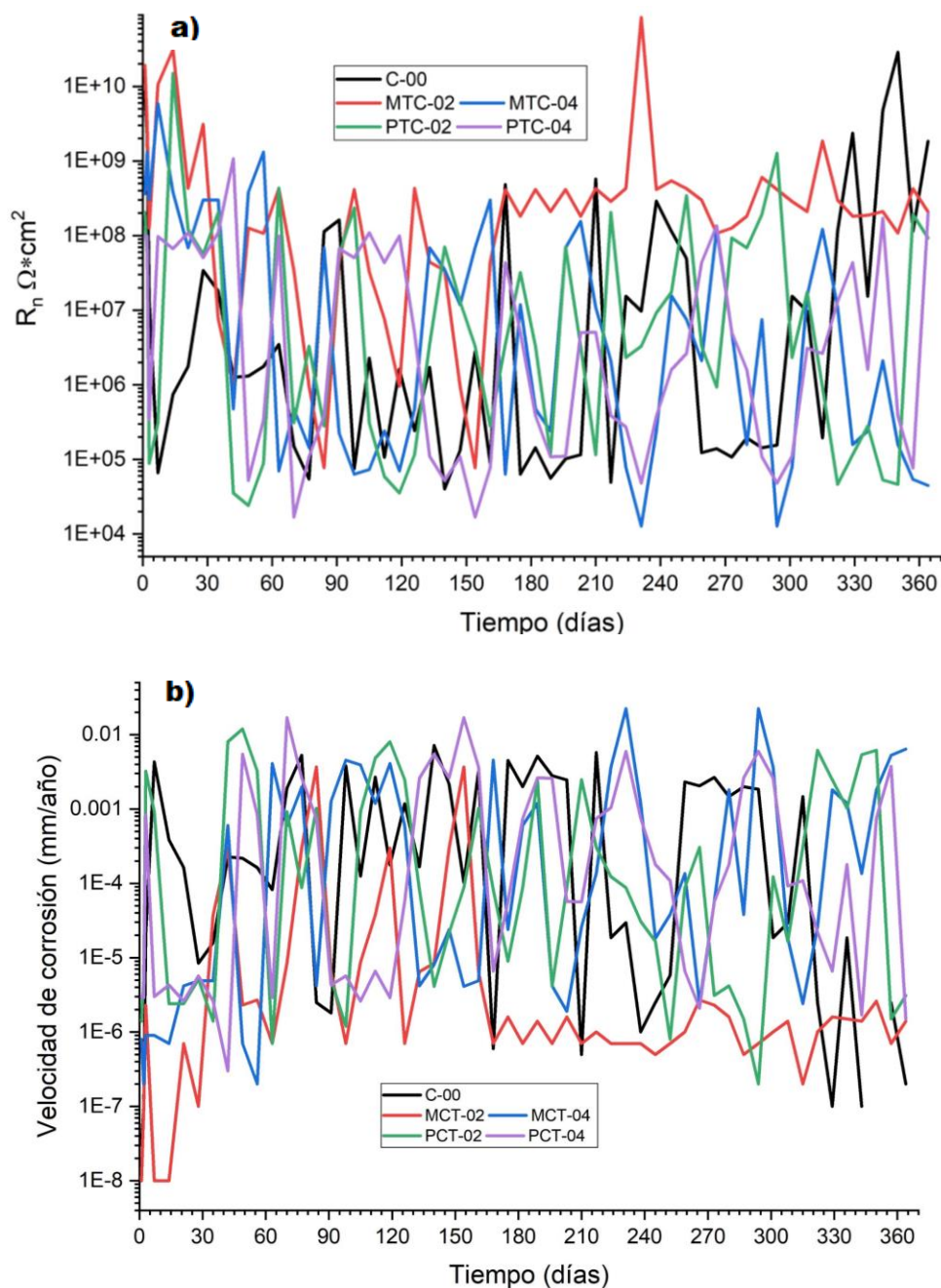


Figura 4.27. Gráfica de las fluctuaciones para FCT de **a)** ruido electroquímico y **b)** velocidad de corrosión.

Todas las muestras presentan un tipo de corrosión localizada de acuerdo con los valores del índice de localización, como se observa en la Figura 4.28.

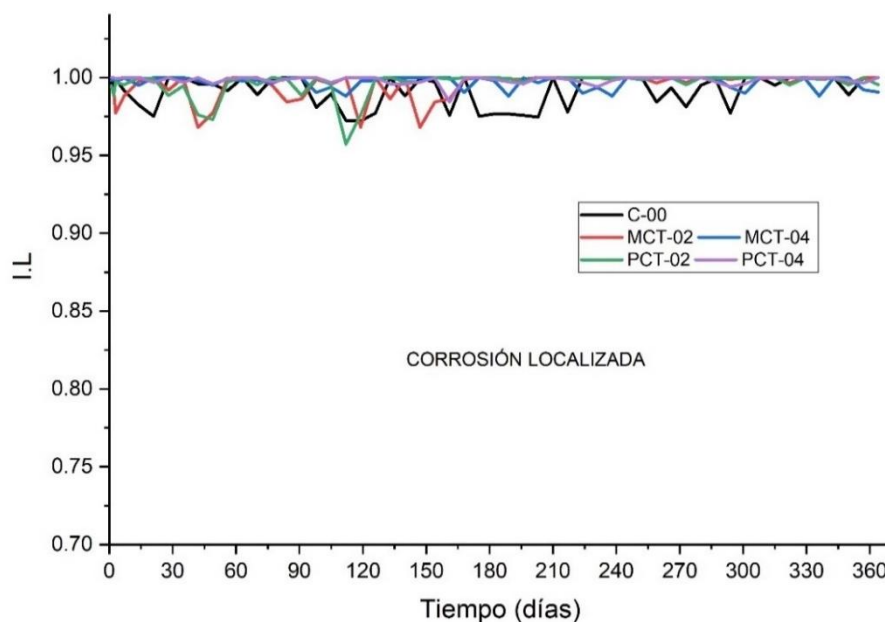


Figura 4.28. Gráfica de valores de índice de localización para fibras cortas tratadas.

- **Muestras con inhibidor**

Los resultados de la resistencia de ruido para las muestras con inhibidor y combinado con fibras naturales se observan en la Figura 4.29 a), en las mediciones a temprana edad se aprecian valores de R_n altos entre $1E+09 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$, indicando que el acero se encuentra en un estado pasivo. Durante los primeros días y hasta el día 280, para las muestras CH-50 y CHM-02 se pueden notar fluctuaciones altas y bajas, indicando un rompimiento de la capa pasiva y formación de película de óxido no protector por corrosión. La presencia del extracto etanólico de mango también redujo la magnitud de estos transitorios de corriente, afirmando sus eficiencias de inhibición de la corrosión (Obot et al., 2019). Pero conforme el tiempo de monitoreo fue avanzando hacia el día 365, el R_n fue disminuyendo para las muestras en presencia de inhibidor, con valores de $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$. La caída

en la R_n podría indicar que la concentración del ion cloruro aumenta sobre la superficie de la barra de acero, por consecuencia la velocidad de corrosión es severa como se aprecia en la Figura 4.29 b), (Zhao et al., 2007).

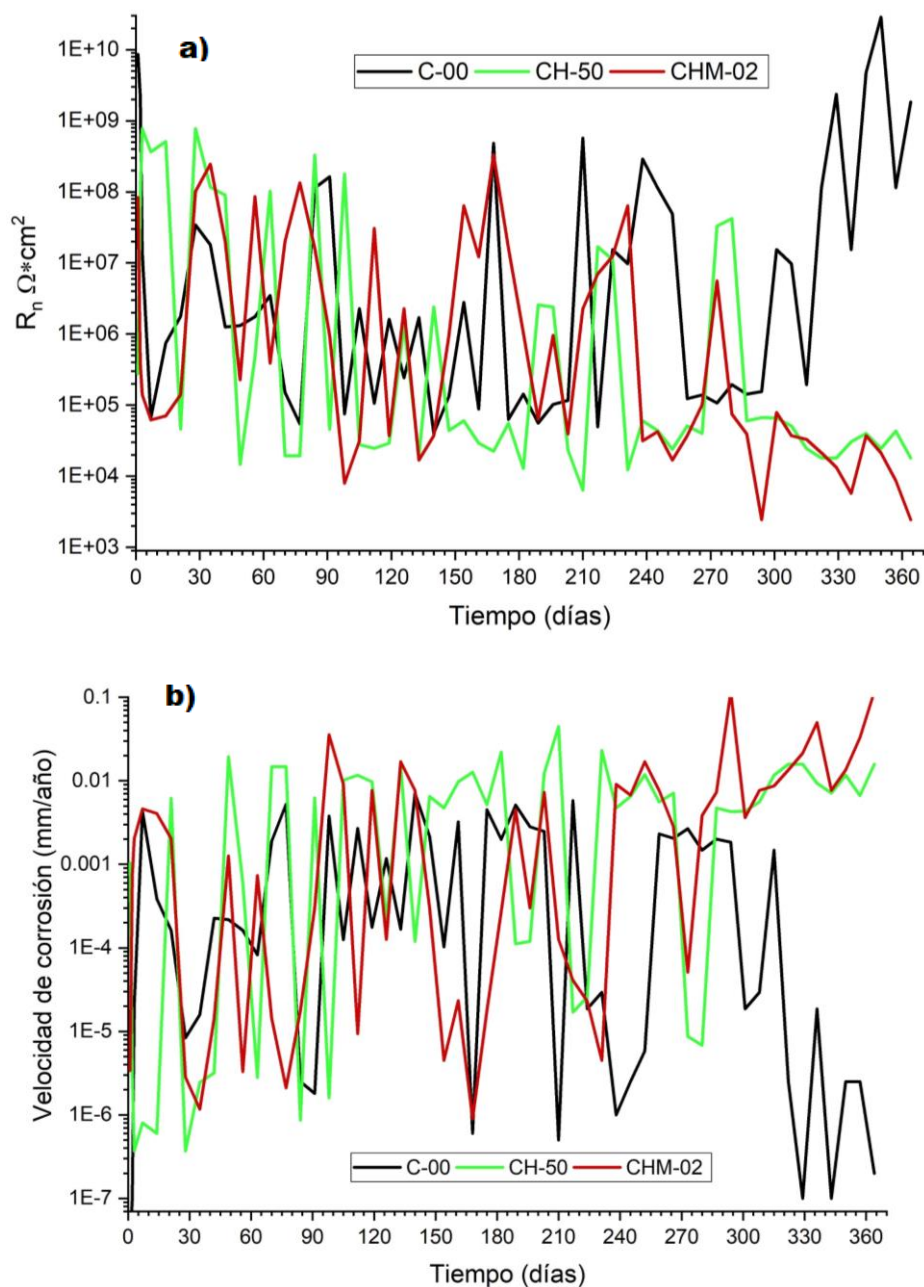


Figura 4.29. Gráfica de transitorios para muestras con inhibidor **a)** ruido electroquímico y **b)** velocidad de corrosión.

La información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión del acero es de suma importancia para la evaluación de métodos de reparación para la predicción de la vida útil y para la evaluación estructural de los elementos corroídos (Alexandre Reginato et al., 2023). El tipo de corrosión presente en las barras de acero es de tipo localizado como se muestra en las Figura 4.30.

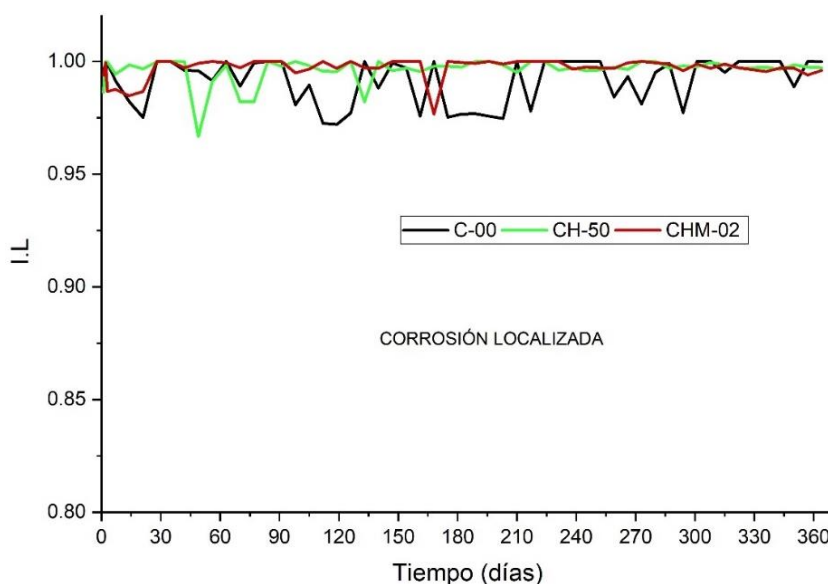


Figura 4.30. Gráfica de valores de índice de localización para probetas con inhibidor.

4.7.5 Resultados de resistencia a la polarización lineal

- **Muestras con fibras largas**

De acuerdo con la Ec. 13 la resistencia a la polarización lineal es la pendiente de una tangente adyacente a las curvas de polarización de Tafel, utilizando una medida de rangos de exploración muy bajas. Los valores de R_p se muestran en la Figura 4.31. Como se puede observar en los primeros días de inmersión, todas las muestras se encuentran con valores bajos de $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Durante el transcurso de exposición, los días 56 a 112 se aprecia una caída en la muestra control situándose con valores $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$, también existe una ligera caída para las muestras PL-04 y ML-02, lo que nos indica una

actividad corrosiva en el metal, valores altos de R_p nos indican que tenemos una menor velocidad de corrosión en el metal. Durante el final de exposición, es decir el día 365, todas las muestras aumentan un orden de magnitud en los valores de R_p de $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ indicando una disminución en la velocidad de corrosión de las barras de acero.

En la Figura 4.32 se observan los rangos de valores de i_{corr} en términos de vida útil del concreto, se aprecia que en el inicio de exposición todas las muestras se encuentran en un rango de elevado y muy elevado de corrosión, con valores de $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, y superiores, estos resultados nos indican que existe una alta interacción de los iones cloruros en la interfaz acero/concreto, además como se observó en los datos estadísticos de I.L., todas las muestras presentan corrosión de tipo localizada.

Finalmente, en el día 365 todas las muestras se mantienen en una corrosión de despreciable a moderada.

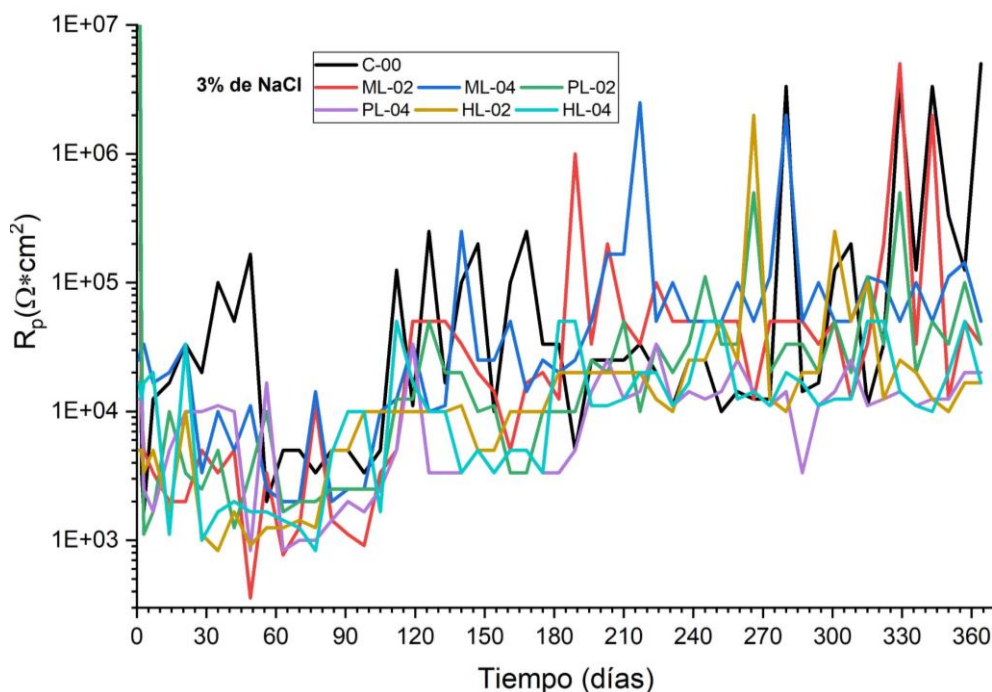


Figura 4.31. Valores de resistencia a la polarización lineal, fibras largas.

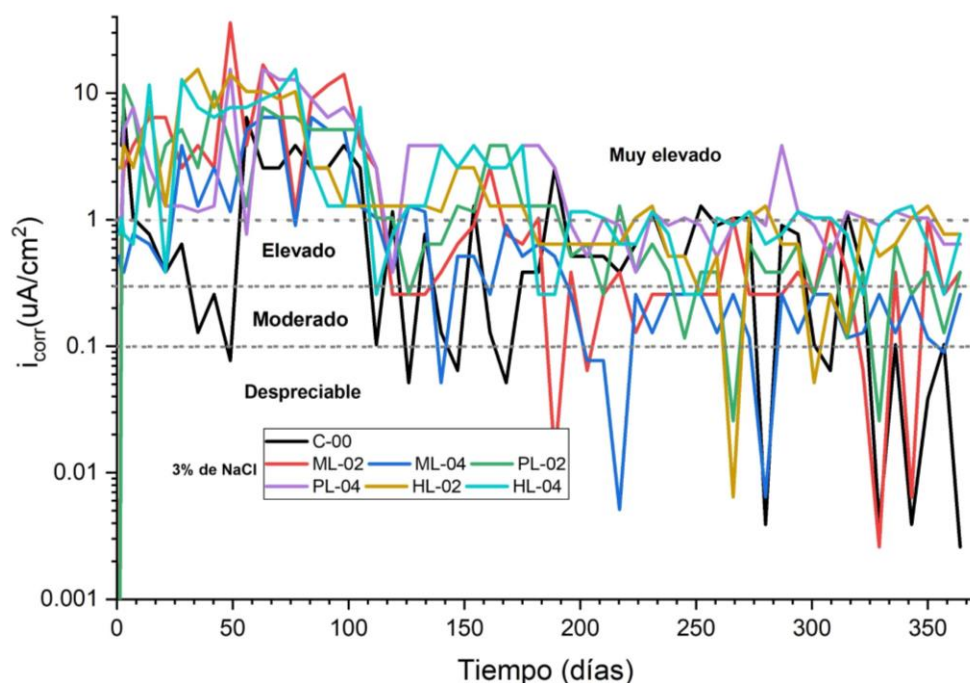


Figura 4.32. Valores de vida útil del concreto, en condiciones agresivas.

- **Muestras con fibras cortas**

Los resultados de R_p para las muestras con FC se describen en la Figura 4.33. Al inicio de la prueba, todas las muestras presentan valores de R_p superiores a la muestra control, cercanos a $1E+05 \Omega \cdot cm^2$, indicando una menor velocidad de corrosión en el metal. Durante el transcurso del tiempo estos valores se mantienen constantes durante los 365 días de exposición al medio salino podría decirse que la corrosión es lenta debido a que la entrada de los iones Cl^- es progresivamente menor.

Por el contrario, la muestra HC-04, se puede observar que tiende a tener transitorios de picos muy altos de R_p valores cercanos a $1E+07 \Omega \cdot cm^2$, la dimensión de la fibra y cantidad tiene una influencia directa en el grado de corrosión de las barras de refuerzo en el concreto (Kakooei, et al., 2012).

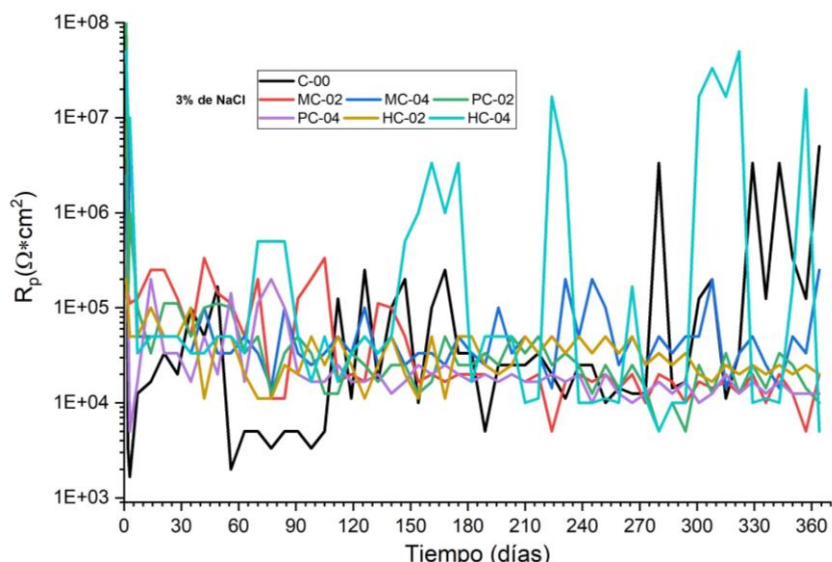


Figura 4.33. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos FC.

La fase de propagación de la corrosión en el acero del concreto en condiciones marinas se puede estimar con los valores de densidad de corriente (i_{corr}) a partir de los valores de R_p , como se muestra en la Figura 4.34. Los criterios de vida útil en las barras de acero se encuentran en una condición de despreciable a moderado al inicio del monitoreo, y al final del experimento se encuentra en un rango de elevado a despreciable.

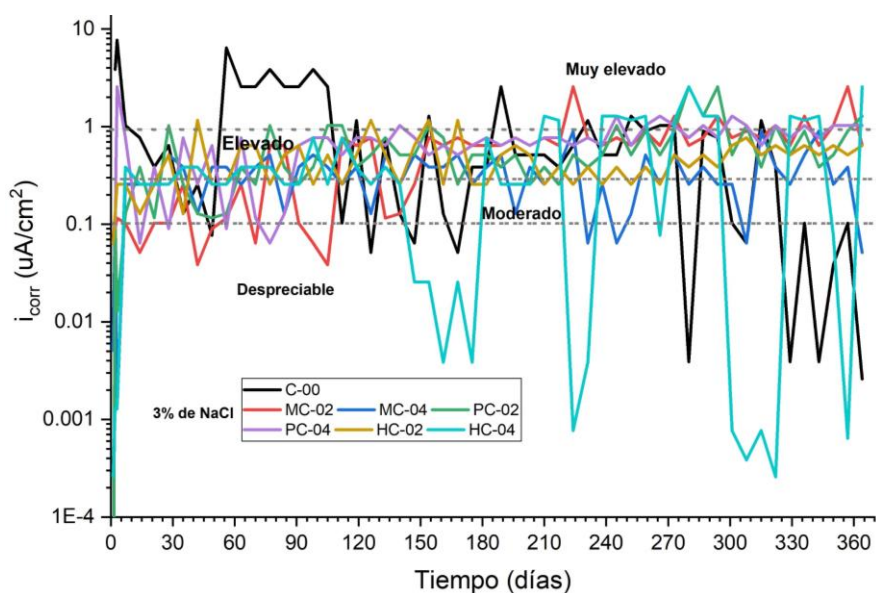


Figura 4.34. Valores de vida útil del concreto con fibras cortas.

- **Muestras con fibras cortas tratadas**

La Figura 4.35 se aprecian los valores de las probetas de concreto con fibras tratadas. En una edad temprana de 20 días, todas las muestras adquieren valores de R_p superiores comparado con la muestra control, conforme avanza el tiempo de inmersión en el día 210 para la muestra MTC-02, se aprecia un ascenso en los comportamientos de R_p con valores altos de entre $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+07 \Omega \cdot \text{cm}^2$, estos valores se hacen constantes hasta el final de la prueba.

Este evento está asociado a una pasivación en el metal, por consecuencia, la velocidad es despreciable de acuerdo con los resultados de densidad de corriente, como se indica en la Figura 4.36. Generalmente, el acero se considera en estado pasivo si la densidad de corriente es inferior a 0.1 mA/cm^2 , y en el estado activo para valores superiores a 1 mA/cm^2 (Rodrigues, et al., 2012; Andrade y Alonso, 2004).

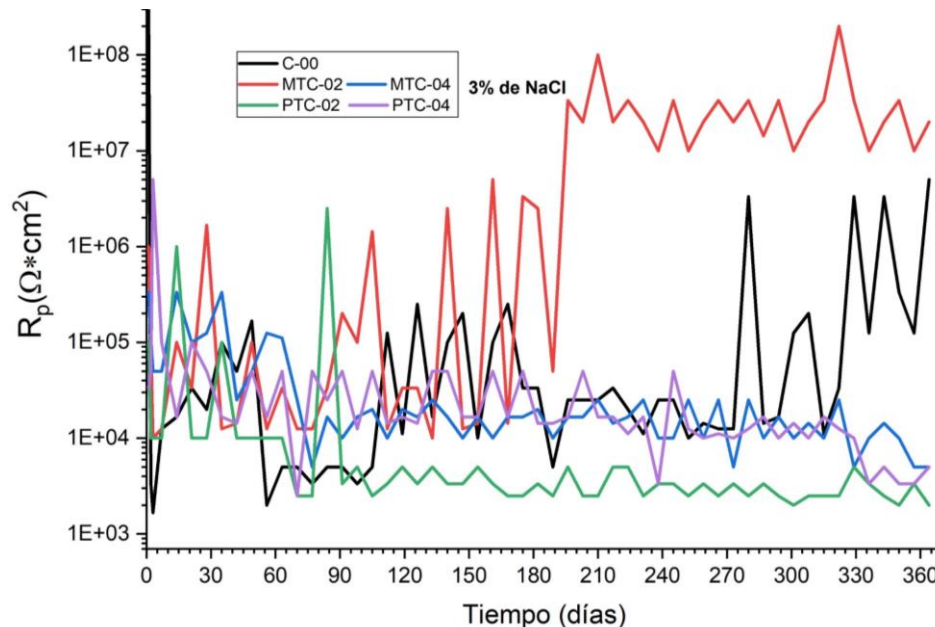


Figura 4.35. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos con fibras cortas tratadas.

El aceite tiene un efecto positivo en la velocidad de corrosión actuando como una pequeña película aislante alrededor del metal, estos resultados son comparables con los obtenidos por otros autores (Dharma, et al., 2023).

Para la muestra de PTC-02, se pueden observar bajos valores de R_p conforme se indican en los días 70 a 365 de exposición, valores de entre $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$ indicando una corrosión muy elevada, debido a la mala adherencia de las fibras con la pasta cementante y en conjunto con la alta porosidad del concreto ocasionando una mayor difusión de oxígeno y iones cloruros en la interfaz acero/pasta (Andrade, 2019).

Las muestras MTC-04, PTC-02 y PTC-04 presentan altos valores de i_{corr} , los aumentos en la i_{corr} con el tiempo pueden no necesariamente representar un aumento en velocidad de corrosión en toda la barra de refuerzo, sino más bien la despasivación e inicio de corrosión activa (Nicolás et al., 2024).

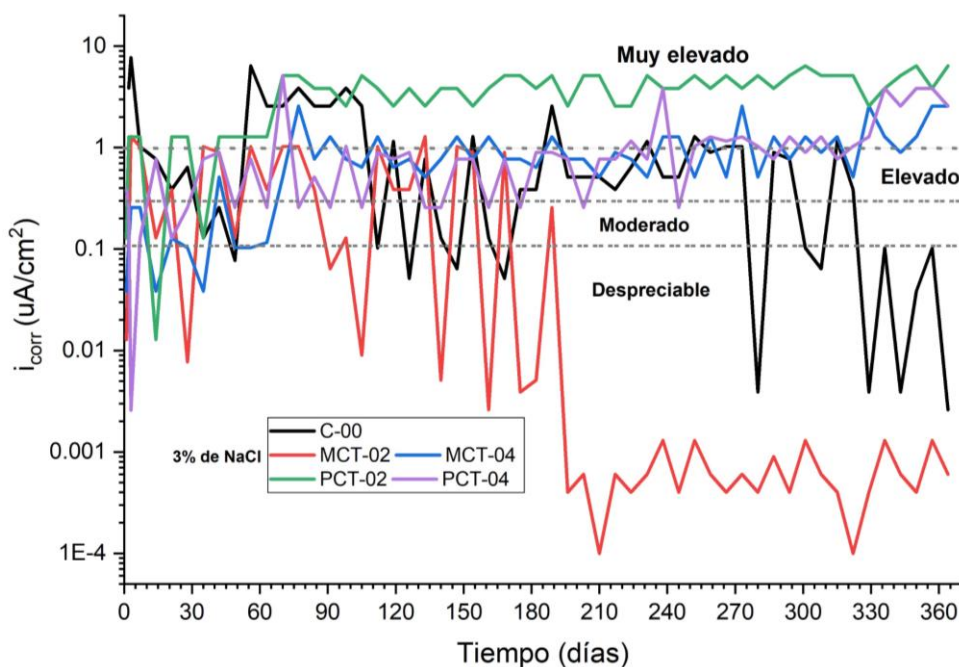


Figura 4.36. Valores de vida útil del concreto con fibras cortas tratadas.

- **Muestras con inhibidor**

Los resultados de R.P.L para las muestras con inhibidor y la combinación de fibras naturales se detalla en la Figura 4.37. Durante el inicio y hasta el día 70 de monitoreo se observa valores altos de R_p para ambas muestras valores de entre $1E+05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ indicando un bajo proceso de corrosión en el metal.

Estas dos muestras, tienen una mejor respuesta a la corrosión del acero, la presencia de los extractos de mango y la fibra provocó aumento en la R_p , probablemente debido a la adsorción de los compuestos orgánicos presentes en los extractos en los sitios activos de la superficie del acero, retardando tanto la disolución metálica como reacciones de evolución de hidrógeno (Da Rocha et al., 2010; Onukwuli y Omotioma, 2016). Así mismo, como se mencionó anteriormente en este trabajo, la fibra ayuda a retardar los problemas de grietas y actúa como una barrera física para la difusión de los iones $-\text{Cl}$.

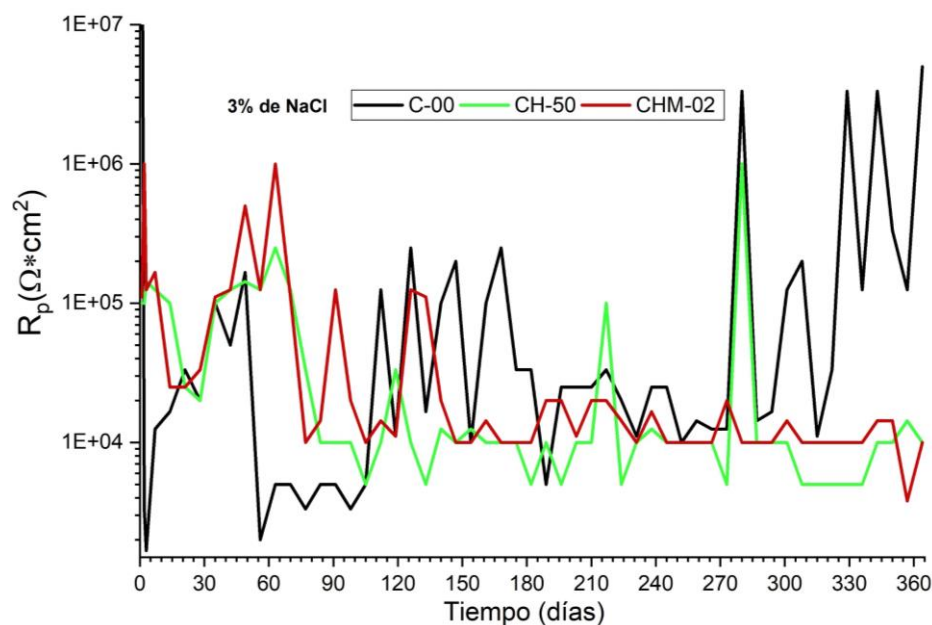


Figura 4.37. Valores de resistencia a la polarización lineal para concretos con inhibidor de mango.

Durante el día 80 se observa una caída en los valores de R_p para ambas muestras a valores de $1E+04 \Omega \cdot \text{cm}^2$, estos valores se mantienen constantes hasta el final de la prueba. Este fenómeno se debe posiblemente a la alta difusión de agentes agresivos como Cl^- , O_2 y H_2O (Da et al., 2018), debido a que estas muestras presentaron mayores huecos en la matriz de cemento. En la Figura 4.38 se aprecia la durabilidad del concreto conociendo los valores de densidad de corriente (i_{corr}) del metal. Las probetas CH-50 y CHM-02 expuesto a 365 días en la solución del medio salino se aprecia en un rango de corrosión elevado y muy elevado.

Estos valores indican el inicio de la corrosión activa del acero de refuerzo en el concreto, así como a la formación de óxidos no protectores sobre la superficie del metal como lo reportan otros autores (Pech Canul and Castro, 2002).

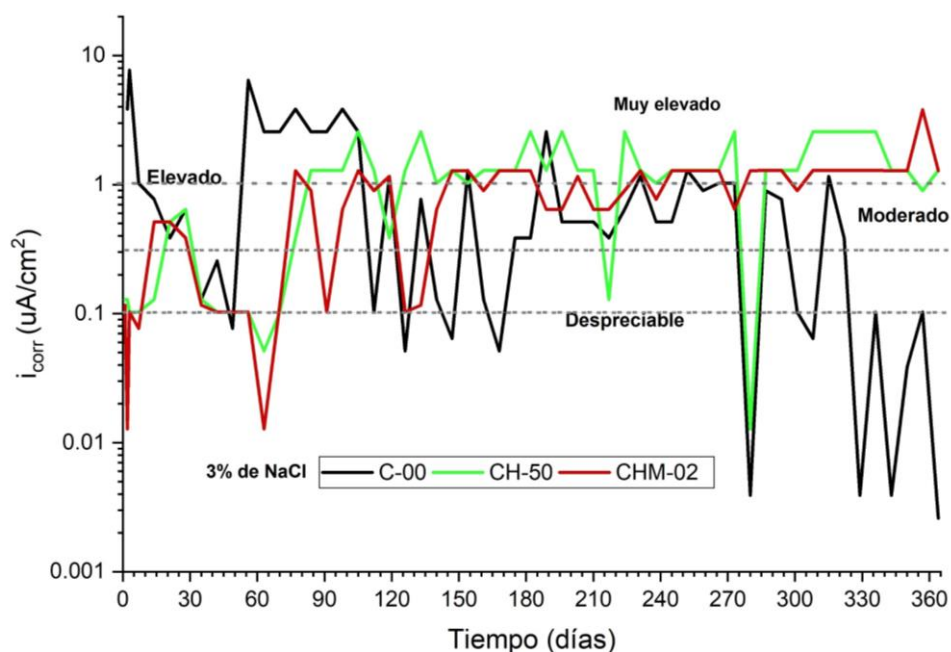


Figura 4.38. Valores de vida útil del concreto con inhibidor.

4.7.6 Resultados de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

- **Muestras con fibras largas**

La técnica de EIS, se ocupa de la polarización del acero de refuerzo con una corriente alterna débil (CA) contra un contraelectrodo, y con medir el potencial del acero E_{corr} , contra un electrodo de referencia (Dhouibi et. al., 2002). Los resultados de EIS para las fibras largas se representan en la Figura 4.39, a través de los diagramas de Nyquist o espectros de impedancia en donde se observa Z_{real} (Z') en la abscisa y $Z_{imaginaria}$ (Z'') en la ordenada, medida a varias frecuencias (generalmente entre 100 kHz y 10 mHz) (Daniyal y Akhtar, 2020).

Los espectros EIS de alta frecuencia en el diagrama de Nyquist suelen ser un bucle capacitivo, que generalmente se atribuye a la resistencia óhmica de la solución en los poros del concreto basado en el tiempo de reacción del electrodo (R_s) y a bajas frecuencias es posible atribuir el bucle a un proceso de transferencia de carga en combinación con un proceso de transporte masivo (R_{ct}) (Nicolás et. al., 2024; Li et. al., 2020; Karimah et. al., 2021). En el día 1 de inmersión (Figura 4.39a) se puede observar que la muestra C-00, ML-02 y PL-02 tiene un primer semicírculo incompleto y un segundo semicírculo deprimido, así mismo el diámetro de estos semicírculos es mayor en comparación con las muestras con mayor porcentaje de fibras naturales y sintéticas, estos valores se asocian a un estado pasivo del acero.

En el día 28 de la prueba (Figura 4.39 b), se observa un desplazamiento del origen para todas las muestras, este fenómeno indica la resistencia R_s de las probetas. Si el desplazamiento se encuentra más alejado del origen significa que el material tiene una resistencia a la solución mayor. Se puede apreciar que las muestras ML-02, PL-04 y HL-04 presentan una R_s más bajo en comparación con las otras muestras, sin embargo, todas las muestras

presentan R_s bajo si lo comparamos a la muestra control, lo anterior demuestra la facilidad del paso de los iones cloruros libres.

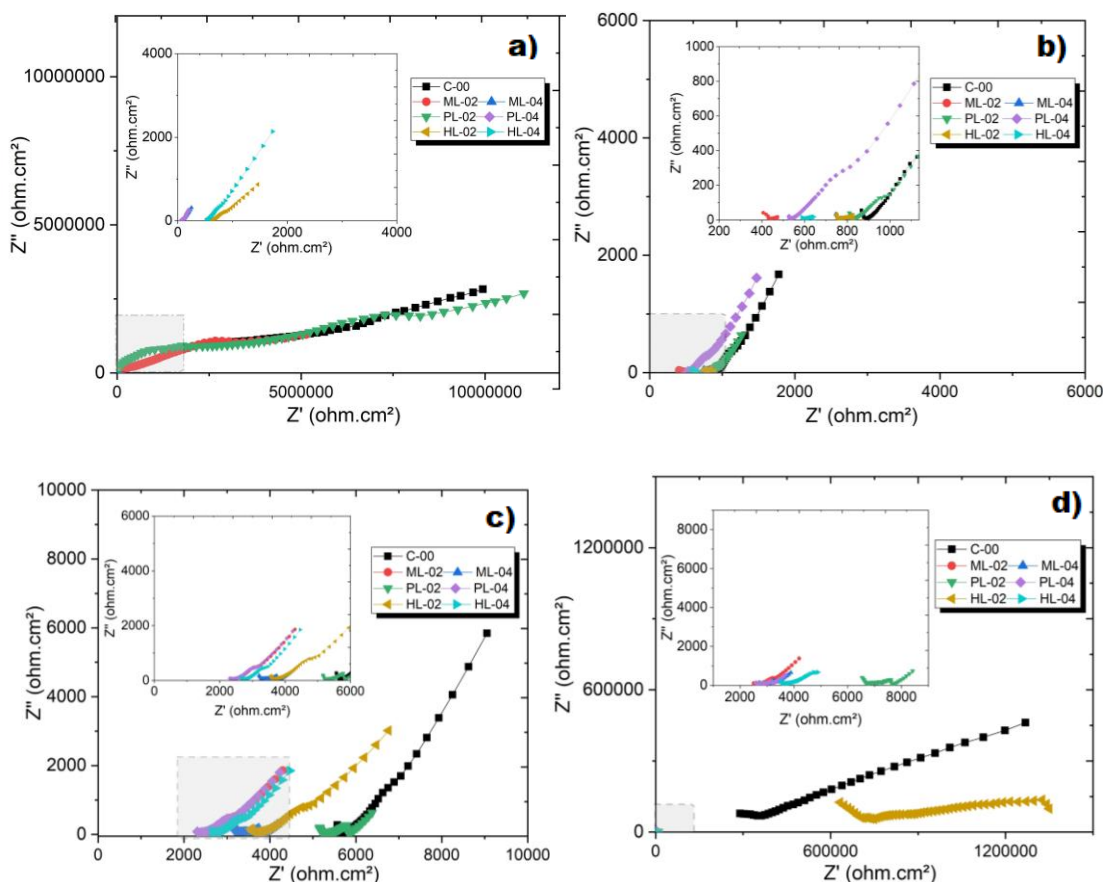


Figura 4.39. Diagramas de Nyquist, fibras largas **a)** 1 día **b)** 28 días **c)** 168 días y **d)** 365 días.

En el día 168 de inmersión (Figura 4.39 c), la muestra PL-02 tiene mayores valores de R_s y de transferencia de carga, estos valores son muy similares a la muestra control, indicando una menor velocidad de corrosión en la varilla de refuerzo en comparación con las muestras con mayor porcentaje de fibras.

En el día 365, como se aprecia en la Figura 4.39 d) se pueden apreciar a bajas frecuencias altos valores de R_{tc} para la muestra control y muestra con porcentaje bajos de fibras de HDPE (HL-02), si el semicírculo formado a

bajas frecuencias es significativamente reducido, entonces hay un proceso de corrosión del acero y viceversa (Ribeiro y Abrantes, 2016).

Los resultados del diagrama de Bode-Fase se muestran en la Figura 4.40. A edades tempranas de 1 día (Figura 4.40 a) las muestras C-00, PL-02 y ML-02, presentan valores altos de R_s , así mismo, en frecuencias bajas ambas probetas presentaron valores de impedancia altos de $1E+07 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Estos valores están relacionados con presencia de los procesos corrosivos en la interfaz acero/concreto, es decir la tasa de corrosión disminuye. En la Figura 4.40 b) durante el monitoreo de 28 días, se observan cambios en los diagramas de impedancia, los valores disminuyeron para todas las muestras de $1E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$, en consecuencia, la velocidad de corrosión del acero aumenta.

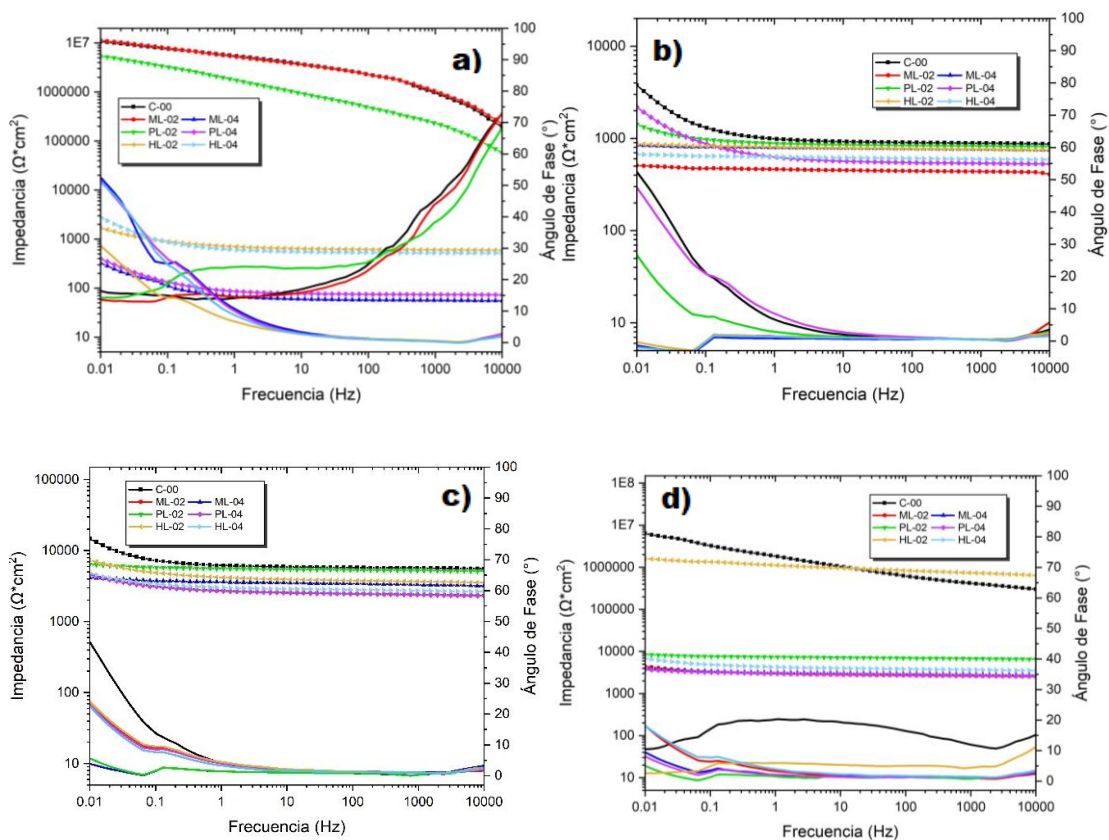


Figura 4.40. Diagramas de Bode-fase y ángulo, **a)** 1 día **b)** 28 días **c)** 168 días y **d)** 365 días.

Conforme avanza el tiempo de monitoreo, la Figura 4.40 c) muestra el día 168 de inmersión. En la muestra PL-02 se puede notar a altas frecuencias valores similares de R_s en comparación a la muestra control, indicando un efecto positivo de las fibras de palma, sin embargo, a bajas frecuencias se observan valores bajos de impedancia de $7E+03 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en conjunto con las otras muestras, este comportamiento indica una zona activa de corrosión.

Al finalizar el periodo de mediciones, específicamente en el día 365 como se aprecia en la Figura 4.40 d) se demuestra un efecto positivo para las fibras sintéticas en menor porcentaje con valores muy altos de impedancia de $1E+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Este hallazgo es importante porque indica que las fibras de HDPE impiden que los iones cloruros que se encuentra en el interior de la pasta a causa de la porosidad alcancen la superficie del metal y su velocidad sea mucho menor. La dimensión y la cantidad de fibras tiene una influencia directa en el grado de corrosión de las barras de refuerzo en el hormigón (Kakooei et. al., 2012).

- **Muestras con fibras cortas**

La interpretación de los datos en las gráficas de Nyquist se puede observar en la Figuras 4.41. Durante las primeras 24 horas de monitoreo, se observa un incremento en los radios de los arcos capacitivos para la muestra PC-02 asociado a la transferencia de carga como se aprecia en la Figura 4.41 a), este fenómeno indica una pasivación en el acero de refuerzo. Después de 28 días (Figura 4.41b) del monitoreo todas las muestras tienen un mayor desplazamiento del origen demostrando una mayor resistencia a la solución, la R_s no depende del proceso o de los productos de corrosión, sino solo de la concentración de iones Cl^- en solución (Bensabra y Azzouz, 2013). Así mismo, el aumento en el arco capacitivo para las muestras MC-04 y PC-04, significa una mejor respuesta a la difusión de los cloruros en los poros del concreto, debido a que la línea recta inclinada en el gráfico a bajas

frecuencias indica un mecanismo de difusión de oxígeno (Herrera Hernández et al., 2019).

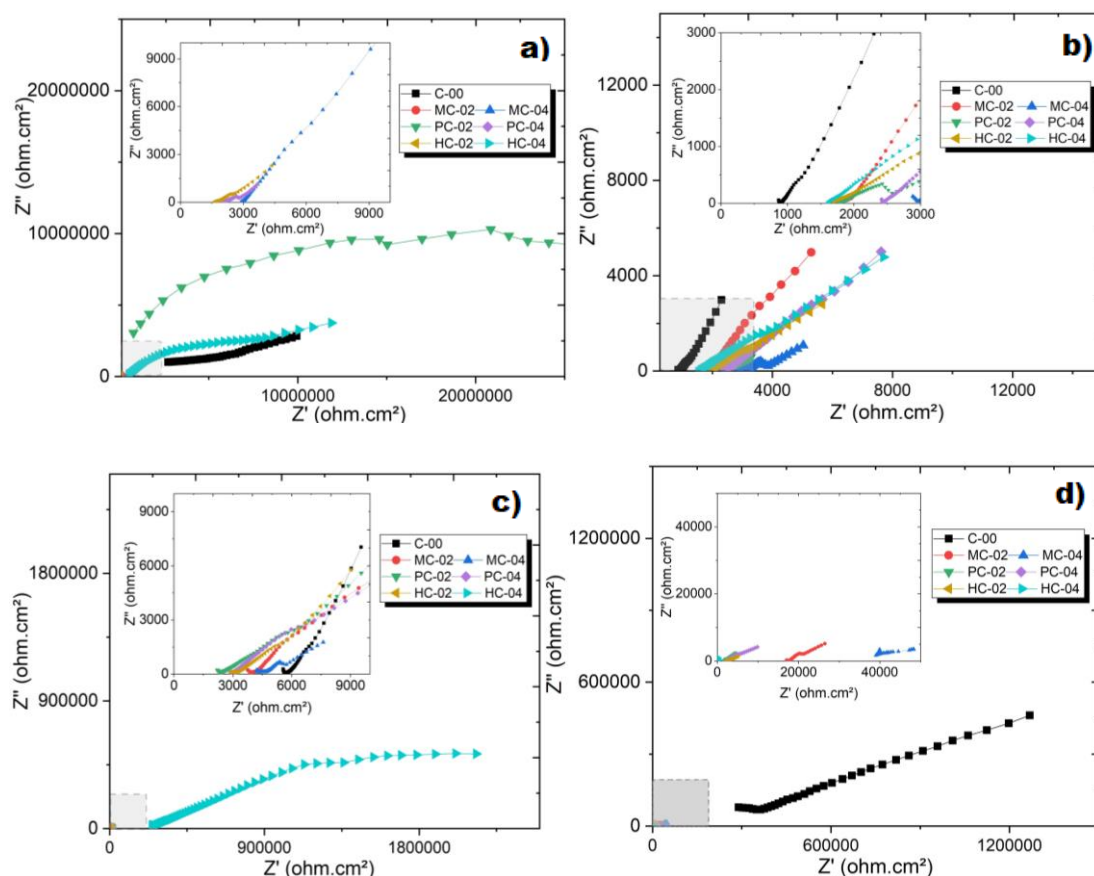


Figura 4.41. Diagramas de Nyquist, fibras cortas **a)** 1 día **b)** 28 días, **c)** 168 días y **d)** 365 días.

En la Figura 4.41 c) se muestran las mediciones a 168 días de inmersión del experimento, se puede observar que la muestra HC-04 mostró la resistencia más alta de R_s y R_{ct} esto podría atribuirse a la baja difusión de cloruros a través del concreto y capas pasivas (Wei et al., 2021). Donde se puede notar que los arcos capacitivos aumentan ocasionando que la superficie del acero sea menos activa. Conforme el tiempo de exposición avanza en el día 365 (Figura 4.41d) se puede apreciar una disminución en la R_s para todas las muestras de fibras cortas naturales y sintéticas, además de disminución de los arcos capacitivos, esto podría atribuirse a la destrucción de la película

pasiva debido al aumento de la concentración de cloruro y las reacciones de corrosión en la interfaz acero/concreto (Wei et al., 2021).

El análisis de los diagramas de Bode-Fase se observan en la Figura 4.42, la impedancia de baja frecuencia corresponde a la impedancia total, que consiste en la resistencia de la solución, la resistencia de la película y la resistencia de transferencia de carga (Wei et al., 2021). En el día 1 (Figura 4.42a), las muestras C-00, PC-02 y HC-04, presentan valores altos de R_s , esta tendencia de valores se muestra también a bajas frecuencias, los valores de impedancia oscilaron entre $1E+07 \Omega \cdot \text{cm}^2$ y $1E+08 \Omega \cdot \text{cm}^2$, lo que demuestra un nivel bajo de actividad de corrosión de las barras de acero.

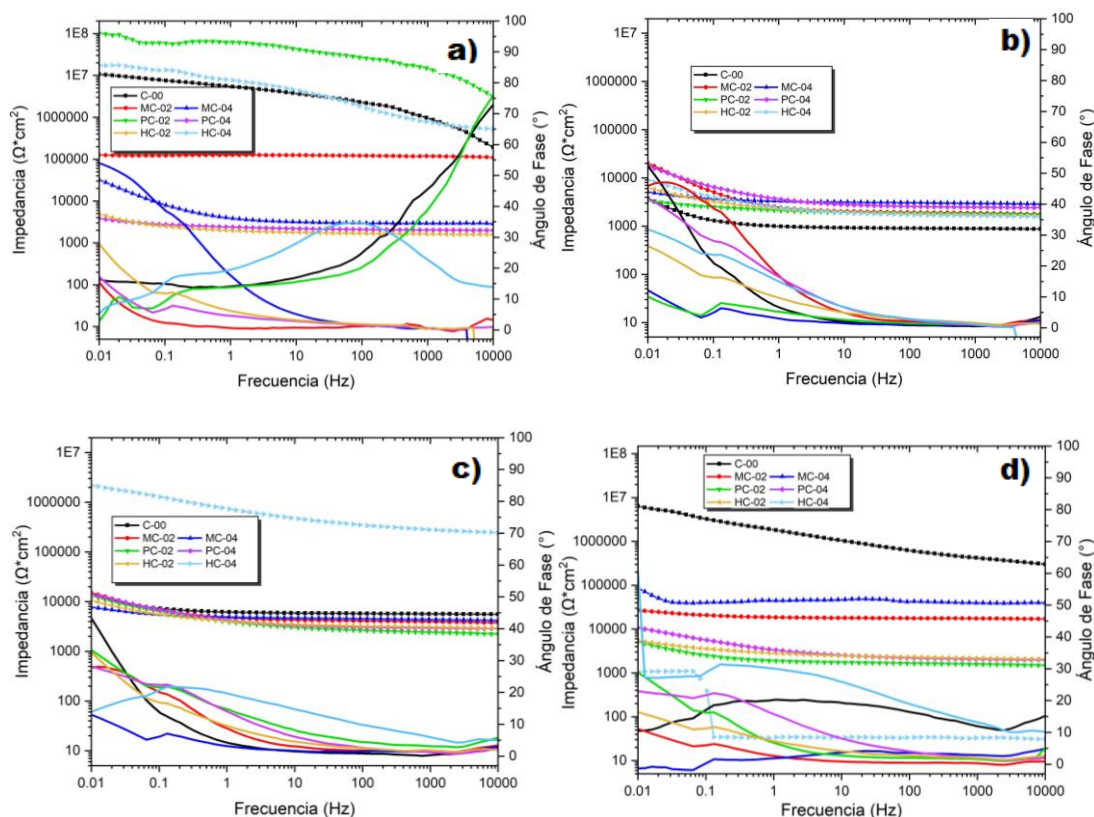


Figura 4.42. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas **a)** 1 día **b)** 28 días **c)** 168 días y **d)** 365 días.

En el periodo de 28 días (Figura 4.42b), se observan cambios en frecuencias bajas, todas las muestras presentan una disminución de impedancia con

valores de $1\text{E}+03 \Omega\cdot\text{cm}^2$ y $1\text{E}+04 \Omega\cdot\text{cm}^2$. Este fenómeno podría deberse al aumento de los agentes agresivos.

En la Figura 4.42 c) se observan las muestras a 168 días del monitoreo, se puede apreciar el aumento de impedancia para la muestra HC-04 en comparación con la muestra control, lo que podría significar una pasivación del metal, los valores altos en esta región de baja frecuencia pueden estar asociados con la presencia de la película pasiva ([Fattah-Alhosseini et al., 2011](#); [Cellat et al., 2017](#)). Las muestras restantes presentan valores similares de impedancia a la muestra C-00 de $1\text{E}+04 \Omega\cdot\text{cm}^2$.

Al finalizar el experimento a los 365 días (Figura 4.42d), estos valores disminuyen a una orden de magnitud $1\text{E}+03 \Omega\cdot\text{cm}^2$ lo que podría atribuirse a un aumento de la tasa de transporte masivo de oxígeno disuelto dentro del concreto y mayor actividad corrosiva.

- **Muestras con fibras cortas tratadas**

Los resultados de EIS a las 24 horas se muestran en la Figura 4.43 a), en el inicio de medición, se puede observar ampliamente que la muestra control presenta una mejor resistencia a la solución y una mayor impedancia con semicírculos definidos R_s y R_{ct} , valores de $1\text{E}+06$ y $1\text{E}+07 \Omega\cdot\text{cm}^2$ este fenómeno puede ser explicado por la baja porosidad. Se pueden notar para las muestras con fibras tratadas semicírculos pequeños y deprimidos, indicando bajos valores de R_s e impedancia debido a que existe mayores poros en el concreto provocando la difusión de agentes agresivos de Cl^- , O_2 y H_2O .

Posteriormente, en el día 28 (Figura 4.43b) se puede observar una notable mejora para las fibras tratadas con aceite de motor usado, la muestra MTC-04 presenta una mejor resistencia a la solución e impedancia con valores de $1\text{E}+04 \Omega\cdot\text{cm}^2$, con respecto a la muestra control.

En el día 168 es visible el aumento de la muestra MTC-02 sobre la resistencia a la corrosión, presenta valores altos de impedancia de $1\text{E}+06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ superiores a la muestra control. Este hecho podría deberse a la formación de una película protectora del aceite de motor usado (UEO) en la superficie del metal provocando altos valores de impedancia, indicando una menor velocidad de corrosión en la barra de acero (Dorothy et al., 2021).

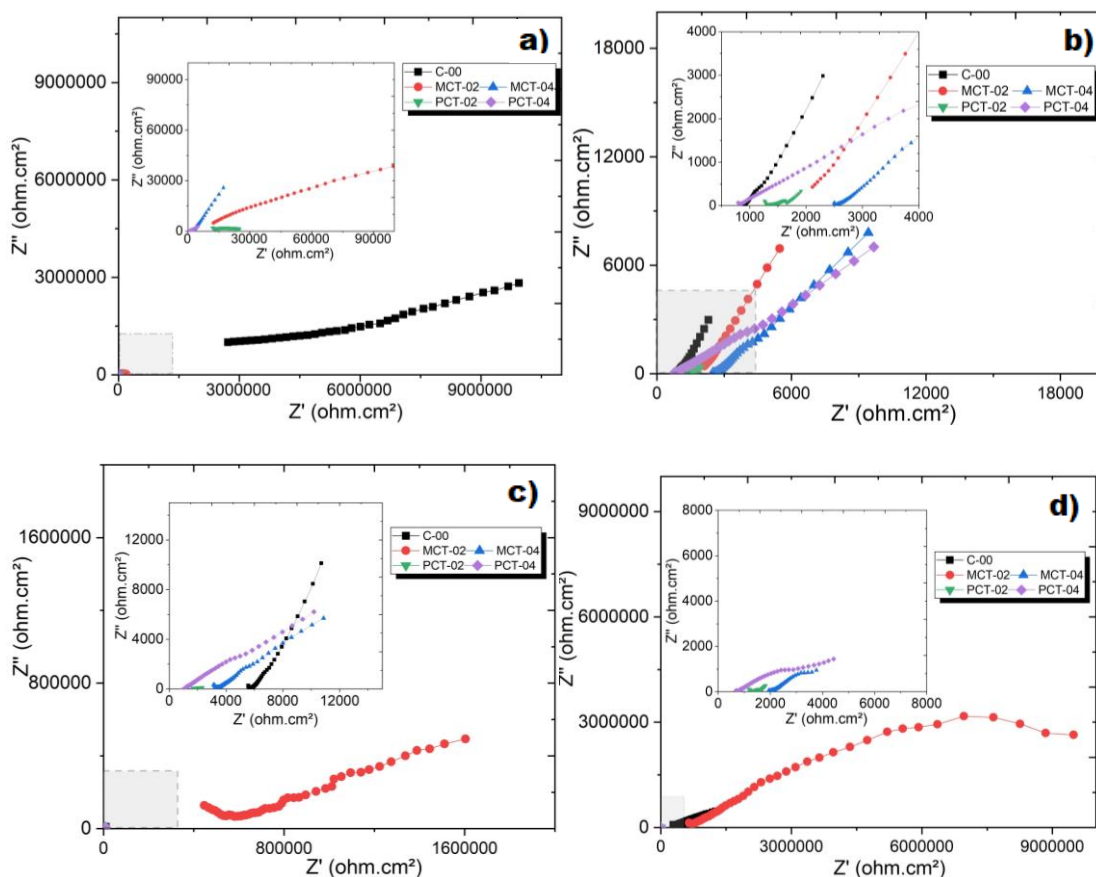


Figura 4.43. Diagramas de Nyquist, fibras cortas **a)** 1 día **b)** 28 días, **c)** 168 días y **d)** 365 días.

Después de 365 días (Figura 4.43d) de monitoreo se aprecia que la muestra MTC-02 mantiene una respuesta positiva en la corrosión del acero con valores de impedancia constante. Estos resultados sugieren una alta resistencia a la polarización, que está relacionada con el diámetro del arco, y una menor densidad de corriente de corrosión (Silva et al., 2016).

Los resultados de los diagramas de Bode-fase para las fibras tratadas con UEO se muestran en la Figura 4.44. En el día 1 las muestras C-00 y MTC-02 presentan valores altos de impedancia de $1\text{E}+07 \Omega\cdot\text{cm}^2$ y $1\text{E}+05 \Omega\cdot\text{cm}^2$ estos valores sugieren la pasividad del sistema, es decir, una mayor restricción al flujo de corriente (Silva et al., 2016).

Después de los 28 días de periodo (Figura 4.44b), la respuesta positiva de la muestra MTC-02 se mantiene en los valores de impedancia hasta 6 órdenes de magnitud. Estos valores son muy superiores a las demás muestras, y corrobora a los resultados obtenidos en los diagramas de Nyquist.

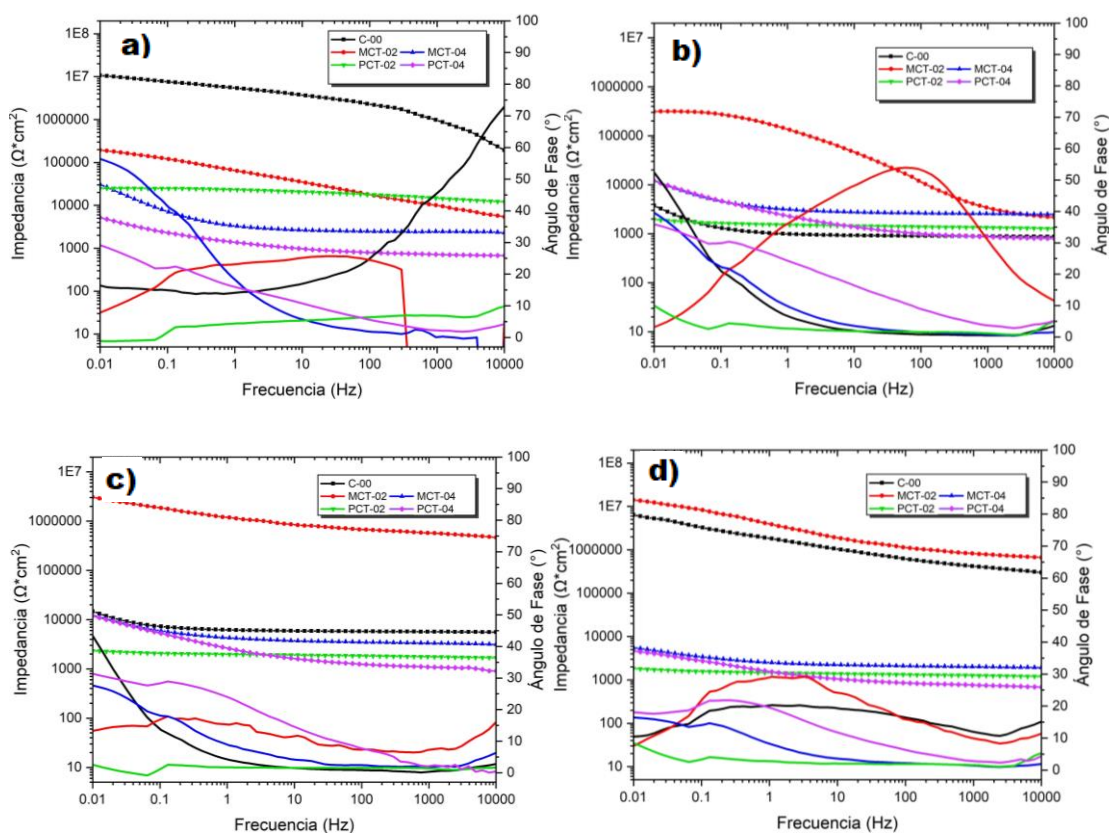


Figura 4.44. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas tratadas **a)** 1 día **b)** 28 días, **c)** 168 días y **d)** 365 días.

Conforme el tiempo de exposición avanza, es notable que la muestra MCT-02 tiene una mayor respuesta electroquímica en el día 168, manteniendo elevados valores que oscilan entre $1\text{E}+06 \Omega\cdot\text{cm}^2$ y $1\text{E}+07 \Omega\cdot\text{cm}^2$, indicando

una protección por parte del UEO y el contenido de las fibras de mango sobre las barras de acero de refuerzo.

En la Figura 4.44 d) durante los 365 días de monitoreo se observa una respuesta positiva en el aumento de los valores de módulos de impedancia para la muestra MCT-02 de $1\text{E}+07 \Omega\cdot\text{cm}^2$, estos resultados significan un aumento de la durabilidad del concreto por el aumento de los valores de módulos de impedancia y su resistividad del material.

- **Muestras con Inhibidor**

Los resultados de las muestras de concreto con adición del inhibidor verde de extracto de cascara de mango y en combinación con fibras de mango se muestran en la Figura 4.45.

Es notable que, en el inicio del experimento a las 24 horas (Figura 4.45a) la muestra C-00 tiene arcos capacitivos de mayor diámetro, en consecuencia, adquiere altos valores de impedancia, este comportamiento se asocia a diferentes sucesos, por ejemplo, la pasta es menos porosa, por lo tanto, la muestra es menos permeable y además el desarrollo de la hidratación del cemento y pasivación. Por el contrario, cuando avanza el tiempo de exposición a los 28 días como se observa en la Figura 4.45 b), la muestra control disminuye su resistencia a la solución (R_s), evidenciando la interacción que tiene el acero con los agentes agresivos. Así mismo, se observa un aumento en la R_s y la resistencia a la transferencia de carga para la muestra con inhibidor y combinado con fibras naturales, debido al mayor radio en los aros capacitivos a bajas frecuencias, indicando un retraso en el inicio de la corrosión del acero de refuerzo

La muestra CHM-02 mantiene un mejor comportamiento en las propiedades electroquímicas del concreto durante el día 168 (Figura 4.45c), este suceso se asocia a la doble protección sobre el acero. Primeramente, por la formación de una película orgánica por parte del inhibidor y segundo por la

barrera producto de las fibras naturales que impiden el paso de los iones cloruros lleguen a la superficie del metal. Se ha demostrado mediante el aumento de los valores de resistencia a la solución que el inhibidor verde de cáscara de mango impidió que los agentes corrosivos llegaran al acero embebido en el concreto (Asaad et al., 2021) debido a los compuestos presentes en el extracto etanólico de Mango como fenoles y ácidos carboxílicos (Endah et al., 2023; Thivagarar et al., 2023). En la Figura 4.45 d) la resistencia a la transferencia de carga disminuyó para las muestras CH-50 y CHM-02, generando el aumento en la tasa de corrosión de la barra de acero, por esta razón, podría ser la formación de más productos de corrosión (óxidos o hidróxidos) sobre la superficie del metal (Martínez-Molina et al., 2016).

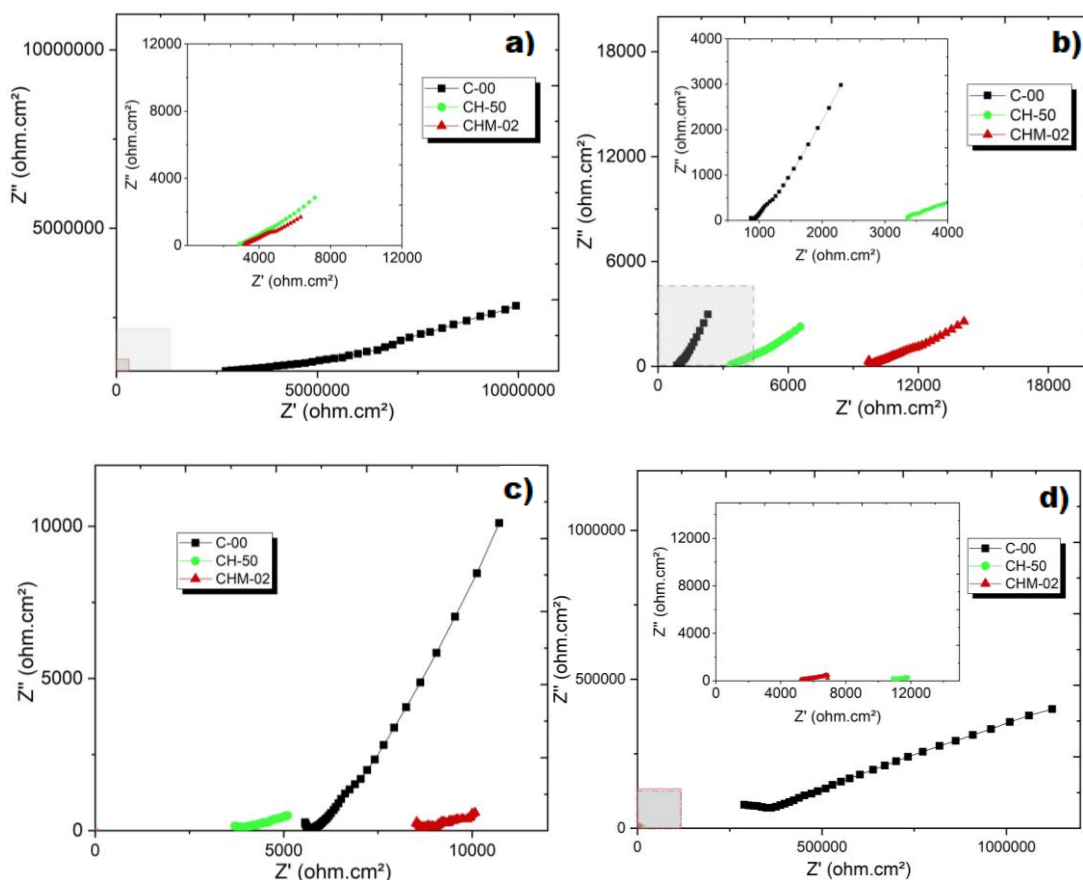


Figura 4.45. Diagramas de Nyquist, fibras cortas **a)** 1 día **b)** 28 días **c)** 168 días y **d)** 365 días.

En la Figura 4.46, se observan los diagramas de Bode-Fase en función de la frecuencia aplicada, para las muestras de concreto en combinación con inhibidor y fibras naturales. Al comienzo, la muestra C-00 (Figura 4.46a) adquiere mayor módulo de impedancia con valor de $1\text{E}+07 \Omega \cdot \text{cm}^2$, en comparación con el resto de las muestras. Después de 28 días, (Figura 4.46 b) para la muestra CHM-02 se puede observar una mayor resistencia a la solución así mismo una mayor resistencia a la polarización en comparación con la muestra control y la muestra CH-50, indicando que el inhibidor en conjunto con las fibras naturales de mango retarda el proceso de corrosión en el metal.

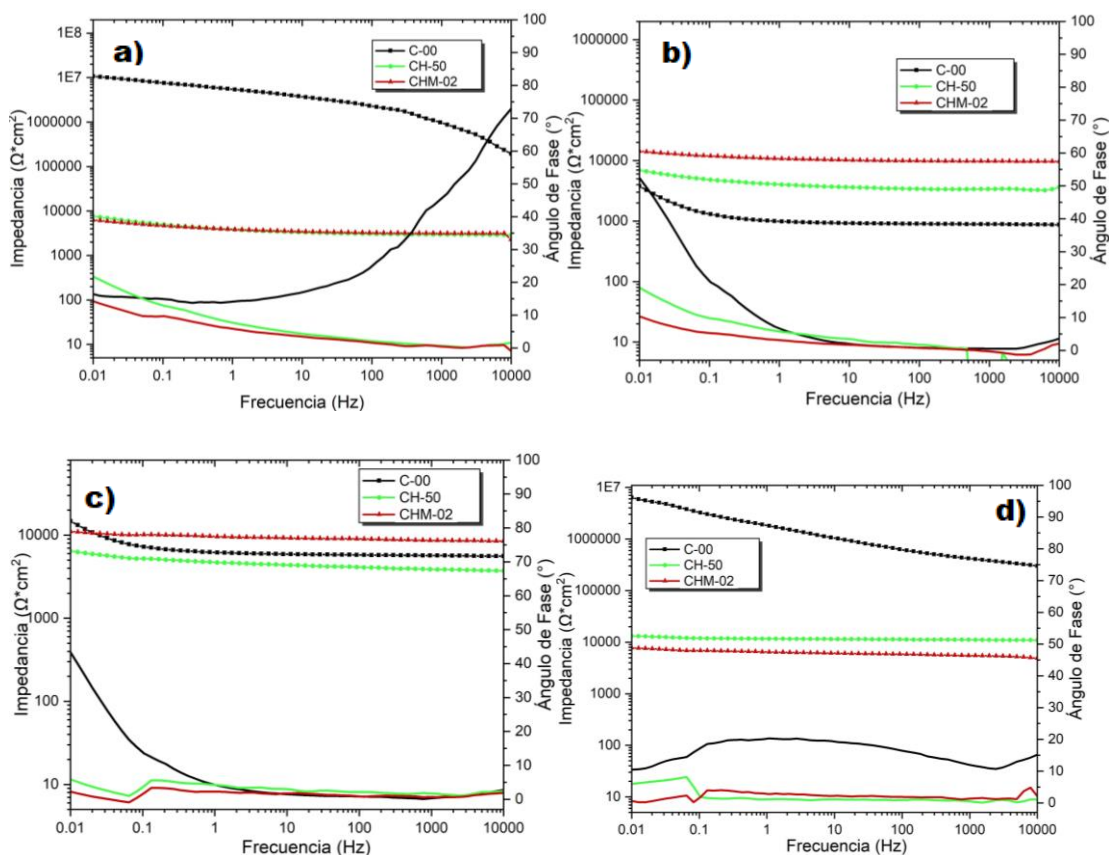


Figura 4.46. Diagramas de Bode-fase y ángulo, fibras cortas tratadas **a)** 1 día **b)** 28, **c)** 168 días y **d)** 365 días.

Durante el tiempo de 168 días (Figura 4.46 c), la mejor respuesta obtenida se encuentra para la muestra CHM-02, se pueden observar módulos de impedancia de forma constante para las regiones altas y bajas frecuencias, valores de $1\text{E}+4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, es decir la evolución del proceso es lento. Por otra parte, al finalizar el tiempo de exposición en el día 365 (Figura 4.46d), se pueden notar altos valores de módulos de impedancia para la muestra control, indicando que el sistema acero/concreto se encuentra en un estado pasivo debido a que el flujo de señal de electrones es mucho más lento en estados pasivos (Rodríguez et al., 1994). La muestra con inhibidor verde y en combinación con fibras de mango mantuvieron sus valores de impedancia constantes hasta finalizar el tiempo de exposición, valores de $1\text{E}+4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, este suceso explica una tasa de corrosión elevada.

4.7.7 Circuitos equivalentes en el sistema acero/concreto

Para obtener información de las mediciones EIS se requiere un modelo físico del sistema que permita el equivalente de elementos del circuito que se correlacionan con sus propiedades y con la descripción de los fenómenos, basado en las características del material y posibilidades sugerido en la literatura [41]. El circuito equivalente y las curvas de ajuste que mejor se adapta para los experimentos de fibras tratadas e inhibidor, se muestra en la Figura 4.47.

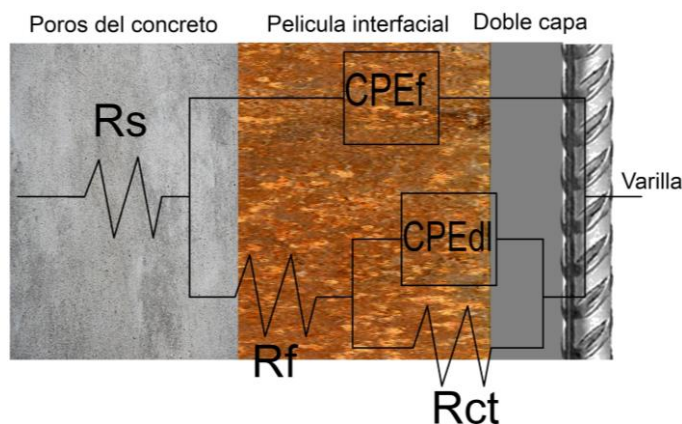


Figura 4.47. Circuito equivalente de Randles modificado con 2 constantes de tiempo.

Donde R_s es la resistencia de la solución; R_f y CPE_f son la resistencia y la capacitancia de la película pasiva sobre la superficie de la muestra; R_{ct} y CPE_{dl} representan la resistencia de transferencia de carga y la capacitancia de doble capa de la interfaz electrodo/electrolito, respectivamente (Ye et al., 2013).

A partir de los datos de EIS, se ajustaron los resultados a través del software Zview, como se ve en la Figura 4.48.

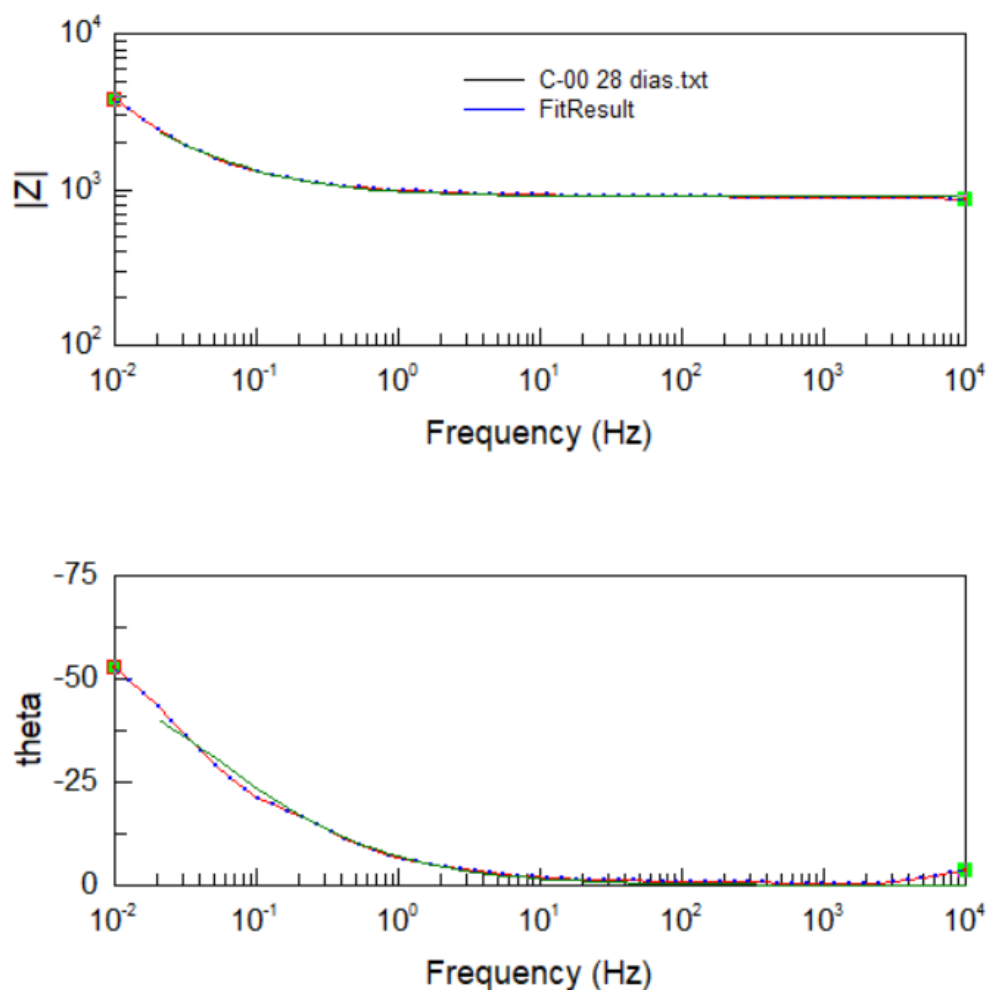


Figura 4.48. Ajuste de datos electroquímicos en los diagramas de Bode-Fase.

En la Tabla 4.19 y 4.20 se observan los parámetros electroquímicos (R_s , n , CPE, R_{ct}) de las muestras de concreto con fibras tratadas con aceite e inhibidor con la finalidad de analizar la interfaz de la doble capa en el sistema acero/concreto.

La muestra MTC-02 presenta claramente altos valores de R_s y R_{ct} mayores a 6 órdenes de magnitud, en comparación con el concreto control. Este fenómeno indica el aumento del espesor de la capa protectora, es decir, la película de aceite que recubre la superficie del acero (El-Katori y Al Angari, 2018).

Tabla 4.19. Parámetros electroquímicos de las muestras con fibras tratadas obtenidos de los circuitos equivalentes.

Muestras	Días	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEf		R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEdl	
				$Y_0(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n		$Y_0(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n
C-00	28	898.4	956.4	2.56E-03	0.56	3700	2.39E-03	0.72
	245	6702	7194	7.58E-04	0.50	13500	7.72E-04	0.62
MCT-02	28	1992	1150	1.31E-06	0.71	364580	1.85E-06	0.63
	245	4185300	6256600	1.07E-07	0.30	17480000	1.08E-07	0.54
MCT-04	28	2463	2622	9.49E-04	0.28	35007	5.12E-04	0.55
	245	2730	3331	5.93E-04	0.40	12238	7.47E-04	0.60
PCT-02	28	1180	1371	2.33E-03	0.21	1900	3.72E-03	0.32
	245	1669	1798	6.57E-04	0.35	2426	3.08E-03	0.25
PCT-04	28	781	788	2.48E-04	0.44	11900	2.95E-04	0.40
	245	992	961	3.48E-04	0.42	17679	3.03E-04	0.45

Para las muestras con inhibidor y en combinación con las fibras se puede apreciar durante los 28 días de monitoreo que las muestras con CH-50 y CHM-02 presentaron valores superiores tanto R_s como R_{ct} en comparación a la muestra control debido al efecto del inhibidor y las fibras.

Después de 245 días se observa que ambas muestras disminuyen considerablemente los valores de R_{ct} debido a un cambio en la superficie metálica y la formación de productos de corrosión no protectores (Blanco et al., 2020).

Tabla 4.20. Parámetros electroquímicos de las muestras con inhibidor y fibras obtenidos de los circuitos equivalentes.

Muestras	Días	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Rf ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEf		Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPEdl	
				$Y_0(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n		$Y_0(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n
C-00	28	898.4	956.4	2.56E-03	0.56	3700	2.39E-03	0.72
	245	6702	7194	7.58E-04	0.50	13500	7.72E-04	0.62
CH-50	28	3222	3716	6.45E-04	0.31	7080	8.92E-04	0.42
	245	7642	6.710	4.98E-04	0.62	9800	6.53E-04	0.64
CHM-02	28	9646	10207	4.12E-04	0.33	23704	5.86E-04	0.37
	245	5544	6447	5.39E-03	0.38	8340	1.01E-03	0.32

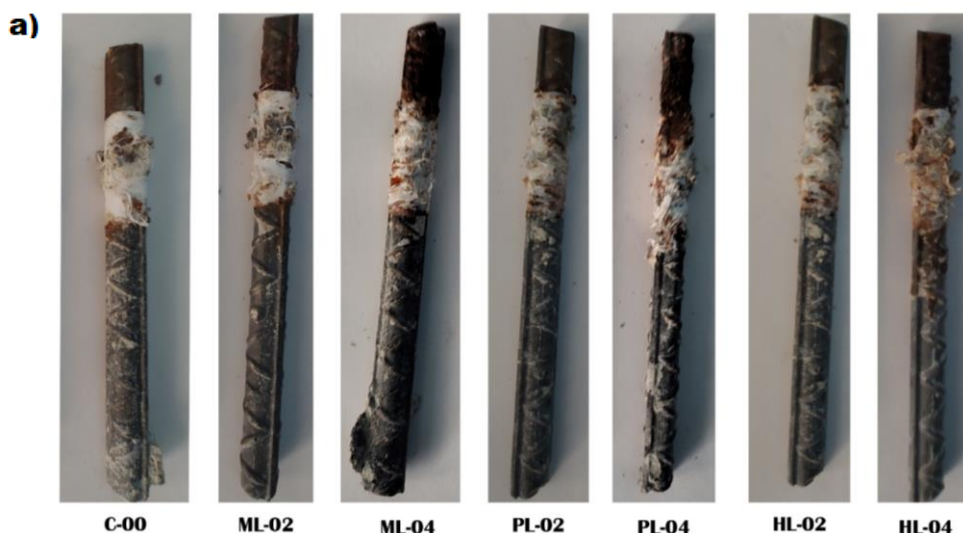
4.8 Resultado del análisis visual de las probetas de acero de refuerzo.

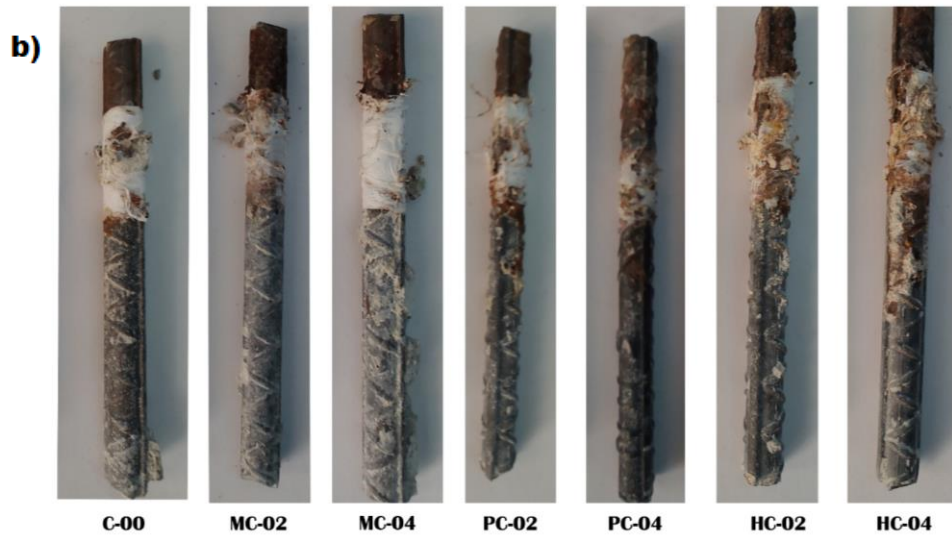
En la Figura 4.49 se muestra la sustracción de las barras de acero incrustadas en el concreto, después de estar inmerso en una solución salina durante 365 días. En la Figura 4.49 a) se observan las muestras con FL, de manera general, se pueden observar zonas de color marrón anaranjado para todas las muestras, estos puntos marrones indican producto de corrosión debido a la oxidación por O_2 disuelto. Los productos de corrosión están formados por estratos; el externo, compuesto principalmente de oxihidróxidos de Fe(III) (FeOOH), y el interno está compuesto principalmente de productos de corrosión a base de Fe(II), mezclados con magnetita Fe_3O_4 (Refait et al., 2020). En la muestra PL-04 y HL-04 se visualiza mayor cantidad de productos de corrosión en la parte superior de la barra, además se observa con daños superficiales a lo largo de las corrugaciones de la varilla y la reducción del volumen.

En la Figura 4.49 b) se aprecia la muestra con adición de fibras cortas, podemos notar claramente que las muestras CM-02 y CM-04 mantienen su capa pasiva protectora de cemento, evitando algunos daños en su superficie, además, se puede ver la formación de pocos productos de corrosión si lo comparamos con las muestras PC-02 y PC-04. Es importante señalar que la muestra CH-04 también mantiene esta capa pasiva. La permeabilidad del

concreto debido a la porosidad permite la movilidad de especies solubles por los poros del concreto y su posterior precipitación en áreas ricas en oxígeno, lo que provoca que los productos de corrosión se distribuyan dentro de la pasta de cemento porosa (Wong et al., 2010).

En la Figura 4.49 c) se examina las muestras con fibras tratadas, de manera general contemplamos que en la muestra MCT-02 no se observa una capa de cemento a lo largo de la barra de acero, es decir, se puede notar un acero liso, pulido debido a que posiblemente las gotas de aceite recubrieron la superficie evitando el contacto con agentes agresivos, este comportamiento no se observa en las otras muestras. En las muestras PTC-02 y PTC-04 se puede apreciar muchos puntos alrededor de la barra de acero, producto de la corrosión localizada. Finalmente, en la Figura 4.49 d) se pueden apreciar visualmente las muestras con fibra e inhibidor. Para la probeta CH-50 se observa una capa de óxido en la parte superior, además del deterioro en la barra de refuerzo en comparación a la muestra CHM-02, la fibra natural, ayudó a reducir ligeramente la formación de la capa de óxido presente en el acero.





d)



Figura 4.49. Varilla de refuerzo en el concreto después de 365 días de inmersión en medio salino. **a)** Fibras largas **b)** Fibras cortas **c)** Fibras tratadas **d)** Muestra con inhibidor y fibra.

En la Tabla 4.21 podemos observar un resumen general comparativo de las propiedades mecánicas y electroquímicas de las muestras estudiadas en esta investigación después de 365 días de experimento. Todas las muestras cumplieron con la resistencia mecánica de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2023). En el caso de las fibras tratadas su resistencia a la compresión y flexión del concreto estuvieron cerca del límite de la resistencia especificada por la norma, sin embargo, las fibras cortas su resistencia aumentó considerablemente. Los resultados en las técnicas electroquímicas de las barras de acero podemos notar aumento y disminución de la resistencia a la tasa de corrosión. Por lo cual, se resume que las muestras HC-04 y MTC-02 presentaron un equilibrio en la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión.

Tabla 4.21 Comparación de las propiedades mecánicas y electroquímicas del concreto reforzado.

Muestras		Propiedades					
		Mecánicas		Electroquímicas			
		Compresión	Flexión	Potencial de corrosión	Rn	Rp	EIS
Fibras largas	ML-02	✓	✓	✗	✓	✓	✗
	ML-04	✓	✓	✗	✓	✓	✗
	PL-02	✓	✓	✗	✗	✓	✗
	PL-04	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	HL-02	✓	✓	✗	✗	✗	✓
	HL-04	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Fibras cortas	MC-02	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	MC-04	✓	✓	✗	✓	✓	✗
	PC-02	✓	✓	✗	✗	✗	✗
	PC-04	✓	✓	✗	✗	✗	✗
	HC-02	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	HC-04	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Fibras tratadas	MCT-02	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	MCT-04	✓	✓	✗	✗	✗	✗
	PCT-02	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	PCT-04	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Inhibidor	CH-50	✓	-	✗	✗	✗	✓
	CHM-02	✓	-	✗	✗	✗	✗

Nota: aumento (✓) y disminución (✗)

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Fibras largas

- La trabajabilidad del concreto disminuyó conforme fue aumentando el contenido de fibras naturales y sintéticas, así mismo la porosidad del concreto alcanzó valores bajos con porcentajes de fibras de 0.2%, lo que indica que las fibras tienen una buena distribución en la pasta de cemento llenando los huecos dejados por el agregado grueso.
- Las fibras de mango no alteraron su resistencia a la compresión y tensión del concreto en cantidades bajas de 0.2% y 0.4%, sin embargo, las fibras de palma y HDPE disminuyó considerablemente sus propiedades mecánicas del concreto, debido a una mala adherencia en la zona de transición de la interfaz fibra/pasta.
- Los potenciales de corrosión de todas las muestras se encuentran con valores de entre -350 mV y -450 mV, situándose en una zona de 90% probabilidad de corrosión.
- Todas las muestras tienen altas y bajas fluctuaciones de R_p y R_n con valores de entre $1E+05 \Omega.cm^2$ y $1E+08 \Omega.cm^2$, puede indicar una despasivación y pasivación en el metal, lo que nos indica que las fibras naturales se comportan como una barrera física para el retardo y difusión de los iones cloruros.
- El nivel de vida útil en el sistema acero/concreto con refuerzo de fibras naturales y sintéticas presentó nivel de corrosión entre moderado y despreciable con valores de densidad de corriente (i_{corr}) inferiores a $0.5 \mu A/cm^2$.
- El tipo de corrosión para el acero estuvo en el rango de corrosión localizada, desde los primeros días de medición hasta el final de exposición al medio salino; con valores de índice de localización de entre 0.1 y 1.

Fibras cortas

- La muestra de HDPE en altos porcentajes de 0.4% disminuyó considerablemente la trabajabilidad del concreto, esto debido a que la fibra ocasiona mayor resistencia al movimiento de los agregados.
- La porosidad disminuye para todas las muestras en comparación al espécimen control, ocasionando un material menos permeable con la adición de fibra con geometría corta.
- La muestra de fibra de mango presentó un mejor comportamiento en la resistencia de impacto con valor del 2% con respecto a la muestra control, aunque todas las muestras presentaron una tenacidad frágil debido a que las probetas se rompieron fácilmente durante el ensayo.
- Las muestras MC-04 y PC-02 demostró un buen comportamiento mecánico a la compresión de 12 % superior a la muestra control, retardando y controlando las grietas producidas por los esfuerzos que este sometido, aunque la F_f se percibió una ligera disminución.
- Todas las muestras presentan potenciales de corrosión más negativos en comparación al concreto control valores de entre -300 mV y -400 mV, así mismo se observa transitorios altos y bajos de R_p y R_n , valores de entre $1E+05 \Omega.cm^2$ y $1E+08 \Omega.cm^2$, obteniendo un nivel de corrosión moderado.
- La corrosión que presenta es de tipo localizada, con valores de índice de localización de entre 0.1 y 1.
- La muestra HC-04 presentó un efecto positivo sobre los agentes agresivos, demostrando valores altos de impedancia en la técnica de EIS.

Fibras tratadas

- Todas las muestras presentaron altos valores de trabajabilidad, debido al efecto hidrófobo del aceite, ocasionando un mezclado deficiente en los componentes del concreto, por consecuencia de este resultado, la porosidad aumentó.
- La sustancia hidrófoba afecta considerablemente las propiedades mecánicas del concreto debido a que no existe una interacción con el agua de reacción de la pasta y no hay una buena adherencia de la fibra con la matriz cementante, todas las muestras se encuentran con valores inferiores al concreto control.
- Los potenciales de corrosión que presentan las muestras con fibras tratadas tienen valores de entre -350 mV y -400 mV, presentando un 90% probabilidad de corrosión.
- La muestra MCT-02 presenta una mayor resistencia de R_p , R_n y de impedancia, en comparación con las otras muestras, valores constantes de hasta 7 órdenes de magnitud, demostrando un nivel de corrosión despreciable, lo que indica que el aceite y la fibra actúa como una barrera protectora para la difusión de cloruros.
- Todas las muestras presentan corrosión de tipo localizada, es decir hay una degradación del metal en ciertos puntos.

Muestras con inhibidor y fibra

- La pasta de concreto no se vio afectada en el revenimiento cuando se agregó el inhibidor verde, sin embargo, se presentó una disminución cuando se agregaron fibras naturales al concreto.
- El inhibidor afectó las propiedades de resistencia a la compresión del concreto, debido que ocasionó una alta porosidad de la matriz cementosa.

- Los potenciales de corrosión para las muestras con inhibidor y combinado con fibras naturales de mango mostraron el mejor rendimiento retrasando la difusión de cloruros durante 160 días manteniendo un estado de incertidumbre.
- La muestra CH-50 y CHM-02 presentaron altos valores de R_n y R_p durante el inicio de las mediciones, sin embargo, estos valores disminuyeron al final del experimento, ocasionando un aumento en la velocidad de corrosión del material.
- El inhibidor y en combinación con la fibra natural de mango obtuvieron resultados favorables durante los primeros días del experimento, retardando el inicio de la corrosión, de acuerdo con los datos de Nyquist e impedancia.

Recomendaciones

Para investigaciones a futuro, el autor recomienda lo siguiente:

- ✓ Es importante analizar otras diferentes geometrías y porcentajes de fibras naturales y sintéticas agregados a la pasta de concreto.
- ✓ Análisis sobre la durabilidad de las fibras naturales a través de un tratamiento químico para protegerlo de la alta alcalinidad del concreto.
- ✓ Estudio del uso de otros inhibidores verdes agregados a la pasta de concreto con su respectiva dosificación de materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulsada, S. A., & Török, T. I. (2020). Studying chloride ions and corrosion properties of reinforced concrete with a green inhibitor and plasticizers. *Structural Concrete*, 21(5), 1894-1904.
- Adilah, A. N., Jamilah, B., Noranizan, M. A., & Hanani, Z. N. (2018). Utilization of mango peel extracts on the biodegradable films for active packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 16: 1-7.
- Aguilera-Taylor I., Corzo A., Muñoz-Castro G. y López-Hoffman L. (2007). *Servicios ambientales de una palma endémica: su importancia para la población rural. Gaceta ecológica. Instituto Nacional de Ecología, México*, 84-85:75-83.
- Al-Hadithi, A. I., & Hilal, N. N. (2016). The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers. *Journal of Building Engineering*, 8, 20-28.
- Al-Attar, T. S. (2013). A quantitative evaluation of bond strength between coarse aggregate and cement mortar in concrete. *European scientific journal*, 9(6).
- Alexandre Reginato, L., Somensi Lorenzi, L., & Carlos Pinto da Silva Filho, L. (2023). Corrosion in reinforced concrete: Diagnostics through Potential Corrosion Technique. doi:10.21203/rs.3.rs-3156721/v3
- Almashakbeh, Y., Saleh, E., & Al-Akhras, N. M. (2022). Evaluation of Half-Cell Potential Measurements for Reinforced Concrete Corrosion. *Coatings*, 12(7), 975. doi:10.3390/coatings12070975.
- Al-Mazeedi, H. A. A., & Cottis, R. A. (2004). A practical evaluation of electrochemical noise parameters as indicators of corrosion type. *Electrochimica Acta*, 49(17-18), 2787-2793. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.040>
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4631-4643. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>

- Almusallam, A. A. (2001). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and building materials*, 15(8), 361-368. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00009-5)
- Alsadey, S. (2018). Effects of used engine oil as chemical admixture in concrete. *Int J Energy Sustain Dev*, 3(2), 38-43.
- Andrade, C., & Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and building materials*, 10(5), 315-328. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37(9), 623-643. doi:10.1007/bf02483292.
- Andrade, C. (2019). Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modelling. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 52(1), 2. doi:10.1617/s11527-018-1301-1.
- Arellano-Pérez, J. H., Escobar-Jiménez, R. F., Ramos-Negrón, O. J., Lucio-García, M. A., Gómez-Aguilar, J. F., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2022). The Use of a Time-Frequency Transform for the Analysis of Electrochemical Noise for Corrosion Estimation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4333607>
- Arrakhiz, F. Z., El Achaby, M., Kakou, A. C., Vaudreuil, S., Benmoussa, K., Bouhfid, R., ... & Qaiss, A. (2012). Mechanical properties of high density polyethylene reinforced with chemically modified coir fibers: Impact of chemical treatments. *Materials & Design*, 37, 379-383.
- Arsène, M. A., Savastano Jr, H., Allameh, S. M., Ghavami, K., & Soboyejo, W. O. (2003, November). Cementitious composites reinforced with vegetable fibers. In *Anais da 1st inter american conference on nonconventional materials and technologies in the ecoconstruction and infrastructure*. João Pessoa-PB.
- Asaad, M. A., Huseien, G. F., Baghban, M. H., Raja, P. B., Fediuk, R., Faridmehr, I., & Alrshoudi, F. (2021). Gum arabic nanoparticles as green

corrosion inhibitor for reinforced concrete exposed to carbon dioxide environment. *Materials*, 14(24), 7867.

- Asipita, S. A., Ismail, M., Abd Majid, M. Z., Majid, Z. A., Abdullah, C., & Mirza, J. (2014). Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete. *Journal of Cleaner Production*, 67, 139-146.
- Assaad, J. J. (2013). Disposing used engine oils in concrete—Optimum dosage and compatibility with water reducers. *Construction and Building Materials*, 44, 734-742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.078>
- Attom, M., Hawileh, R., & Naser, M. (2013). Investigation on concrete compressive strength mixed with sand contaminated by crude oil products. *Construction and Building Materials*, 47, 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.042>
- Awad, A. H., El Gamasy, R., Abd El Wahab, A., & Abdellatif, M. H. (2019). Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE. *Eng. Sci*, 4, 34-42.
- Bajaj, D., & Khurpade, P. D. (2024). An Eco-friendly Mangifera indica Leaves Extract Corrosion Inhibitor for Stainless Steel in Acidic Medium. *Nature Environment & Pollution Technology*, 23(1).
- Bangerth, F., & Carle, R. (2002). Physical, chemical and sensory properties of 9 Thai mango cultivars and evaluation of their technological and nutritional potential. In *International Symposium'Sustaining, Food Security and Managing Natural Resources in Southeast Asia: Challenges for the 21st Century*.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2012). Corrosion of rebar and role of fiber reinforced concrete. *J. Test. Eval*, 40(1), 1-10.
- Benali, O., Benmehdi, H., Hasnaoui, O., Selles, C., & Salghi, R. (2013). Green corrosion inhibitor: inhibitive action of tannin extract of Chamaerops humilis plant for the corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄. *J. Mater. Environ. Sci*, 4(1), 127-138.
- Bensabra, H., & Azzouz, N. (2013). Study of rust effect on the corrosion behavior of reinforcement steel using impedance spectroscopy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(13), 5703-5710

- Benson, C. H., and Khire, M. V. (1994) "Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene." *J. Geotech. Eng.*, 120~5!, 838– 855. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:5\(838\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:5(838))
- Berkeley, K. G., Pathmanaban, S. (1990), "Cathodic protección of reinforcement steel in concrete", Ed. Butterworths, United Kingdom, ISBN 0-408-03270-1.
- Bicer, K., Yalciner, H., Balkıs, A. P., & Kumbasaroglu, A. (2018). Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 185, 574-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.021>
- Björnström, J., & Chandra, S. (2003). Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. *Materials and Structures*, 36, 685-692. <https://doi.org/10.1007/BF02479503>
- Blanco, Y. D., Campos, E. C. M., Valdés, C. I. R., & Chavarín, J. U. (2020). Effect of recycled PET (polyethylene terephthalate) on the electrochemical properties of rebar in concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 18(5), 487-500. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00478-3>
- Bouasker, M., Belayachi, N., Hoxha, D., & Al-Mukhtar, M. (2014). Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications. *Materials*, 7(4), 3034-3048. <https://doi.org/10.3390/ma7043034>
- Brown, D. W., Connolly, R. J., Darr, D. R., & Laskowski, B. (2014). Linear Polarization Resistance Sensor Using the Structure as a Working Electrode. In *PHM Society European Conference* (Vol. 2, No. 1).
- Burbano-Garcia, C., Hurtado, A., Silva, Y. F., Delvasto, S., & Araya-Letelier, G. (2021). Utilization of waste engine oil for expanded clay aggregate production and assessment of its influence on lightweight concrete properties. *Construction and Building Materials*, 273, 121677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121677>
- Cellat, K., Tezcan, F., Beyhan, B., Kardaş, G., & Paksoy, H. (2017). A comparative study on corrosion behavior of rebar in concrete with fatty acid

additive as phase change material. *Construction and Building Materials*, 143, 490–500. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.165

- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 8(2), 194-206.
- Cheng, J., Lin, X., Wu, X., Liu, Q., Wan, S., & Zhang, Y. (2021). Preparation of a multifunctional silver nanoparticles polylactic acid food packaging film using mango peel extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 678-688.
- Chess, P., Gronvold and Karnov, (1998), "Cathodic protection of steel in concrete", E&FN Spon, United Kingdom, ISBN 0-419-23010-6.
- Chin, S. C., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2012). Effects of used engine oil in reinforced concrete beams: the structural behaviour. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(3), 254-260.
- Colom, X., Carrasco, F., Pages, P., & Canavate, J. (2003). Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. *Composites Science and technology*, 63(2), 161-169. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00248-8).
- Cottis, R. A. (2001). Interpretation of electrochemical noise data. *Corrosion*, 57(03).
- Da, B., Yu, H., Ma, H., & Wu, Z. (2018). Reinforcement corrosion research based on the linear polarization resistance method for coral aggregate seawater concrete in a marine environment. *Anti-corrosion methods and materials*.
- Da Rocha, J. C., Gomes, J. A. D. C. P., & D'Elia, E. (2010). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts. *Corrosion Science*, 52(7), 2341-2348.
- Daniyal, M., & Akhtar, S. (2020). Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1), 1.
- Davis, J. R. (2003), Corrosion: Understanding the Basics , ASM International , Materials Park, OH.

- De Azevedo, A. R., Marvila, M. T., Tayeh, B. A., Cecchin, D., Pereira, A. C., & Monteiro, S. N. (2021). Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Engineering*, 33, 101675.
- de Souza, F. S., & Spinelli, A. (2009). Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel. *Corrosion science*, 51(3), 642-649.
- Defoirdt, N., Biswas, S., De Vriese, L., Van Acker, J., Ahsan, Q., Gorbatikh, L., ... & Verpoest, I. (2010). Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 41(5), 588-595.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.005>
- Del Valle Moreno, A., Perez Lopez, t., & Martinez Madrid, m. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Publicación técnica*, (182). ISSN: 0188-7297
- Demirci, M. T., Tarakçioğlu, N., Avci, A., & Erkendirici, Ö. F. (2014). Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method. *Composites Part B: Engineering*, 66, 7-1. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.015>
- Desalegn, B., Megharaj, M., Chen, Z., & Naidu, R. (2019). Green synthesis of zero valent iron nanoparticle using mango peel extract and surface characterization using XPS and GC-MS. *Heliyon*, 5, e01750.
- Dharma, S., Silitonga, A. S., Shamsuddin, A. H., Sebayang, A. H., Milano, J., Sebayang, R., Sarjianto, Ibrahim, H., Bahri, N., Ginting, B., & Damanik, N. (2023). Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 45(2), 3887–3899. doi:10.1080/15567036.2019.1668883.
- Dhouibi, L., Triki, E., & Raharinaivo, A. (2002). The application of electrochemical impedance spectroscopy to determine the long-term effectiveness of corrosion inhibitors for steel in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), 35-43. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00062-2)

- Dong, S. G., Lin, C. J., Hu, R. G., Li, L. Q., & Du, R. G. (2011). Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor. *Electrochimica Acta*, 56(4), 1881-1888. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.08.089>
- Dorothy, R., Sasilatha, T., & Rajendran, S. (2021). Corrosion resistance of mild steel (Hull plate) in sea water in the presence of a coating of an oil extract of plant materials. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(2), 676-699.
- Ede, A. N., & Agbede, J. O. (2015). Use of coconut husk fiber for improved compressive and flexural strength of concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(2), 968-974.
- El Nemr, A. (2012). From natural to synthetic fibers. *Textiles: Types, Uses and Production Methods*; El Nemr, A., Ed, 1-152.
- Elsaid, A., Dawood, M., Seracino, R., & Bobko, C. (2011). Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1991-2001
- Endah, E. S., Saraswaty, V., Ratnaningrum, D., Kosasih, W., Ardiansyah, A., Risdian, C., ... & Setiyanto, H. (2023, June). Phyto-assisted synthesis of zinc oxide nanoparticles using mango (*Mangifera indica*) fruit peel extract and their antibacterial activity. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1201, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- Escalante, M. A. M. (2018). Apropiación cultural. El caso de las artesanías tradicionales1. *Museo nacional de antropología*, 158. ISSN: 2340-3519
- Estupiñán-López, F. H., Almeraya-Calderón, F., Bautista Margulis, G. R., Baltazar Zamora, M. A., Martínez-Villafañe, A., Uruchurtu, C. J., & Gaona-Tiburcio, C. (2011). Transient analysis of electrochemical noise for 316 and duplex 2205 stainless steels under pitting corrosion. *Int. J. Electrochem. Sci*, 6, 1785-1796.
- Faritov, A. T., Rozhdestvenskii, Y. G., Yamshchikova, S. A., Minnikhanova, E. R., & Tyusenkov, A. S. (2016). Improvement of the linear polarization resistance method for testing steel corrosion inhibitors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016(11), 1035-1041. <https://doi.org/10.1134/S0036029516110070>

- Fattah-alhosseini, A., Taheri Shoja, S., Heydari Zebardast, B., & Mohamadian Samim, P. (2011). An Electrochemical Impedance Spectroscopic Study of the Passive State on AISI 304 Stainless Steel. *International Journal of Electrochemistry*, 2011, 1–8. doi:10.4061/2011/152143.
- Fernández, J. A. G. (1984). “Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión”. Editorial CSIC-CSIC Press. ISBN 84-00-05670-1.
- Ferreira, D. P., Cruz, J., & Figueiro, R. (2019). Surface modification of natural fibers in polymer composites. In *Green composites for automotive applications* (pp. 3-41). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00001-X>
- Flores-Nicolas, A., Flores-Nicolas, M. & Uruchurtu-Chavarin, J. (2021). Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties. *Revista ALCONPAT*, 11(1):18-33. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.501>.
- Flores Nicolás, A., Menchaca Campos, E. C., Flores Nicolás, M., Martínez González, J. J., González Noriega, O. A., & Uruchurtu Chavarín, J. (2024). Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers*, 12(3), 24. <https://doi.org/10.3390/fib12030024>
- Flórez Arroyave, J. (2016). Obtención de aceite de aguacate con alto valor agregado para la industria de alimentos usando fluidos supercríticos.
- Foulk, J. A., Chao, W. Y., Akin, D. E., Dodd, R. B., & Layton, P. A. (2004). Enzyme-retted flax fiber and recycled polyethylene composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 12, 165-171. <https://doi.org/10.1023/B:JOOE.0000038548.73494.59>
- García, I. (2003). *Caracterización físicoquímica y funcional de los residuos fibrosos de mango criollo (Mangifera indica L.) y su incorporación en galletas* (Doctoral dissertation, Tesis Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oax, México).

- García, S. L. Q., & Salcedo, L. O. G. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Ingeniería y Desarrollo*, (20), 134-150. ISSN: 0122-3461.
- Ghasemnejad, H., Furquan, A. S. M., & Mason, P. J. (2010). Charpy impact damage behaviour of single and multi-delaminated hybrid composite beam structures. *Materials & Design*, 31(8), 3653-3660. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.045>
- González, F. (2006). "Manual de supervisión de obras de concreto2b". Editorial Limusa. ISBN 968-18-5907-3.
- Gonzalez, M. G., & Tam, C. P. T. (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua Angustifolia Kunth*. *Scientia et Technica*, 19(3), 245-250. <https://doi.org/10.22517/23447214.9117>
- Gonzalo, M. B., Enrique, V. S., Miguel, M. L., & Osman, G., (2015). Materiales de reciclo y su uso en el mejoramiento del concreto.
- Gopiraman, M., Selvakumaran, N., Kesavan, D., & Karvembu, R. (2012). Adsorption and corrosion inhibition behaviour of N-(phenylcarbamothioyl) benzamide on mild steel in acidic medium. *Progress in Organic Coatings*, 73(1), 104-111
- Guede, D., González, P., & Caeiro, J. R. (2013). Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5(1), 43-50. <https://dx.doi.org/10.4321/S1889-836X2013000100008>
- Hadi, Z. A., Mahdi, A. S., & Bahar, S. S. (2020, June). Reed Leaves Extract as Corrosion Inhibitor for Reinforcing Steel in Concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 871, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- Harper, Charles A., Edward M. Petrie, (2003). *Plastics Materials and Processes*, John Wiley & Sons. ISBN 0-471-45603-9.
- Hasan, B., & Ali, M. (2023, April). Potential of used-petrol-engine-oil as an admixture in cement composites: A detailed review. In *AIP Conference*

Proceedings (Vol. 2713, No. 1). AIP Publishing.
<https://doi.org/10.1063/5.0129983>

- Herrera Quispe, C. A., & Quispe De La Cruz, R. M. (2019). Análisis del comportamiento del concreto hidráulico reforzado con fibras naturales de agave para el diseño de pavimento rígido con el método mecanístico-empírico en la av. universitaria de la provincia de huancavelica-2018.
- Herrera Hernández, H., González Díaz, F., Fajardo San Miguel, G. D. J., Velázquez Altamirano, J. C., González Morán, C. O., & Morales Hernández, J. (2019). Electrochemical impedance spectroscopy as a practical tool for monitoring the carbonation process on reinforced concrete structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(12), 10087-10103.
- Hidalgo, M., Muñoz, M., & Quintana, K. (2012). Análisis mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 89-95. ISSN 0255-6952
- Hınıslioğlu, S., & Açar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials letters*, 58(3-4), 267-271. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)
- Hong, S., & Harichandran, R. S. (2005). Sensors to monitor CFRP/concrete bond in beams using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Composites for Construction*, 9(6), 515-523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:6\(515\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:6(515))
- Hossain, K. M. A., Hossain, M. A., & Manzur, T. (2020). Structural performance of fiber reinforced lightweight self-compacting concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Journal of Building Engineering*, 30, 101291. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101291>
- Hussien, S. S. (2016). Using of industrial waste as a green chemical admixture in concrete. *Kufa Journal of Engineering*, 7(1).
- Hussin, M. H., & Kassim, M. J. (2011). The corrosion inhibition and adsorption behavior of Uncaria gambir extract on mild steel in 1 M HCl. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 461-468.

- Idicula, M., Boudenne, A., Umadevi, L., Ibos, L., Candau, Y., & Thomas, S. (2006). Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites science and technology*, 66(15), 2719-2725. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.007>
- Isnaeni, I. N., Sumiarsa, D., & Primadona, I. (2021). Green synthesis of different TiO₂ nanoparticle phases using mango-peel extract. *Materials Letters*, 294, 129792.
- Ituen, E., Akaranta, O., & James, A. (2017). Evaluation of performance of corrosion inhibitors using adsorption isotherm models: an overview. *Chem. Sci. Int. J*, 18(1), 1-34.
- Ixtepan, D. S., & Moreno, E. I. (2006). Películas barreras: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. *Ingeniería*, 10(2), 37-45. ISSN: 1665-529X
- Jamali, S. S., & Mills, D. J. (2016). A critical review of electrochemical noise measurement as a tool for evaluation of organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 95, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.02.016>
- Jimenez Iriarte, M. A., & Torres Pertuz, F. A. (2020). Análisis sistemático de literatura—Análisis de un concreto convencional con un concreto con material alternativo (Bagazo de caña de azúcar).
- Juárez Alvarado, C. A., Rodríguez López, P., Rivera Villarreal, R., & Rechy de Von Roth, M. D. L. Á. (2003). Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto. *Ciencia UANL*, 6(4).
- Jurowski, K., & Grzeszczyk, S. (2018). Influence of selected factors on the relationship between the dynamic elastic modulus and compressive strength of concrete. *Materials*, 11(4), 477. <https://doi.org/10.3390/ma11040477>
- Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Adi, D. S., Damayanti, R., Subiyanto, B., ... & Fudholi, A. (2021). A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of materials research and technology*, 13, 2442-2458.
- Kakooei, S., Akil, H. M., Dolati, A., & Rouhi, J. (2012). The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete.

Construction and Building Materials, 35, 564–570.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.051.

- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. ISBN 0-89312-233-5
- Krishna, N. K., Prasanth, M., Gowtham, R., Karthic, S., & Mini, K. M. (2018). Enhancement of properties of concrete using natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 23816-23823.
- Lamus, F., & Andrade, S. (2015). *Concreto reforzado: fundamentos*. Ecoe Ediciones. ISBN 978-958-771-263-6
- Li, M., Pu, Y., Thomas, V. M., Yoo, C. G., Ozcan, S., Deng, Y., ... & Ragauskas, A. J. (2020). Recent advancements of plant-based natural fiber–reinforced composites and their applications. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108254.
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and building materials*, 25(11), 4294-4298. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005
- Lima, É. C., Adebayo, M. A., & Machado, F. M. (2015). Kinetic and equilibrium models of adsorption. *Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications*, 33-69.
- 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.
- López, L., Sarmiento, A., Fajardo, J., Valarezo, L., & Gallego, R. Z. (2013). Determinación del porcentaje de humedad, solubles e insolubles en agua de la fibra de Carludovica Palmata (paja toquilla). *Ingenius*, (9), 23-27. <https://doi.org/10.17163/ings.n9.2013.03>
- Lumingkewas, R. H., Husen, A., & Andrianus, R. (2017). Effect of Fibers Length and Fibers Content on the Splitting Tensile Strength of Coconut Fibers Reinforced Concrete Composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 748, pp. 311-315). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.748.311>

- Machaka, M., Basha, H., Abou Chakra, H., & Elkordi, A. (2014). Alkali treatment of fan palm natural fibers for use in fiber reinforced concrete. *European scientific journal*, 10(12).
- Malagavelli, V., & Patura, N. R. (2011). Strength characteristics of concrete using solid waste an experimental investigation. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6). ISSN 0974-5904
- Mansfeld, F., Sun, Z., Hsu, C. H., & Nagiub, A. (2001). Concerning trend removal in electrochemical noise measurements. *Corrosion Science*, 43(2), 341-352. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00064-0)
- Marroquín Albadan, H. T., & López Castro, M. F. (2019). *Análisis de la respuesta mecánica del concreto hidráulico para pavimentos modificados con fibras de bejuco* (Doctoral dissertation).
- Martín Saavedra, R. (2014). Simulación mediante circuitos equivalentes de la impedancia electroquímica de armaduras de acero inoxidable en mortero (Master's thesis).
- Martínez-Barrera G., Viguera-Santiago E., Hernández-López S., Martínez-Barrera G., Brostow W., Menchaca-Campos C. 'Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers', *Polymer Engineering and Science*, 45(10) (2005) 1426–1431. <https://doi.org/10.1002/pen.20418>
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A., Hernández-Leos, R., Alonso-Guzman, E., Mendoza-Pérez, I., & Martinez-Peña, I. (2016). The inhibitive properties of Nopal slime on the corrosion of steel in chloride-contaminated mortar. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 63(1), 65-71.
- Martinez, S., Teresa, M., Sánchez Herrera, L. M., Torres García, G., & GARCIA PAREDES, J. D. (2012). Red de valor del mango y sus desechos con base en las propiedades nutricionales y funcionales. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/901>
- Madsen, B., Hoffmeyer, P., Thomsen, A. B., & Lilholt, H. (2007). Hemp yarn reinforced composites—I. Yarn characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(10), 2194-2203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.001>

- MC, P., & KB, P. (2011). Strength and workability characteristics of waste plastic fibre reinforced concrete produced from recycled aggregates. *International Journal of Engineering Research and*, 1(4), 1791-1802. ISSN: 2248-9622
- Mehdipour, M., Ramezanzadeh, B., & Arman, S. Y. (2015). Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 318-327.
- Meisuh, B. K., Kankam, C. K., & Buabin, T. K. (2018). Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete. *Case studies in construction materials*, 8, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.002>
- Monroy, M., Arias, A. D., & Acevedo, H. F. (2009). Instrumentación del equipo de laboratorio de resistencia de materiales para ensayos dinámicos a flexión de probetas ranuradas. *Scientia et technica*, 1(41), 352-356.
- Monteiro, S. N., Aquino, R. C. M., Lopes, F. P., & d'Almeida, J. R. M. (2006). Tenacidade ao entalhe por impacto charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 11, 204-210. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000300006>
- Montemor, M. F., Simoes, A. M. P., & Ferreira, M. G. S. (2003). Chloridduced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 491-502. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00089-6)
- Moreno, L. E., Trujillo, E. E., & Osorio, L. R. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua angustifolia. *Scientia et technica*, 1(34). <https://doi.org/10.22517/23447214.5719>
- Muliastri, D., Septiyani, D. E., Afif, N., Sirenden, V. T., & Suprihartini, J. N. R. (2021). Application of Organic Inhibitors to the Corrosion of Materials AISI 1070 Steel. *International Journal Applied Technology Research*, 2(1), 12-20
- Nadeem, H., Habib, N. Z., Aun, N. C., Zoorob, S. E., Mustaffa, Z., Mesney, R., & Suubita, S. (2017, May). Used engine oil as alternate binder for buildings—a comparative study. In *Proceedings of the Institution of Civil*

Engineers-Waste and Resource Management (Vol. 170, No. 2, pp. 57-65). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jwarm.17.00005>

- Narváez-Muñoz, C., Armas-Ruiz, D., Carrión-Matamoros, L., Ruiz-Galarza, S., & Piován, M. (2016). Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo. *Científica*, 20(1), 21-31.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology* (Vol. 438). England: Longman Scientific & Technical. ISBN: 978-0-273-73219-8
- Nibudey, R. N., Nagarnaik, P. B., Parbat, D. K., & Pande, A. M. (2013). Strength and fracture properties of post consumed waste plastic fiber reinforced concrete. *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*, 3(2), 9-16. ISSN 2249-6866.
- NICOLÁS, A. F. (2021). Evaluación en la corrosión y protección del acero de refuerzo embebidas de concreto en presencia de grafito y su instituto de investigación en ciencias básicas y aplicadas aplicadas efecto en las propiedades mecánicaselectroquímicas.
- Nicolás, A. F., Campos, E. C. M., Nicolás, M. F., Noriega, O. A. G., Pérez, C. A. G., & Chavarín, J. U. (2024). Corrosion Resistance of Reinforcing Steel in Concrete Using Natural Fibers Treated with Used Engine Oil. *Civil Engineering Journal*, 10(4), 1012-1033. doi: 10.28991/CEJ-2024-010-04-02
- Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2023. Disponible en <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>
- N·CMT·2·02·005/04, libro: CMT. Características de los materiales, parte: 2. Materiales para estructuras. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/n-cmt-2-02-005-04.pdf>
- Nuruddin, M. F., & Beddu, S. (2011). Properties of concrete containing used engine oil. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 2(1).
<https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/60>

- Obot, I. B., Ebenso, E. E., & Gasem, Z. M. (2012). Eco-friendly corrosion inhibitors: adsorption and inhibitive action of ethanol extracts of *Chromolaena odorata* L. For the corrosion of mild steel in H_2SO_4 solutions. *International journal of electrochemical science*, 7(3), 1997-2008.
- Obot, I. B., Onyeachu, I. B., Zeino, A., & Umoren, S. A. (2019). Electrochemical noise (EN) technique: review of recent practical applications to corrosion electrochemistry research. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(13), 1453-1496.
- Odiongny, A. O., Enengedi, I. S., Ibok, I., & Ukpong, E. J. (2015). Inhibition of the corrosion of zinc in 0.1 M HCl by ethanol extract of honey. *Int. J. Chem. Mater. Environ., Res*, 2, 16-25.
- Ogunleye, O. O., Eletta, O. A., Arinkoola, A. O., & Agbede, O. O. (2018). Gravimetric and quantitative surface morphological studies of *Mangifera indica* peel extract as a corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 13(6), e2257.
- Onukwuli, O. D., & Omotioma, M. (2016). Optimization of the inhibition efficiency of mango extract as corrosion inhibitor of mild steel in 1.0 M H_2SO_4 using response surface methodology. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51(3), 302-314.
- Ortega, Y. (2006). Prueba de impacto: ensayo Charpy. *Revista mexicana de física E*, 52(1), 51-57.
- Ortiz Lozano, J. Á. (2005). "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado". Universitat Politècnica de Catalunya.
- Osorio Saraz, J. A., Varón Aristizabal, F., & Herrera Mejía, J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *Dyna*, 74(153), 69-79. ISSN: 2346-2183
- Palanisamy, S. P., Maheswaran, G., Selvarani, A. G., Kamal, C., & Venkatesh, G. (2018). *Ricinus communis*—A green extract for the improvement of anti-corrosion and mechanical properties of reinforcing steel in concrete in chloride media. *Journal of Building Engineering*, 19, 376-383.

- Paricaguán, B., Albano, C., Palacios, J., Torres, R., Camacho, N., Infante, J., & Alvarado, M. (2013). Degradación térmica de fibras de coco con tratamiento químico provenientes de mezclas de concreto (estudio cinético). *Revista Ingeniería UC*, 20(2), 60-67. ISSN: 1316-6832
- Pech-Canul, M. A., & Castro, P. (2002). Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 491-498.
- Pérez-López, A., Villaseñor-Perea, C. A., Crisanto-Martínez, V., & Corrales-García, J. J. E. (2009). PROPIEDADES MECÁNICAS Y MADURACIÓN DE FRUTOS DE MANGO (*Mangifera indica* L.) BAJO COMPRESIÓN AXIAL. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(1).
- Pérez, M., & Rebollar, S. (2003). Anatomía y usos de las hojas maduras de tres especies de *Sabal* (Arecaceae) de la Península de Yucatán, México. *Revista de biología tropical*, 51(2), 333-344.
- Pešić, N., Živanović, S., Garcia, R., & Papastergiou, P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and building materials*, 115, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050>
- Popoola, L. T. (2019). Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review. *Corrosion Reviews*, 37(2), 71-102.
- Pradityana, A., Subowo, S., Anzip, A., Soedjono, D. M., Widiyono, E., & Prayogi, R. (2018, July). Inhibition mechanism on mango peels as organic inhibitor in 1 M HCl solution. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1983, No. 1). AIP Publishing.
- Quero, H. 1992. Las Palmas de la Península de Yucatán, México. Publicaciones Especiales del Instituto de Biología. UNAM. México, D. F. ISBN: 968-3627-382
- Quintero, G. (2003). SL Evaluación del uso de la estopa de coco (*Cocos nucifera*), obtenida como residuo de la industria alimenticia en el Valle del Cauca, para la elaboración de elementos prefabricados de concreto aligerado. *Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial)*. Universidad Nacional

de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. Palmira.

- Rahmani, M. H., Dehghani, A., Salamati, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2024). Mango extract behavior as a potent corrosion inhibitor against simulated chloride-contaminated concrete pore solution; coupled experimental and computer modeling studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 130, 368-381.
- Rahim, N. L., Sallehuddin, S., Ibrahim, N. M., Amat, R. C., & Ab Jalil, M. F. (2013). Use of plastic waste (high density polyethylene) in concrete mixture as aggregate replacement. In *Advanced Materials Research* (Vol. 701, pp. 265-269). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.701.265>
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 575-582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.008>
- Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Sanaei, Z., & Ramezanzadeh, B. (2019). Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution by ethanolic extract of eco-friendly *Mangifera indica* (mango) leaves: electrochemical, molecular dynamics, Monte Carlo and ab initio study. *Applied Surface Science*, 463, 1058-1077.
- Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2019). Study of the synergistic effect of *Mangifera indica* leaves extract and zinc ions on the mild steel corrosion inhibition in simulated seawater: computational and electrochemical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111387.
- Ramli, M., Kwan, W. H., & Abas, N. F. (2013). Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 38, 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002>
- Ramya, K., & Muralimohan, N. (2016). Study on Corrosion Inhibitor in Mild Steel by Various Habitual Plant Extract–Review. *International journal of chemical concepts*, 2(2), 70-75.

- Refait, P., Grolleau, A. M., Jeannin, M., Rémazeilles, C., & Sabot, R. (2020). Corrosion of carbon steel in marine environments: role of the corrosion product layer. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), 10.
- Ribeiro, D. V., & Abrantes, J. C. C. (2016). Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach. *Construction and Building Materials*, 111, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.047>
- Ribeiro, D. V., Souza, C. A. C., & Abrantes, J. C. C. (2015). Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to monitoring the corrosion of reinforced concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8, 529-546. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000400007>
- Rocha, J. C. D., Gomes, J. A. D. C. P., & D'Elia, E. (2014). Aqueous extracts of mango and orange peel as green inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *Materials Research*, 17, 1581-1587.
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269, 121240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>
- Rodriguez, P., Ramirez, E., & Gonzalez, J. A. (1994). Methods for studying corrosion in reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 46(167), 81-90.
- Safdar, M. N., Kausar, T., & Nadeem, M. (2017). Comparison of ultrasound and maceration techniques for the extraction of polyphenols from the mango peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13028
- SAGARPA. 2018. Guerrero es líder en producción de mango. Delegación SAGARPA Guerrero <https://www.gob.mx/sagarpa/guerrero/articulos/guerrero-es-lider-en-produccion-de-mango?idiom=es>.
- Salvador, M., Amigó, V., Nuez, A., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Marti, F. (2008, June). Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en

matrices termoplásticos. In *X Congreso Nacional de Materiales* (Vol. 4, pp. 1-4).

- 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. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.i5.222>
- Sanchez-Amaya, J. M., Osuna, R. M., Bethencourt, M., & Botana, F. J. (2007). Monitoring the degradation of a high solids epoxy coating by means of EIS and EN. *Progress in Organic Coatings*, 60(3), 248-254. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.07.020>
- Sánchez, M., Gregori, J., Alonso, C., García-Jareño, J. J., Takenouti, H., & Vicente, F. (2007). Electrochemical impedance spectroscopy for studying passive layers on steel rebars immersed in alkaline solutions simulating concrete pores. *Electrochimica Acta*, 52(27), 7634-7641. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.02.012>
- Sanjuán, M. A., & Toledo Filho, R. D. (1998). Effectiveness of crack control at early age on the corrosion of steel bars in low modulus sisal and coconut fibre-reinforced mortars. *Cement and concrete research*, 28(4), 555-565.
- Sappakittipakorn, M., & Banthia, N. (2012). Corrosion of rebar and role of fiber reinforced concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(1). doi:10.1520/jte103873.
- Sathish, T., Saravanan, R., Depoures, M. V., Palanikumar, B., Rajasimman, M., & Rajkumar, S. (2023). Environmental remediation at vegetable marketplaces through production of biowaste catalysts for biofuel generation. *Scientific Reports*, 13(1), 5067.
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., Shankar, S., Rajasekar, R., & Rajini, N. (2013). Characterization of natural fiber and composites—A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(19), 1457-1476. <https://doi.org/10.1177/0731684413495322>
- Segura, B., Jiménez, F. N., & Giraldo, L. R. (2016). Protótipo de potenciostato com aplicações em processos electroquímicos. *Entre ciencia e engenharia*, 10(19), 61-69. ISSN 1909-8367.

- SIAP. 2016. Atlas Agroalimentario 2016. <http://hube.siap.gob.mx/gobmx-publicaciones-siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016>.
- Silva, F. G. D., & Liborio, J. B. L. (2006). A study of steel bar reinforcement corrosion in concretes with SF and SRH using electrochemical impedance spectroscopy. *Materials Research*, 9, 209-215.
- Sivakumar, P. R., & Srikanth, A. P. (2020). Green corrosion inhibitor: A comparative study. *Sādhana*, 45(1), 56.
- Shafiq, N., Choo, C. S., & Isa, M. H. (2018). Effects of used engine oil on slump, compressive strength and oxygen permeability of normal and blended cement concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.195>
- Shamsheera, K. O., Anupama, R. P., & Abraham, J. (2020). Computational simulation, surface characterization, adsorption studies and electrochemical investigation on the interaction of guar gum with mild steel in HCl environment. *Results in Chemistry*, 2, 100054.
- Sobhani, J., & Najimi, M. (2013). Electrochemical impedance behavior and transport properties of silica fume contained concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 910-918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.010>
- Solís-Carcaño, R. Ó. M. E. L., & 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.
- Solís-Carcaño, R. G., & Alcocer-Fraga, M. A. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(4). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
- Souto, R. M., González-García, Y., Bastos, A. C., & Simões, A. M. (2007). Investigating corrosion processes in the micrometric range: A SVET study of the galvanic corrosion of zinc coupled with iron. *Corrosion Science*, 49(12), 4568-4580. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.04.016>
- Song, H. W., & Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - A review. *International Journal of Electrochemical Science*, 2(1), 1-28. doi:10.1016/s1452-3981(23)17049-0.

- 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.
- Suarez, M., Delgado, F., Yanez, F., León, J. B., Di Prinzio, A., & González, W. A. (2020). Study of the electrochemical behavior of mango extract as a corrosion inhibitor of carbon steels by varying the pH of the electrolytic medium. *Acta Microscopica*, 29(1), 10-18.
- Tamayo, J. M., & Chavarín, J. U. (2002). La Técnica de Ruido Electroquímico para el estudio de la Corrosión.
- Tang, F., Lin, Z., Chen, G., & Yi, W. (2014). Three-dimensional corrosion pit measurement and statistical mechanical degradation analysis of deformed steel bars subjected to accelerated corrosion. *Construction and Building Materials*, 70, 104-117.
- Tao, Z., He, W., Wang, S., Zhang, S., & Zhou, G. (2012). A study of differential polarization curves and thermodynamic properties for mild steel in acidic solution with nitrophenyltriazole derivative. *Corrosion science*, 60, 205-213.
- Thivagarán, R., Salim, N., & Bakar, N. H. A. (2023). Ethanolic Mangifera Indica Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 29(3), 228-234
- Thomas, R. J., & Sorensen, A. D. (2018). Charpy impact test methods for cementitious composites: Review and commentary. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(6), 2422. <https://doi.org/10.1520/JTE20170057>
- Tittarelli, F., & Moriconi, G. (2008). The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(11), 1354-1357. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.06.009>
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). Natural fiber reinforced concrete. In *Fibrous and composite materials for civil engineering applications* (pp. 154-167). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095583.2.154>

- Trabelsi A., & Kammoun, Z. (2020). Mechanical properties and impact resistance of a high-strength lightweight concrete incorporating prickly pear fibres. *Construction and Building Materials*, 262, 119972.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Cement-och betonginst. ISSN 0346-6906
- Valdez-Salas, B., Vazquez-Delgado, R., Salvador-Carlos, J., Beltran-Partida, E., Salinas-Martinez, R., Cheng, N., & Curiel-Alvarez, M. (2021). Azadirachta indica leaf extract as green corrosion inhibitor for reinforced concrete structures: corrosion effectiveness against commercial corrosion inhibitors and concrete integrity. *Materials*, 14(12), 3326
- Varghese, R. G., & Sakaria, P. E. (2017). Experimental investigation on the properties of fresh and hardened concrete with used engine oil as super plasticizer. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 5(4), 2230-2236.
- Veedu, K. K., Kalarikkal, T. P., Jayakumar, N., & Gopalan, N. K. (2019). Anticorrosive performance of Mangifera indica L. leaf extract-based hybrid coating on steel. *ACS omega*, 4(6), 10176.
- Vidaud, I., Frómeta, Z., & Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras. *Construcción y tecnología del concreto*, 30, 31.
- Vu, C. C., Plé, O., Weiss, J., & Amitrano, D. (2020). Revisiting the concept of characteristic compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 263, 120126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120126>
- Wani, T., Pasha, S. A. Q., Poddar, S., & Balaji, H. V. (2022). A Review on the use of High Density Polyethylene (HDPE) in Concrete Mixture. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 9, 861-864.
- Wang, D., Li, Y., Chen, B., & Zhang, L. (2020). Novel surfactants as green corrosion inhibitors for mild steel in 15% HCl: Experimental and theoretical studies. *Chemical Engineering Journal*, 402, 126219.
- Wang, W., Song, Z., Guo, M., Jiang, L., Xiao, B., Jiang, Q., ... & Xu, N. (2019). Employing ginger extract as an eco-friendly corrosion inhibitor in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 228, 116713.

- Wang, L. E. I., Jin, M., Guo, F., Wang, Y. A. N., & Tang, S. (2021). Pore structural and fractal analysis of the influence of fly ash and silica fume on the mechanical property and abrasion resistance of concrete. *Fractals*, 29(02), 2140003. <https://doi.org/10.1142/S0218348X2140003X>
- Wei, A., Tan, M. Y., Koay, Y. C., Hu, X., & Al-Ameri, R. (2021). Effect of carbon fiber waste on steel corrosion of reinforced concrete structures exposed to the marine environment. *Journal of cleaner production*, 316, 128356.
- Wong, H. S., Zhao, Y. X., Karimi, A. R., Buenfeld, N. R., & Jin, W. L. (2010). On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion. *Corrosion Science*, 52(7), 2469-2480.
- Yang, N., WeiHong, L., & Hao, L. (2014). Biosynthesis of Au nanoparticles using agricultural waste mango peel extract and its in vitro cytotoxic effect on two normal cells. *Materials Letters*, 134, 67-70.
- Yaphary, Y. L., Lam, R. H., & Lau, D. (2020). Reduction in cement content of normal strength concrete with used engine oil (UEO) as chemical admixture. *Construction and Building Materials*, 261, 119967. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119967>
- Ye, C. Q., Hu, R. G., Dong, S. G., Zhang, X. J., Hou, R. Q., Du, R. G., ... & Pan, J. S. (2013). EIS analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 688, 275-281.
- Yodsudjai, W., & Pattarakittam, T. (2017). Factors influencing half-cell potential measurement and its relationship with corrosion level. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 104, 159–168. doi:10.1016/j.measurement.2017.03.027.
- Yonezawa, T., Ashworth, V., & Procter, R. P. M. (1988). Pore solution composition and chloride effects on the corrosion of steel in concrete. *Corrosion*, 44(7), 489-499. <https://doi.org/10.5006/1.3583967>
- Yorseng, K., Rangappa, S. M., Pulikkalparambil, H., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Accelerated weathering studies of kenaf/sisal fiber fabric reinforced fully biobased hybrid bioepoxy composites for semi-

structural applications: Morphology, thermo-mechanical, water absorption behavior and surface hydrophobicity. *Construction and Building Materials*, 235, 117464.

- Zarras, P., & Stenger-Smith, J. D. (2014). Corrosion processes and strategies for prevention: an introduction. In *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection* (pp. 3-28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096883.1.3>
- 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.
- Zhou, X., & Zhou, X. I. N. (2014). The unit problem in the thermodynamic calculation of adsorption using the Langmuir equation. *Chemical Engineering Communications*, 201(11), 1459-1467.

ANEXOS

ARTICULOS PUBLICADOS



fibers



Article

Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete

Alejandro Flores Nicolás ^{1,*}, Elsa C. Menchaca Campos ¹, Mario Flores Nicolás ², José J. Martínez González ¹, Omar A. González Noriega ¹ and Jorge Uruchurtu Chavarín ¹

- ¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca C.P. 62209, MOR, Mexico; elsamenchacac@uaem.edu.mx (E.C.M.C.); jose.martinezgon@uaem.edu.mx (J.J.M.G.); ingomarglez@gmail.com (O.A.G.N.); juch25@uaem.mx (J.U.C.)
² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, CDMX, Mexico; mfloresn@ingen.unam.mx
* Correspondence: alejandro.floresnic@uaem.edu.mx



Citation: Flores Nicolás, A.; Menchaca Campos, E.C.; Flores Nicolás, M.; Martínez González, J.J.; González Noriega, O.A.; Uruchurtu Chavarín, J. Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers* **2024**, *12*, 24. <https://doi.org/10.3390/fib12030024>

Abstract: The quantity of different plastics generated after consumption is an impact factor affecting the environment, and the lack of recycling generates solid waste. The purpose of this work is to incorporate high-density recycled polyethylene fibers (HDPE) for possible use as concrete reinforcement. Physical and mechanical properties from recycled fibers were analyzed, such as density, absorption, and stress resistance, as well as workability, air content, porosity, concrete compression, and flexural strength properties. Samples were prepared with a low fiber content of 0.2% and 0.4%, as a substitution for sand weight, and lengths of 10 and 30 mm. To study corrosion phenomena, the specimens were exposed to a saline environment containing 3% sodium chloride for 365 days, and the electrochemical techniques including half-cell potential (HCP), electrochemical noise (EN), linear polarization resistance (LPR), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were applied. The results showed a 4.8% increase in compressive strength with a low fiber percentage and short geometries, while flexural strength increased marginally by 2.3% with small quantities of HDPE fibers. All these factors contribute to greater material durability, less permeability, and crack control. A positive effect of fibers with short dimensions on the corrosion processes of a steel bar was observed, with the fibers acting as a physical barrier against the diffusion of chloride ions.

Keywords: recycling; high-density polyethylene fibers; reinforced concrete; mechanical properties; electrochemical techniques; corrosion



Available online at www.CivileJournal.org

Civil Engineering Journal

(E-ISSN: 2476-3055; ISSN: 2676-6957)

Vol. 10, No. 04, April, 2024



Corrosion Resistance of Reinforcing Steel in Concrete Using Natural Fibers Treated with Used Engine Oil

Alejandro Flores Nicolás ^{1,*}, Elsa C. Menchaca Campos ¹, Mario Flores Nicolás ², Omar A. Gonzalez Noriega ¹, Cesar A. García Pérez ¹, Jorge Uruchurtu Chavarín ¹

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, 62209, México.

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cdmx, 04510, México.

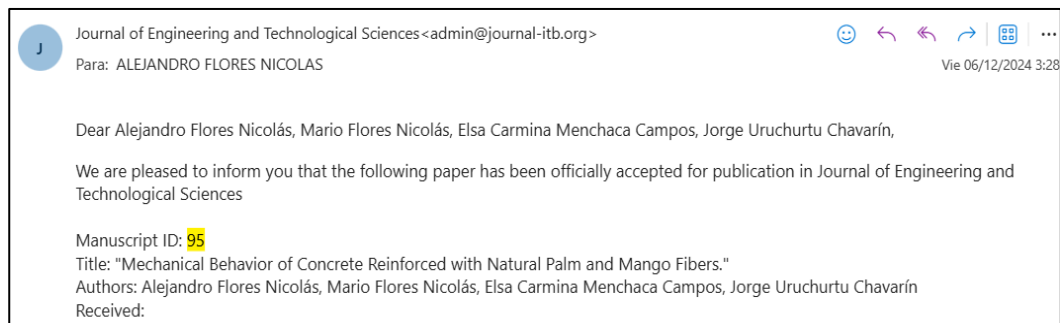
Received 16 January 2024; Revised 12 March 2024; Accepted 21 March 2024; Published 01 April 2024

Abstract

The addition of natural fibers in the elaboration of concrete pastes has increased as an innovative alternative for the development of more ecological and environmentally friendly constructions. The objective of this research is to incorporate natural fiber residues from palm leaves and mango stone impregnated with used engine oil (UEO) in the cement matrix to improve the mechanical and electrochemical properties of reinforced concrete. Samples with fiber percentages of 0.2% and 0.4% with respect to the weight of the sand with a length of 10 mm were fabricated. Their properties, such as workability, air content, porosity, and compressive and flexural strength, were analyzed. To understand the corrosion rate of the steel bars, electrochemical techniques of corrosion potential, electrochemical noise, linear polarization resistance, and electrochemical impedance spectroscopy were applied to cubic samples exposed in a 3% sodium chloride saline environment for 365 days. The experimental results showed a positive effect on the corrosion phenomenon with the UEO and mango fiber treatment, decreasing the corrosion rate due to the formation of a protective film at the steel/concrete interface.

Keywords: Concrete; Natural Fibers; Corrosion; Used Engine Oil; Surface Treatment; Electrochemical.

ARTICULO IN PRESS



ARTICULOS EN REVISIÓN

1. **Nicolás, A. F.**, Campos, E. C. M., Nicolás, M. F., Noriega, O. A. G., & Chavarín, J. U. "*Ethanol extract of mango (*Mangifera indica*) peel as a green inhibitor in the corrosion of carbon steel*".

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

Internacional

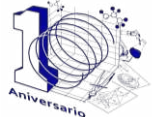
1. Participación poster en la XVII International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum, Ensenada, México, del 23 al 27 de septiembre de 2024.
2. Participación en el XXVI Congreso SIBAE, Lisboa, Portugal, del 19 al 23 de mayo de 2024.
3. Participación en REHABEND 2024 Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, Gijon, España, del 7 al 10 de mayo de 2024.
4. Ponente en LatinCORR e InterCorr 2023, Rio de Janeiro, Brasil, del 5 al 8 noviembre de 2023.
5. Ponente en el XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, del 28 al 30 de septiembre de 2023.

Nacional

1. Ponente en el XXIX Congreso de la sociedad mexicana de electroquímica y 17 th meeting of the mexican section of the electrochemical society, Ciudad de Campeche, Campeche, México, del 7 al 11 de octubre de 2024.
2. Ponente en el XXXVIII Congreso de la sociedad mexicana de electroquímica y 16 th meeting of the mexican section of the electrochemical society, Ciudad de los Mochis, Sinaloa, México, del 16 al 20 de octubre de 2023.
3. Participación en el XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Huatulco, Oaxaca, México, del 30 mayo al 2 de junio 2023.
4. Ponente en el XXXVII Congreso nacional de la sociedad mexicana de electroquímica y 15 th meeting of the mexican section of the electrochemical society, Ciudad de Puebla, Puebla, México, del 10 al 14 de octubre de 2022.
5. Ponente en el XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Puerto. Vallarta, Jalisco, México, del 23 al 26 de agosto de 2022.
6. Ponente en el XLII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Evento virtual, México, del 8 al 11 de septiembre de 2021.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Cuernavaca, Morelos, 28 de noviembre de 2024.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
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: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS DEL ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO INCORPORANDO FIBRAS NATURALES Y SINTÉTICAS., que presenta el alumno **Alejandro Flores Nicolás**, para obtener el título de **Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

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

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

DR. ISAÍ ROSALES CADENA

DR. RENÉ GUARDIÁN TAPIA

DRA. ANA KAREN GÁLVEZ LARIOS

DRA. MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS

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:2024-12-02 17:08:10 | FIRMANTE

hFZM0StellXeQN3ou15vTP2WkV4PiyutFRv0N/UQhBLma4w9i2MZ5SCav8x77giUtn81Pn0BK8JuN0NaAQkfSELUbmRiDvg90lrXU6Usne/O4hbPxA+HUOW3K9XdlbQsDfNuu0l4HWonMyZd/OSKbdB9F2hozXrFmM8qDE+an9tVcldB4klYApGifoPOM1xHckN0LHwUPNpiWupQLGV1w7eh/NFM1i7bx9qgudGDypPS6uw6SKTimSmpfkLmi0pR0ZINcvjrwlfg/mWOjhqermd157AxyWAbIN2JFdQXT5Xf8lz44M5Lym/4MkGXMwZax0/pZ+umKm/m/el/+Dw==

ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS | Fecha:2024-12-03 14:25:45 | FIRMANTE

c+ad0xfmUjDbqbWldxXJwxZwxaFk1pf+JIYzmchoqq8PKYsNpkuVgd3ZENPa8RVmIjgFLeGYuxcY2ZrhKiOi9oxei11t6cvy2NV4Af1FuR247lxK20zW81Y1k3viNX8W5ES+HZE09sWkTZ7cXBTQ0Eb0SwWnR0B2snaGc34mYV3X8Co03rttqLHnJpk51ABnNI80T74Zc2veUIKiUidjbMvm3894sL4mYVaNRQ4DOEkvCaMbt2KzppN6uS5yidULhnBJ8rvombnk1TUITXzhlAV6NeBSX4WQRQ+Gw316yuC9BNweAa8jk9veEo68pb+IB+8O8i+46gT12s8JRInA==

JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2024-12-04 08:16:47 | FIRMANTE

ofHfTYGRvvcvYs5OR011g8zWPIxZrBn7TBEV/eHPKKzwitv4hHnt6afN8T2fg8XB52PTGoDDpJfCp1oEAI439EQTxFOa7hwmJfYPePkDqHkd+HNG2h5zPYV95slMyMEZnaSCHee+8Xuk2JvKnDIL4nwTGN73TRwAPYtfY9fPJMB5VdOIEWvoky5M0OJs04p54ZGju+thbCbW1wXORaE6p2VwIzOvg7rZx9XNFTbuAZWoDQ9SzdC8pkpJpgL5YCzJEQleuLxkJnNdLxTpn8iOdnpE9hCkmEpl4eCUi4gCivhLl4tX9lzonSfpZujlUGW3L1RF5kxR0nLCS90hsw==

RENE GUARDIAN TAPIA | Fecha:2024-12-05 12:22:57 | FIRMANTE

ecEmRUvijXGTHAUIAVq7MMDcy7YEsUsjrMLz73hIV6AOUMnl2y6CsJGn/a0zzn3n2wtBgX7ReamhTZAb7MHPPbSEIAF3nR3ktGoklghSJnndOhbkRDdYV39b25afeuIB/XZ1z130wMOXQn/3sSVZ7ZpDxf4Wg5Gv45GXDFPpL44c9V/3KYfh3HX13atjmvBbM+Bz7gkfkJUuxv3cH88GzNs+QvAXSe4j4cMg2BdiWRmjHnVIPLV/tM5b0z2p8hzKAYV+G6FZhlhHrD0qrND2pJgmRGa20WYwN2vtvYLZsGZvgERcvvr8kh/Uin3BGSJ+pMjfkEA4tGz8i2Z2Ow==

ANA KAREN GALVEZ LARIOS | Fecha:2024-12-09 13:34:23 | FIRMANTE

WXKFLuSIIAXaahmo/ulQdZLmrFwYD0tPrWYTg6xCp1uDFCO7xCz+Py7b3KuH2Me+LADUG3a7NIBPXIAJSN/JmA6NMu3yCRHwLndeDxdqMu/BLy/43DZTiKsV8J1LZ5rvGj2dmY3mdR162GEVQEITv5mOFcJZZQLH1VajZbQ7z593L2qFnPTK6Evq1HGQFD+tdi8j07U/shD5z7IUghtJckikT8vUngsMJl6BE8LmEQGLxsuXv6dRYWxmuJVD9pF1ijSzB9g5720LvJCRwRzRqNul1XB679+eex0CY2kMcMKouXxYt5OMf1j+Egu3OJ4WrrUrsU0UScy7DN6dGpHQ==

ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2024-12-18 12:13:21 | FIRMANTE

J1in4rPqBP8S92PNk/wjk/BGUKQ6mETzbh4Eazg6UTBur8IPdpOD8RFNUaUkQi+oPkMLxhDPadNgIYVwqBK0wQwRxDLYlqBlqTgJEqJm30rX28R1iBuhKtXqvob04/Otlz+bqGwEQBfhJf5wO0eRy+9/69YG3NhhnhLwKR+qCYnu19tgbVUcZ6yIE7uM5TcRkzK3BzSeHqkB+vElkR829HemGEnO0u1fNQLdPxkzrTxDc3g4Tg+FpBSYODVYQCBMi927AU/g2m8WJlhCvFJulIEefk6mi1s2S2k1mMiQIFGbbLswmb1qgxaXP+4MVwGGRguBsGXmhePwm2K3KzPQ==

MIRIAM FLORES DOMÍNGUEZ | Fecha:2025-01-09 11:43:59 | FIRMANTE

Oz5veGnVfVIEYN+1cNfD5CBIU/E+XhskGD/ehM45WcoSO9nc+B3mop4L8ThGyvLETXfA8SLL/iaMjJifa6yKstAfdHslRk/leJXqEN6EoYoyJbvk6rZBz0SVVLSXInuBx2D10OwhKD+Y2u4jij7SV0z7qAjHcMsHcU0jnfokRM3XGAogmyuTltuOLN6US44MEWO4elQPifTKWxliYobuemGlcroqWNOiGMMO8Wmyl7CHMU6kTWgmpsXeZsaOtb15g85jpilEv7qRAUYW5FQYcJ/dHhFNX4btGG+Md60UAyvaXOfAe0TdOaHHm/YRR0baJdiObDpiXOs14hBxJA==

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



VMDZptlbv

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/TR8m4isqdkrMKC2jfoDs6l2Ru8fEsRE>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029