

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN
MARTIN COMISION NACIONAL DE ENERGIA
ATOMICA INSTITUTO DE TECNOLOGIA
“Prof. Jorge A. Sábato”

INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE DE
GUAYAQUIL EN LA CORROSIÓN DE
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO
PREPARADAS CON CEMENTO PUZOLÁNICO (*)

Por Ing. Alisson Vanessa Valarezo Beltrán

Director:

Dr. Gustavo S. Duffó

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2022

Para mi Memena, Abue,
Julián,
Andre, Juli y Mica.

Agradecimientos:

A mi Director Gustavo Duffó por su paciencia.

A todos mis profesores del Instituto Sábato, por compartir sus conocimientos y lecciones de vida.

A Anita Kurcin y Alicia Sarce por su amistad y cariño.

A la ESPOL por siempre tener sus puertas abiertas.

A Buenos Aires, nuestra segunda casa.

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento de hormigones armados elaborados con cemento puzolánico y la protección que estas mezclas proveen al acero de refuerzo. El cemento puzolánico es de uso común en las construcciones en el Ecuador. El país posee una orografía que permite estimar la existencia de grandes reservas de materiales puzolánicos derivados de volcanes extintos.

Se elaboraron probetas cúbicas de hormigón con barras de acero embebidas para realizar ensayos electroquímicos y obtener parámetros como: resistividad eléctrica del hormigón y del acero, potencial de corrosión y resistencia a la polarización del acero; realizándose mediciones periódicas por aproximadamente 400 días. Además, se elaboraron probetas cilíndricas para ensayos de difusión de iones cloruro y de dióxido de carbono en la matriz de hormigón.

Los resultados de los ensayos se comparan con resultados obtenidos en investigaciones similares y con los rangos aceptados para los diferentes parámetros analizados, aunque múltiples factores pueden influir en el comportamiento del hormigón armado. Con estos resultados y en base al modelo de vida útil de Tuuti, se analiza el comportamiento que presentarían construcciones realizadas con estas mezclas.

ABSTRACT

In the present work the behavior of concretes made with concrete of pozzolanic cement and the protection that these mixtures provide to the reinforcing steel is studied. Pozzolanic cement is commonly used in constructions in Ecuador. The country has an orography that allows to estimate the existence of large reserves of pozzolanic materials derived from extinct volcanoes and the possible use of alternative sources of pozzolans is being studied.

Steel reinforced specimens were prepared for electrochemical and electrical tests and obtain parameters such as: electrical resistivity of concrete and steel, corrosion potential and resistance to polarization of steel; performing periodic measurements for approximately 400 days. In addition, cylindrical specimens were developed for tests of diffusion of chloride ions and carbon dioxide in the concrete matrix.

The results of the tests are compared with results obtained in similar investigations and with the accepted ranges for the different parameters analyzed, although multiple factors can influence the behavior of the concrete. With these results we analyze the model of useful life of Tuutti that would present constructions realized with these mixtures.

PROYECTOS MARCO

- Estudio de la degradación de barreras ingenieriles en repositorios de residuos nucleares. PICT/2005 32069 Director Dr. Ricardo M. Carranza. Diciembre/2006 a diciembre/2009 (\$ 279.312.-)
- Nuevos materiales para el ciclo del combustible nuclear. Subsidio Universidad Nacional de San Martín. PROG07A/1. Director Gustavo S. Duffó. Febrero 2009/Abril 2014. (\$ 270.000.-)
- Durabilidad de barreras ingenieriles en repositorios de residuos nucleares PICT/2008 A-2216. Director Dr. Gustavo Duffó. Agosto/2011 a Julio/2014 (\$ 245.900.-)
- Evaluación, modelado del comportamiento y selección de materiales para contenedores de residuos radioactivos y componentes de reactores nucleares. PICT/2016 -0082. Director Dr. Gustavo S. Duffó 2017/2020 (\$ 950.000.-)

CONTENIDO

CAPITULO I:	1
EL HORMIGÓN ARMADO Y SU DURABILIDAD.	1
1.1. EL HORMIGÓN ARMADO.	1
1.2. EL CEMENTO.	4
1.2.1. PUZOLANAS.	8
1.2.2. FUENTES DE PUZOLANA EN EL ECUADOR.	10
1.3. OTROS ELEMENTOS DEL HORMIGÓN.	13
1.3.1. AGREGADOS SÓLIDOS.	13
1.3.2. AGUA DE MEZCLA Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO.	15
1.3.3. ADITIVOS.	18
1.3.3.1. INHIBIDORES DE CORROSIÓN.	19
1.3.4. ACERO DE REFUERZO.	20
1.4. LA DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO.	21
1.4.1. LA CORROSION EN EL HORMIGON ARMADO.	22
1.4.2. TIPOS DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO.	24
1.4.3. MECANISMOS DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS.	27
1.4.4. MODELO DE VIDA ÚTIL DEL HORMIGÓN.	32
 CAPITULO II:	 36
TECNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGON EN ATMOSFERAS AGRESIVAS	36
2.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN.	37
2.1.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGON.	37
2.1.2 PROCESO DE MEZCLA.	38
2.1.3 COLADO DE PROBETAS.	40
2.1.3.1. ELABORACIÓN DE PROBETAS CÚBICAS.	40
2.1.3.2. ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.	43
2.2 DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS Y CONDICIONES DE EXPOSICIÓN.	44

2.2.1 EXPOSICIÓN EN ATMÓSFERA NATURAL DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.....	45
2.2.2 EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO.....	48
2.2.3 EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN POR CLORUROS.....	50
2.3 TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	51
2.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	51
2.3.2 MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA Y CÁLCULO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN.....	53
2.3.3 MEDICIÓN DE POTENCIALES DE CORROSIÓN DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN (E_{corr}).....	58
2.3.4 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL...	60
2.3.5 ENSAYOS DE DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES.....	65
2.3.5.1.DIFUSIÓN DE CLORUROS.....	65
2.3.5.2.DIFUSIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.....	74

CAPITULO III: 76

VALORES EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 76

3.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.....	76
3.2 ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL.....	79
3.2.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE RESISTENCIA R_Q Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA ρ	79
3.2.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE POTENCIALES DE CORROSIÓN DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN (E_{corr}).....	83
3.2.3 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL: DENSIDAD DE CORRIENTE DE CORROSIÓN (i_{corr}).....	86
3.3 ENSAYOS DE DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES.....	90
3.3.1 DIFUSIÓN DE IONES CLORURO.....	90
3.3.2 DIFUSIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.....	94
3.4 MODELO DE VIDA ÚTIL DE TUUTTI.....	98

CAPITULO IV: 100

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 100

4.1 CONCLUSIONES 100

4.2 RECOMENDACIONES 103

BIBLIOGRAFIA 104

CAPITULO I:

EL HORMIGÓN ARMADO Y SU DURABILIDAD.

En este capítulo se presenta un breve resumen de la importancia del hormigón armado y su desarrollo a través de la historia, para luego revisar la industria cementera del Ecuador y analizar por qué el cemento portland puzolánico es el de uso más extendido en el país.

Después se analizarán los principales factores que afectan la corrosión de las armaduras de acero embebidas en hormigón, lo que permitirá observar la relación directa entre la corrosión y el medio ambiente al que se someterán los especímenes de prueba.

Finalmente se estudiará cómo la corrosión afecta a la vida útil del hormigón armado.

1.1. EL HORMIGÓN ARMADO.

El hormigón armado o reforzado, es uno de los materiales que más ha influido en la arquitectura y en la construcción contemporánea, pues permite construir formas y magnitudes antes no alcanzadas. Presenta varias características que favorecen su utilización, algunas de las cuales se resumen a continuación (HARMSEN, 2005): larga vida útil con relativamente poco mantenimiento; combina la resistencia a la compresión del hormigón con la resistencia a la tracción de las barras de refuerzo; resistente al agua y a fuegos de mediana intensidad; el encofrado permite darle diferentes formas; puede resistir las cargas laterales de viento, cargas móviles y ciertos niveles de cargas sísmicas y disminuir las vibraciones en las estructuras; es relativamente económico.

La figura 1 sirve para ilustrar los criterios mencionados. Se muestra el proceso de encofrado de losa de hormigón armado del puente Guayaquil-Daule.



Figura 1. Proceso de encofrado de losa de hormigón armado en puente Guayaquil-Daule. Fuente: Autor.

El hormigón simple es muy adecuado para resistir esfuerzos de compresión de hasta 70 MPa (CAMPOSANO, 2011), pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.). El acero en barras o varillas lisas y/o corrugadas tiene una resistencia a la tracción de 280 MPa (ASTM A615/A615M - 20 Grado 40[280]) hasta 690 Mpa (ASTM A615/A615M - 20 Grado 100[690]). El hormigón armado integra las propiedades del hormigón simple (cemento, arena, grava y agua)

y de la armadura metálica que utiliza de refuerzo. El trabajo conjunto de sus componentes y su comportamiento ante los medios agresivos serán decisivos para la durabilidad de las estructuras.

El hormigón separa al hierro del medioambiente protegiéndolo de los elementos agresivos y ayuda a formar un óxido protector sobre el hierro, al tratarse de un medio alcalino.

Las propiedades del hormigón dependen principalmente de la calidad y proporciones de los componentes de la mezcla y de las condiciones de humedad y temperatura durante los procesos de fabricación y fraguado. El hormigón que rodea a las barras de acero impide su pandeo, optimizando su empleo estructural. A su vez, el coeficiente de dilatación térmica del hormigón es similar al del acero.

Para definir su durabilidad, las estructuras construidas con hormigón armado básicamente deben soportar las condiciones de diseño sin deteriorarse durante el periodo de vida útil para el cual fueron diseñadas. Durante su vida útil, el hormigón estará expuesto a elementos externos o internos que pueden afectar su durabilidad. La interacción entre la microestructura de los materiales y el ambiente que lo rodea hace que sus propiedades cambien con el tiempo. En condiciones ideales -elevada alcalinidad y contenido de oxígeno normal- (como serían las de un hormigón fresco) las estructuras aéreas conservarán indefinidamente la película pasivante que protege a la armadura; y en las estructuras sumergidas en ausencia de oxígeno en un hormigón sin grietas, la corrosión será muy lenta.

Cuando las condiciones de exposición cambian y penetran en su masa elementos agresivos, la película protectora se destruye generándose corrosión (la película protectora se vuelve

inestable, por descenso del pH), y la sección del acero disminuye o llega a transformarse en óxido. El hormigón se fisura por la presión expansiva del óxido (delaminación de la armadura) y se pierde la adherencia entre la armadura y el hormigón.

Además, para prevenir la corrosión de armaduras es importante alcanzar un recubrimiento mínimo de las mismas.

1.2. EL CEMENTO.

El componente principal del hormigón simple es el cemento. El cemento es un aglutinante o aglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos, como la grava y la arena y el agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua adquiriendo una consistencia pétreo.

El cemento portland se fabrica principalmente con "cal, sílice, alúmina y óxido de hierro", por lo tanto, el clinker portland es "un mineral artificial". (SÁNCHEZ, 2001)

El cemento portland es el aglomerante de uso más extendido, y al mezclarse con agua, forma una pasta que puede fraguar y endurecer de manera progresiva; y por este motivo se lo llama aglomerante hidráulico (cales o cementos hidráulicos). GALVELE, 2006)

La industria ecuatoriana suministra el 100% del cemento gris que se consume en el país, siendo el cemento Portland IP o Cemento Portland Puzolánico el tipo de cemento de uso más extendido. El cemento utilizado para la evaluación de la corrosión en estructuras de hormigón armado en el presente trabajo corresponde a esta denominación. Este tipo de cemento se elabora bajo la norma NTE INEN 490:2011 "Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos" (INEN, 490:2011), norma equivalente a la

ASTM C595/C595M-20 "Especificación de estándar para cementos hidráulicos mezclados" (ASTM, 595:2020).

La norma NTE INEN 151:2010 "Cemento Hidráulico. Definición de términos" (INEN, 151:2010), define al Cemento portland puzolánico como "El producto resultante de la pulverización conjunta de clínker Portland y puzolana o de una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y puzolana finamente molida, con la usual adición de sulfato de calcio, siendo el contenido de puzolana entre el 15 y 40% de la mezcla en masa" y también define a la puzolana como un "Material silíceo o sílico-aluminoso, el cual por sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes".

En las tablas 1 y 2 se detallan los requisitos que debe cumplir este tipo de cemento, según la norma NTE INEN 490:2011.

Tabla 1. Requisitos químicos del cemento hidráulico compuesto tipo IP, (NTE INEN 490:2011).

Elemento	% máximo
Óxido de magnesio (MgO)	6,0
Sulfato (SO ₃)	4,0
Pérdida por calcinación	5,0

Tabla 2. Requisitos físicos del cemento hidráulico compuesto tipo IP, (NTE INEN 490:2011).

Requisito	Valor
Finura	Cantidad retenida en el tamiz 45 μ m (No. 325).
Expansión autoclave, % máx.	0,80
Contracción autoclave, % máx.	0,20
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat.	
Fraguado, minutos, no menor a	45
Fraguado, horas, no mayor a	7
Contenido de aire en el mortero, volumen, % máx.	12
Resistencia a la compresión, mínimo MPa	
3 días	13,0
7 días	20,0
28 días	25,0
Requerimiento de agua, % máx., en peso del cemento	--
Contracción por secado, % máx.	--

En la figura 2 se presenta parte de un certificado de producto, correspondiente al tipo de cemento a ser evaluado, documento proporcionado por el Centro Técnico del Hormigón de Guayaquil. Aquí se puede observar los requisitos solicitados por la norma INEN 490 y los resultados obtenidos en un periodo de producción.

Actualmente este cemento cumple además la norma NTE INEN 2380:2011 "Cementos Hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos", equivalente a la ASTM C1157/C1157M - 20a "Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico", estableciendo requisitos de desempeño más exigentes, pero con procesos productivos que generan menor

cantidad de CO₂ (30% según lo indicado en su empaque), clasificándose bajo el tipo GU (Uso General).

Requisitos Obligatorios según Normas							
Requisitos Químicos				Requisitos Físicos			
Propiedad	Unidad	INEN 490	Resultado	Propiedad	Unidad	INEN 490	Resultado
SiO ₂	%	A	27.9	Contenido de aire en el mortero	%	12 máx.	1.7
Al ₂ O ₃	%	A	5.8	Blaine	m ² /kg	A	431
Fe ₂ O ₃	%	A	2.6	Retenido en 45 um (No.325)	%	A	6.4
CaO	%	A	56.0	Expansión en Autoclave	%	0.8 máx.	---
MgO	%	6.0 máx.	1.2	Contracción en Autoclave	%	0.2 máx.	-0.017
SO ₃	%	4.0 máx.	2.8	Expansión barra de mortero a 14 días	%	A	N/D
Pérdida por calcinación	%	5.0 máx.	2.5	Fraguado Inicial Vicat	minutos	45-420	142
Residuo Insoluble	%	A	13.1	Fraguado Final Vicat	minutos	A	260
				Resistencia a la compresión			
				1 Día	MPa	A	12.3
				3 Días	MPa	13.0 mín.	23.4
				7 Días	MPa	20.0 mín.	31.4
				28 Días	MPa	25.0 mín.	43.3
Requisitos Opcionales según Normas							
Requisitos Químicos				Requisitos Físicos			
Propiedad	Unidad	INEN 490	Resultado	Propiedad	Unidad	INEN 490	Resultado
				Falso fraguado	%	A	71.4
Comentarios							
Los resultados de los análisis químicos están calculados en porcentaje en peso.							
La resistencia a 28 días corresponde al promedio del mes anterior							
(A) No aplica							
(N/D) Resultado del ensayo para este período de producción no disponible							

Figura 2. Requisitos obligatorios según normas. Ejemplo de certificado de producto, Doc ID ACB0-H00-RC25, (HOLCIM, 2008).

En un estudio realizado por León (LEÓN, 2020), sobre las emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador, determinó que producir una tonelada de cemento “consume 3.191,95 MJ de energía y genera 510,57 KgCO₂”, y que la mayor parte de estas emisiones y el consumo de energía se producen en la etapa de fabricación de clinker. El estudio de León utilizó cemento puzolánico tipo IP, fabricado con 66,64% de clinker, 29,46% de puzolana y menos del 4% de otros materiales. En la producción de este cemento, primero se produce el clinker y posteriormente durante la etapa de molienda se incorpora la

puzolana. En la producción del clínker se consume un 91,4% de energía y se genera 92,7% de emisiones de CO₂.

El uso de puzolana puede mejorar el desempeño del hormigón y a la vez lograr beneficios económicos y medioambientales. En el Ecuador las empresas cementeras utilizan puzolana natural en la fabricación del cemento, pero además se están realizando diversos estudios de fuentes de puzolana alternativas, para aprovechar residuos de producción de otras industrias.

1.2.1. PUZOLANAS.

Sánchez (SANCHEZ, 2001) define los materiales puzolánicos de la siguiente manera:

Materiales sílico-aluminosos naturales o artificiales que, carentes de actividad hidráulica y de propiedades cementicias por sí solos, contienen constituyentes que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, se combinan con el hidróxido de calcio para formar compuestos permanentes insolubles en agua y estables, los cuales se comportan como conglomerantes hidráulicos.

Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales o intermedias. Las puzolanas naturales, "pueden ser de origen mineral eruptivo (geotérmico-igneovolcánico o hidrotérmico-geisseriano o de origen sedimentario vegetal (como las tierras formadas por esqueletos de plantas llamadas tierras diatomáceas o animal (como la tierra de infusorios formada por caparzones animales)". (SANCHEZ, 2001)

Las puzolanas artificiales son las que "resultan de tratamientos térmicos de activación (entre 600°C y 900°C), de ciertas rocas no reactivas en estado natural, generalmente de carácter

arcilloso, o subproductos industriales de bauxitas utilizadas en la obtención del aluminio (si-stoff) o cenizas volantes que provienen de la combustión del carbón utilizado en las centrales térmicas" (SANCHEZ, 2001). También entran en esta clasificación, las cenizas y residuos agrícolas (cascarilla de arroz, bagazo y paja de caña de azúcar), quemados convenientemente.

Finalmente, las puzolanas intermedias "son aquellas puzolanas naturales que, como las artificiales, se someten a tratamientos térmicos de 'ennoblecimiento' a aproximadamente 700°C de temperatura, para incrementar su actividad 4 o 5 veces más". (SANCHEZ, 2001)

Se busca puzolanas que contengan los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) en una proporción mayor al 70%. La tabla 3 describe los requisitos para puzolanas para uso en cementos compuestos de acuerdo con la NORMA INEN 490-2011.

Tabla 3. Requisitos para puzolanas para uso en cementos compuestos, (NTE INEN 490:2011).

REQUISITO	%	DETALLE
FINURA	20,0 máx	Cantidad retenida en el tamiz de 45 μm (No. 325) mediante el tamizado húmedo
REACTIVIDAD ALCALINA	0,05 máx	Seis ensayos, expansión de la barra de mortero a 91 días
INDICE DE ACTIVIDAD CON CEMENTO PORTLAND	75 mín	A 28 días

Entre las ventajas de adicionar puzolana al cemento, SANJUÁN (SANJUÁN, 2004), indica que "La puzolana natural confiere al cemento mayor durabilidad ya que ofrece una mayor resistencia a

los ataques de aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez”.

SÁNCHEZ (SÁNCHEZ, 2001), menciona también múltiples ventajas de los cementos puzolánicos: “Mejor trabajabilidad, menor segregación y exudación, menor calor de hidratación, fraguado más lento, menor tendencia a la fisuración, mayor valor de la relación tracción/compresión a corto plazo, mayor resistencia en general a largo plazo, menor permabilidad, mayor durabilidad a ataques por sulfatos y reacciones expansivas”.

1.2.2. FUENTES DE PUZOLANA EN EL ECUADOR.

La puzolana, se encuentra dentro del grupo de las rocas y minerales industriales no metalíferos; cuyas propiedades físicas permanecen inalteradas hasta su aplicación final. (CORNEJO, 2016). En el Ecuador, “La explotación de caliza y puzolana para la industria del cemento constituye el rubro más importante de la producción minera no metálica”. (CYTED, 2000)

La disponibilidad de suelos provenientes de cenizas y rocas volcánicas se debe a que el Ecuador se encuentra en el “Anillo de Fuego” o “Cinturón de Fuego” del Pacífico (figura 3); el cual agrupa fallas oceánicas y volcanes terrestres y submarinos. Los volcanes del Ecuador se encuentran en la Cordillera de los Andes (figura 4), que va desde Venezuela, hasta Chile y Argentina.

Además del interés turístico que despierta la Avenida o ruta de los volcanes (figura 5), esta geología permite la explotación actual de minerales no metálicos puzolánicos. Se estima la existencia de un gran volumen de reservas de materiales puzolánicos derivados de las chimeneas volcánicas extintas.

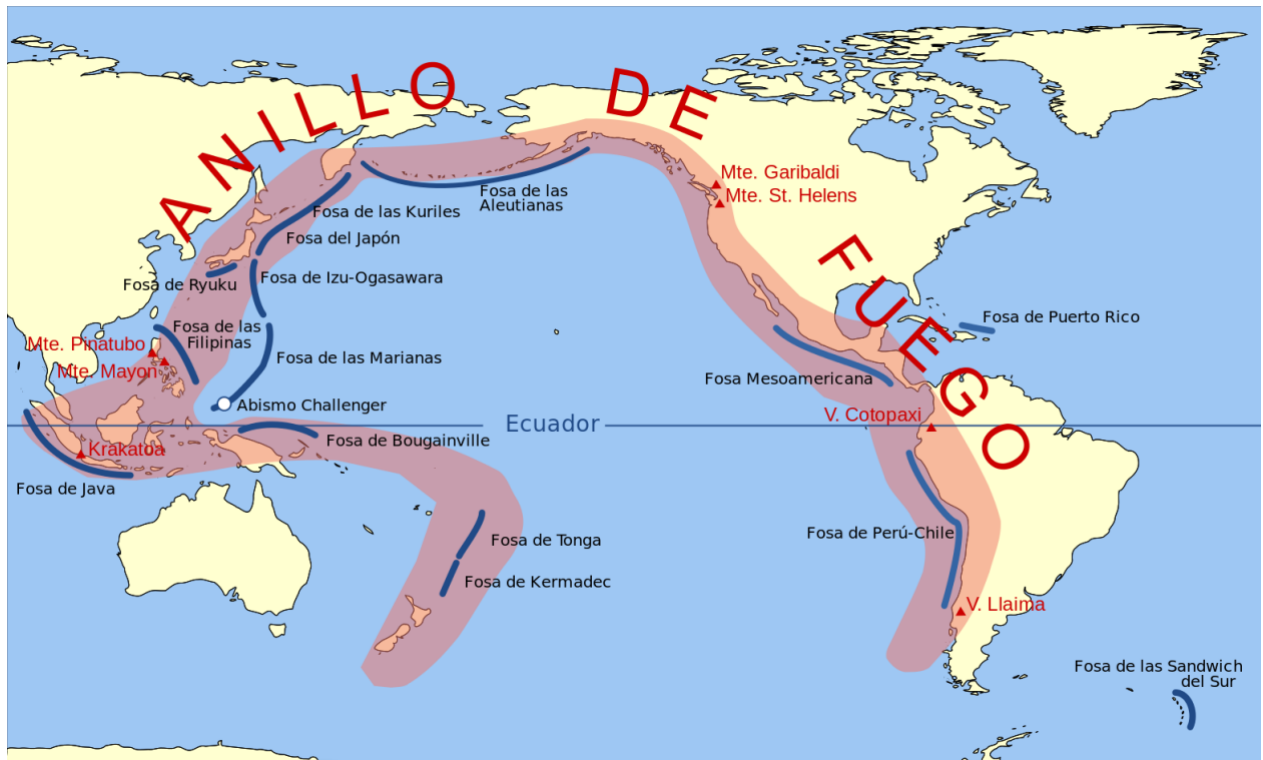


Figura 3. Mapa del cinturón o Anillo de Fuego del Pacífico, (GRINGER, 2009) .

Paladines (PALADINES, 2013) indica que, en la cordillera de los Andes, específicamente en el denominado callejón interandino, se cuenta con depósitos de piedra pómez, pumitas y puzolanas que podrían estimarse entre las 10 reservas más grandes del mundo.

En el Ecuador las compañías productoras de cementos portland puzolánicos o tipo GU, son: Unión Cementera Nacional, Unión Andina de Cementos y Lafarge-Holcim. La utilización de puzolanas como materia prima consumida por estos fabricantes, es variable anualmente. Por ejemplo, el grupo Lafarge-Holcim reporta que en el año 2016 empleó 564.626 toneladas de puzolana en su producción, mientras que, en el año 2013, consumió 1,125,862 toneladas. (HOLCIM, 2016)



Figura 4. Cordillera de los Andes. Mapamundi físico de América del Sur, (HILL, 2017) .

De acuerdo con Sánchez (SÁNCHEZ, 2011) el 83% del cemento producido por Holcim Ecuador corresponde a cemento tipo IP o puzolánico. Según Hernández (HERNÁNDEZ, 2021), la industria cementera ecuatoriana no produce cementos portland puros, pues la adición de puzolanas permite producir cementos más económicos. La Norma NTE INEN 2380 no especifica la composición química que debe cumplir el cemento para adherirse a esta especificación,

sólido único o "piedra artificial". Pueden llegar a constituir el 70 u 80 % del volumen de la mezcla del hormigón. (SANCHEZ, 2001)

Los agregados como material de relleno permiten abaratar los costos de la mezcla, aportan resistencia mecánica y durante el fraguado ayudan a controlar los cambios volumétricos de la pasta previniendo el agrietamiento por retracción plástica. La composición, forma y tamaño de los áridos influyen sobre la resistencia, calidad del hormigón y modifican la estabilidad de la estructura. Su influencia viene determinada indirectamente por la cantidad de agua que se debe añadir a la mezcla para obtener la trabajabilidad y compactación necesaria. (SÁNCHEZ, 2001)

Los agregados pueden clasificarse según su granulometría, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación general del agregado según su tamaño, (SÁNCHEZ, 2001).

Tamaño de las partículas en mm	Denominación más corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para concreto
Inferior a 0,002 0,002 - 0,074	Arcilla Limo	Fracción muy fina	No recomendable
0,074 - 4,76 4,76 - 19,1 19,1 - 50,8 50,8 - 152,4	Arena Gravilla Grava Piedra	Agregado fino	Material apto para producir hormigón
Superior a 152,4	Rajón, piedra bola	Agregado grueso	

1.3.2. AGUA DE MEZCLA Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO.

El agua en una mezcla de hormigón provoca varias reacciones químicas que permiten la hidratación del cemento, que se desarrollen sus propiedades aglutinantes y que se logre el fraguado, para formar un sólido único con los agregados. (SÁNCHEZ, 2001)

El agua en el hormigón se clasifica en agua de mezclado y agua de curado como se detalla a continuación en base a las definiciones de Sánchez (SANCHEZ, 2001), lo que se muestra de manera esquemática en la figura 6.

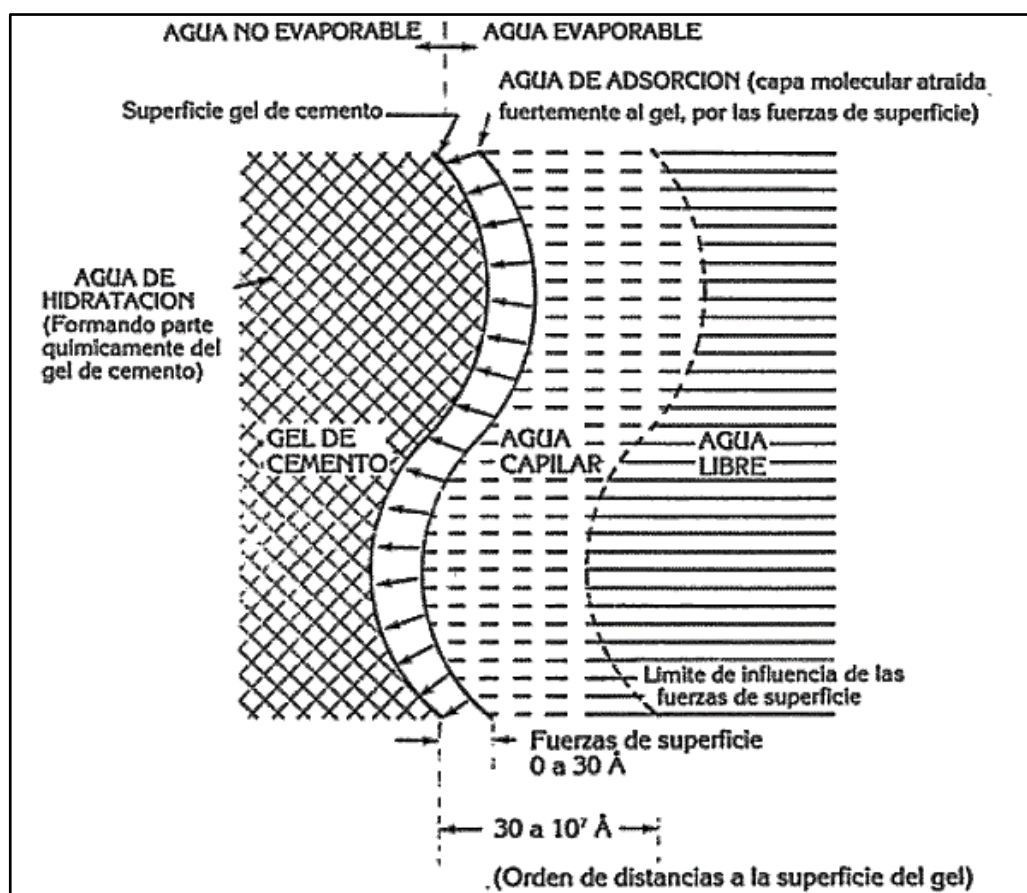


Figura 6. Esquema de ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado, (SANCHEZ, 2001).

Agua de mezclado: Corresponde a la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, para producir una fluidez que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentre en estado plástico. Se conoce como relación agua/cemento.

Conforme se produce la hidratación del cemento, esta pasta se transforma en gel de cemento, conteniendo el agua en dos formas básicas:

Agua de hidratación: Reacciona químicamente con el cemento; formando lo que se conoce como gel o pasta hidratada. A una temperatura de 110°C no se produce evaporación, por lo que se denomina no evaporable.

Agua Evaporable: Es capaz de evaporarse a 110°C y 0% de humedad relativa del ambiente. Puede encontrarse en tres condiciones distintas, de acuerdo:

- **Agua de Adsorción:** Capa de agua adherida a la superficie del gel por fuerzas intermoleculares de atracción.
- **Agua Capilar:** Ocupa los poros entre los granos del cemento. Las aguas de absorción y capilares ocupan un 77% dentro de estas aguas.
- **Agua Libre:** Se evapora en "Condiciones de secado".

Agua de curado: Es el agua requerida para hidratar el cemento. Su objetivo es mantener el concreto saturado para lograr la hidratación casi total del cemento, aumentando su resistencia.

De acuerdo con Kosmatka, (KOSMATKA, 2004), "La calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad

de agua usada con relación a la cantidad de cemento". El mismo autor indica algunos de los beneficios de tener una menor relación agua/cemento: Mayor resistencia a la flexión y compresión, menor permeabilidad, mayor resistencia a la intemperie, se reducen la retracción y la fisuración y se producen menos cambios de volumen por mojado y secado. Por ejemplo, Kosmatka resume en el gráfico de la figura 7 la "variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento, de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999", en donde se puede observar que cuando aumenta la relación agua/cemento la resistencia a la compresión disminuye. El presente trabajo utiliza una relación de 0,42.

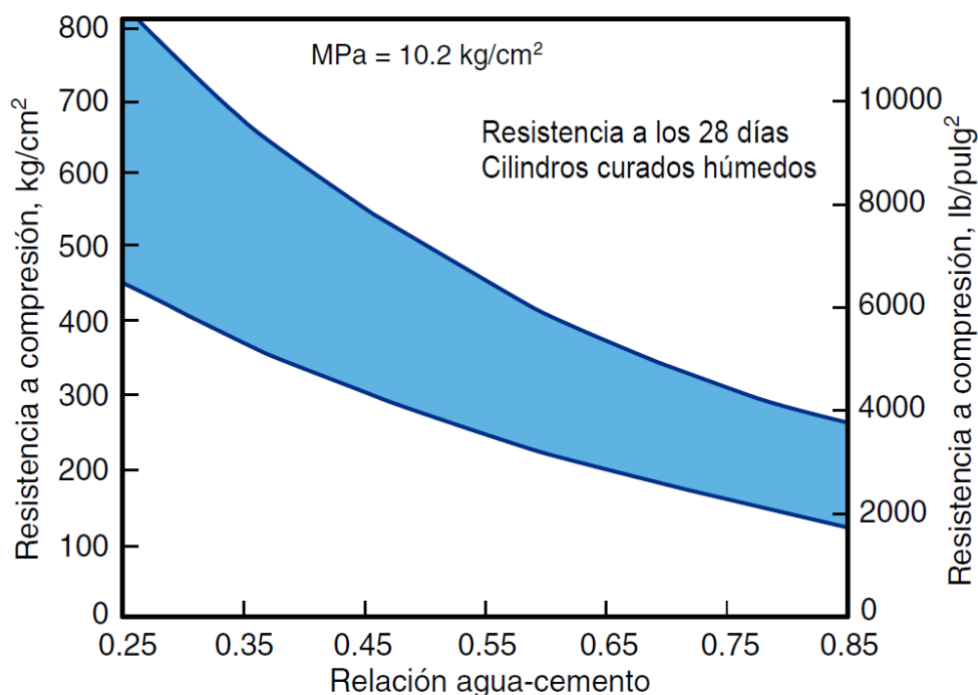


Figura 7. Resistencias típicas para relaciones agua cemento de concreto de cemento portland, (KOSMATKA, 2004) .

Para el amasado y el curado se recomienda el uso de agua que no afecte las propiedades del hormigón ni la protección de las armaduras contra la corrosión. (MEDINA, 2008)

1.3.3. ADITIVOS.

Son productos químicos naturales o manufacturados, que se adicionan al hormigón o al mortero antes de o durante su mezcla. El objetivo de utilizar un aditivo es producir una mejora en la mezcla que no se puede obtener mediante el ajuste de la proporción de la mezcla básica, sin producir un efecto adverso en cualquier otra característica del hormigón.

Desde el punto de vista funcional, se puede citar algunas de las razones para usar aditivos, de acuerdo a Sánchez (SANCHEZ, 2001): Aumentar la trabajabilidad, la resistencia, el desarrollo de resistencia a edades tempranas, la durabilidad, la adherencia entre el concreto y el acero así como la adherencia entre concreto viejo y nuevo; modificar el tiempo del fraguado inicial, la velocidad y/o aptitud de exudación; retardar o reducir el desarrollo de calor; controlar la expansión por reacción de los álcalis; reducir el flujo capilar de agua, inhibir la corrosión, reducción de costos, entre otros.

La norma ASTM C-494, "Especificación estándar para aditivos químicos para concreto" (ASTM C494, 2019), clasifica a los aditivos químicos para cemento hidráulico, en 8 tipos:

- Tipo A, aditivos reductores de agua.
- Tipo B, aditivos retardantes.
- Tipo C, aditivos acelerantes.
- Tipo D, aditivos reductores de agua y retardantes.
- Tipo E, aditivos reductores de agua y acelerantes.
- Tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.
- Tipo C, aditivos reductores de agua de alto rango y retardantes.
- Tipo S, aditivos de desempeño específico.

1.3.3.1. INHIBIDORES DE CORROSIÓN.

Los aditivos inhibidores de corrosión son productos químicos que se adicionan al hormigón en el momento de la dosificación o en reparaciones de obras existentes, corresponden al tipo S de la norma ASTM C-494, es decir son aditivos de desempeño específico.

Interactúan con el acero de refuerzo embebido en el concreto para protegerlo contra el ataque químico por agua y otros contaminantes. Este aditivo se recomienda para todo tipo de concreto postensado o preesforzado.

Los inhibidores pueden aplicarse a cualquier sistema que sufre corrosión. Existe un gran número de sustancias capaces de actuar como inhibidores.

En el presente trabajo fue empleado un inhibidor de corrosión a base de carboxilato de amina. La dosis recomendada y utilizada fue de 0,6 Kg/m³ de inhibidor respecto a la mezcla de hormigón.

Entre las ventajas presentadas por su fabricante se pueden mencionar las siguientes: baja toxicidad, uso seguro para el medio ambiente, no afecta las propiedades del hormigón ni el asentamiento o tiempo de fraguado. Está recomendado para la construcción o reparación de edificios, puentes, túneles, muelles, represas, plataformas, estructuras marinas, malecones, embarcaderos, pilares, pilotes, elementos pre-fabricados, carreteras, cubiertas de parqueaderos, entre otras estructuras. Se indica que utilizado en la fase constructiva puede retrasar hasta en un 300% el inicio de la corrosión y reducir posteriormente la tasa de corrosión del acero de refuerzo y además provee alta protección contra la salinidad, humedad y carbonatación. (CORTEC, 2021)

1.3.4. ACERO DE REFUERZO.

El acero de refuerzo o armadura forma parte integral del hormigón armado, convirtiéndose en un material compuesto. El concreto soporta los esfuerzos de compresión y el acero de refuerzo permite soportar los esfuerzos de tracción. (LAMUS, 2015)

Para su uso en el hormigón armado, las armaduras se pueden clasificar en cinco grupos: Perfiles, barras, cables, mallas y fibras. (PÁEZ, 1986)

En la construcción de las probetas empleadas en el presente trabajo, se utilizaron varillas soldables de hierro corrugado de 10 mm de diámetro, de manufactura ecuatoriana. La varilla de construcción, se fabrica bajo la norma NTE INEN 102:2003 "Varillas con resaltes de acero al carbono, laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos", ASTM A615/A615M-13 "Especificación normalizada para barras de acero al carbono lisas y corrugadas para refuerzo de concreto". Es elaborada mediante un proceso de laminación en caliente, formando una barra redonda con corrugaciones inclinadas a 55° que proporcionan una firme adherencia mecánica con el hormigón.

Las especificaciones técnicas de las varillas son las siguientes:

- Acero norma NTE INEN 102 grado A42 o equivalente a ASTM A 615 GRADO 60.
- Límite de Fluencia Mínimo: 4200 Kg/cm².
- Resistencia a la Tracción Mínima: 6300 Kg/cm².

1.4. LA DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO.

Según el Instituto Americano del Concreto ACI en su "Guía para la durabilidad del hormigón" (ACI 201.2R-01), "la durabilidad del hormigón de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro".

La durabilidad del hormigón ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, pues conlleva un análisis conjunto entre economía y seguridad. El deterioro de las estructuras provoca pérdidas en las inversiones y en los casos en que aún sea posible la recuperación, se generan gastos en mantenimiento y reparación. Si las estructuras no fueron diseñadas o construidas teniendo en cuenta su durabilidad, pueden verse afectadas en su nivel de servicio, llegando incluso a provocar accidentes y pérdidas humanas.

La ACI (ACI 201.2R-16) indica que, aunque se cumpla correctamente con todas las etapas desde el diseño hasta el curado, las condiciones de su entorno pueden producir el deterioro del hormigón: "Los mecanismos de deterioro son de naturaleza química o física y pueden originarse dentro del hormigón o pueden ser el resultado de la exposición ambiental externa".

La corrosión de las armaduras es una de las formas más comunes de daño del hormigón. Los contaminantes capaces de producir la corrosión pueden estar presentes en los materiales utilizados para su fabricación, o ingresar a través de una red de poros inadecuada (por fallas en la relación agua cemento, problemas durante el fraguado, etc), o por la exposición a un medio ambiente agresivo no considerado en el diseño.

1.4.1. LA CORROSION EN EL HORMIGON ARMADO.

El acero aporta la resistencia a la tracción necesaria en el hormigón estructural, evitando las fallas de las estructuras que están sujetas a esfuerzos de tensión y flexión por factores tales como el tráfico, los vientos, las cargas muertas y los ciclos térmicos. Al corroerse el refuerzo, el óxido causa pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón, produciéndose delaminación y exfoliación. (NRMCA CIP 25, 2008)

La corrosión del acero implica la pérdida progresiva de átomos de hierro cuya disolución se forma en el agua de los poros del hormigón que lo rodea. Si el acero de refuerzo pierde masa, su sección transversal disminuye y la tensión soportada por esta nueva sección transversal aumentará, pudiendo provocar la falla de la estructura. Los iones ferrosos de la solución de poros pueden reaccionar con iones hidróxido y con las moléculas de oxígeno disuelto para formar óxidos de hierro, que pueden generar tensiones expansivas y agrietar el hormigón. (BENTUR, 1997)

Según la norma ASTM G15-08, la corrosión se define como el deterioro de un material, usualmente un metal, como resultado de la reacción química o electroquímica con su medio ambiente. La corrosión del acero en el hormigón es un fenómeno electroquímico. Los potenciales electroquímicos pueden generarse como pilas de composición, al colocar dos metales diferentes dentro del hormigón armado; y como pilas de concentración, por diferencias en la concentración de las especies disueltas cerca del acero. (BERMUDEZ, 2007)

Usualmente el acero en el concreto se encuentra en condición pasiva. El mecanismo de pilas electroquímicas permite que se destruya la capa pasivante y se produzca el ataque del metal bajo ciertas condiciones. Los principales procesos que

deterioran el concreto dependen de alguna sustancia que se encuentre dentro de la masa o que penetre desde el exterior a través de su superficie.

Los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune. El diagrama de Pourbaix que representa las condiciones del hierro-agua a 25°C se muestra en la figura 8. El área sombreada en rojo muestra la región de pH y potencial del acero embebido en un concreto no expuesto a influencias externas, el cual generalmente se encuentre con un pH entre 12,5 y 13,5. (POURSAEE, 2016)

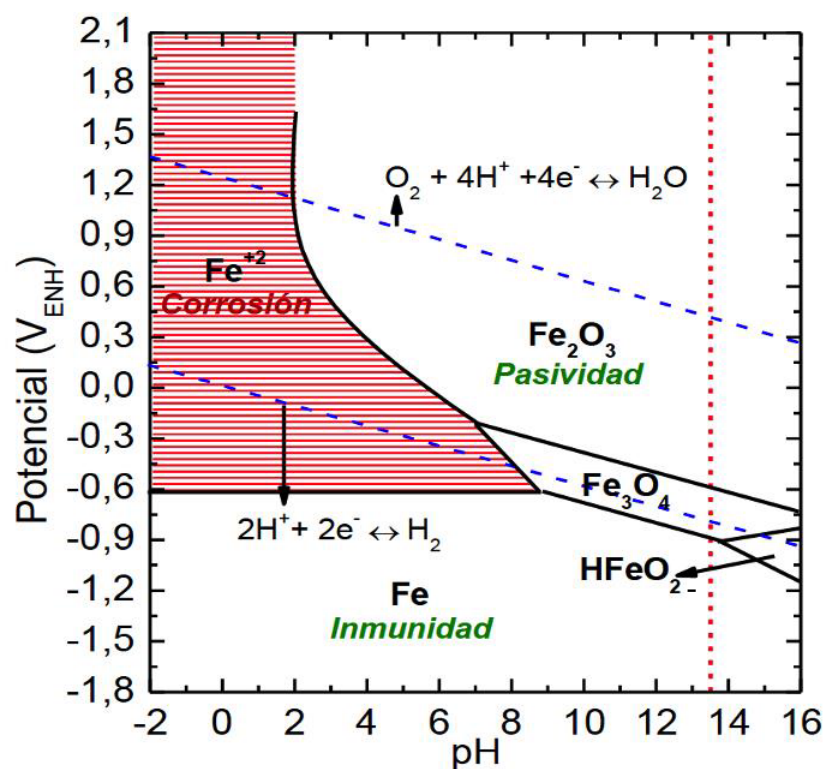


Figura 8. Diagrama de Pourbaix hierro-agua a 25°C y condiciones del acero embebido en concreto, (TORRES,2020).

La zonificación de este diagrama de Pourbaix se describe a continuación:

- Zona de corrosión generalizada.

- Zona de pasividad del acero. La protección de que éste goza puede ser eliminada por la existencia de cloruros, que, al destruir la capa de pasivación, originan la corrosión localizada por picaduras.
- Zona de inmunidad (Fe que no pasa a estado iónico).
- Zona de pasividad por formación de Fe_3O_4 , u otra especie pasivante.

1.4.2. TIPOS DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO.

A partir de la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: generalizada y localizada. En la figura 9 se muestra esquemáticamente cómo se producen y actúan las diferentes formas de corrosión en el acero de refuerzo embebido en hormigón.

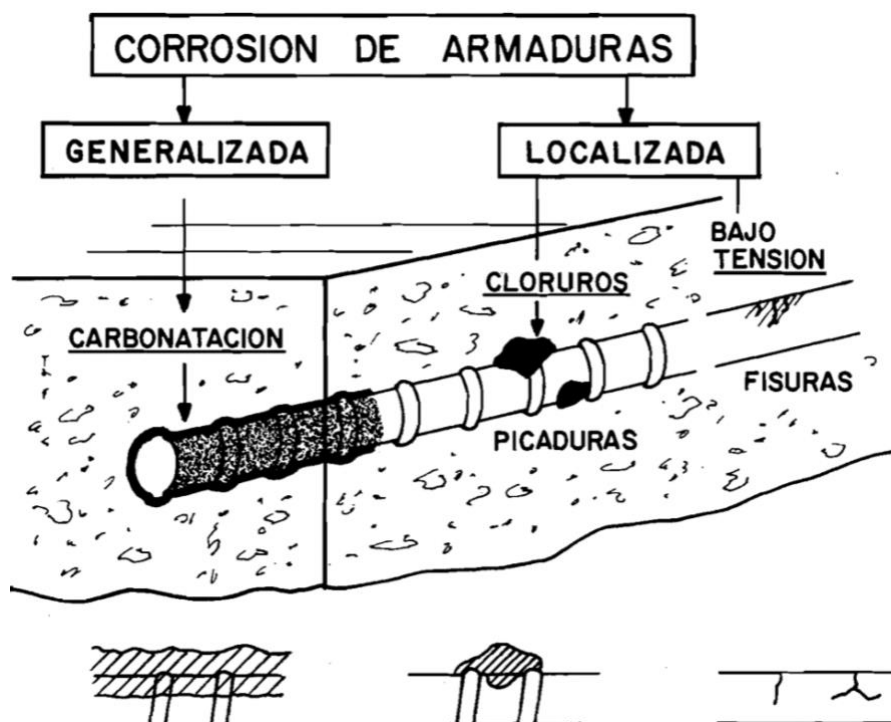


Figura 9. Tipos de corrosión de armaduras y factores que los provocan, (ANDRADE, 1989).

La corrosión de tipo localizado es provocada por la existencia de iones despasivantes. La corrosión generalizada ocurre por la reducción del pH, lo que ocasiona la disolución de la capa pasivante (GARCÉS, 2008). La corrosión de tipo galvánica se produce cuando existen diferencias de potencial entre metales conectados eléctricamente en una solución electrolítica y se corroe el metal con mayor electronegatividad. (BLANCO, 2019)

Formas de Corrosión localizada

Corrosión por picaduras:

- Disolución localizada de la película pasiva.
- Iones cloruro del medio ambiente, o incorporados en la masa de hormigón.
- Las picaduras son autocatalíticas, generando las condiciones para su desarrollo.
- Las zonas que mantienen película pasiva actúan como cátodo, reduciendo oxígeno.
- Zonas que pierden película pasivante, caracterizadas por elevadas densidades de corriente de corrosión, actúan como ánodo.
- Se produce ácido por hidrólisis del Fe^{++} en el ánodo, formando H^+ y atrayendo Cl^- libre y baja el pH local.

Corrosión en espacios confinados:

- Al quedar zonas del metal con recubrimientos no homogéneos, es posible que se produzcan celdas diferenciales de oxígeno. Ejemplo: acero de refuerzo con revestimientos deteriorados.

Corrosión bajo tensión:

- Cuando se producen esfuerzos de tracción en un medio agresivo sobre el acero.

- Generalmente se asocia a mala calidad del hormigón armado, presencia de determinados iones, de manera preferente en hormigón pre o postensado, con aceros de alta resistencia y existencia de hidrógeno atómico a través del metal.
- También se produce fragilización por hidrógeno.

Corrosión por corrientes de interferencia, parásitas o vagabundas:

- Se produce cuando existe un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico.
- La corriente continua tiene un mayor efecto, pues fluye continuamente en un solo sentido.
- Las fuentes más comunes de corrientes de interferencia son: sistemas de protección catódica cercanos a la estructura de hormigón armado y sistemas con potencia eléctrica (trenes eléctricos, máquinas de soldar), corrientes telúricas, etc.
- En hormigón armado no contaminado por cloruros, estas corrientes no producirían corrosión del refuerzo; pero en presencia de cloruros, la corrosión se acelera drásticamente.

Corrosión uniforme o generalizada: Pérdida generalizada de la película pasiva. Provocada por carbonatación del hormigón armado o excesiva cantidad de iones cloruro.

Corrosión galvánica: Cuando existen dos metales o aleaciones de metales diferentes conectados eléctricamente en el medio electrolítico, el metal más noble (de acuerdo a la serie galvánica o serie electropotencial) se convierte en ánodo y es protegido por el metal menos noble que se transforma en cátodo. En general se asocia al funcionamiento de macroceldas; zonas del acero de refuerzo dañadas o sin formación de película pasiva podrían actuar como ánodos frente al resto del material, por

ejemplo cuando las varillas cercanas a la superficie se corroen y las zonas internas continúan pasivas.

1.4.3. MECANISMOS DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS.

El hormigón proporciona protección de tipo electroquímico, termodinámico y físico, al ser una barrera contra la difusión de elementos agresivos provenientes del exterior hasta la superficie de las armaduras. La carbonatación y los cloruros libres en el hormigón, pueden ocasionar que las armaduras cambien del estado pasivo al estado activo. Estos dos factores actúan como desencadenantes o acelerantes para destruir la pasividad de las armaduras del hormigón, gobernando la cinética de corrosión, como se muestra en la figura 10. (GONZÁLEZ, 2007)

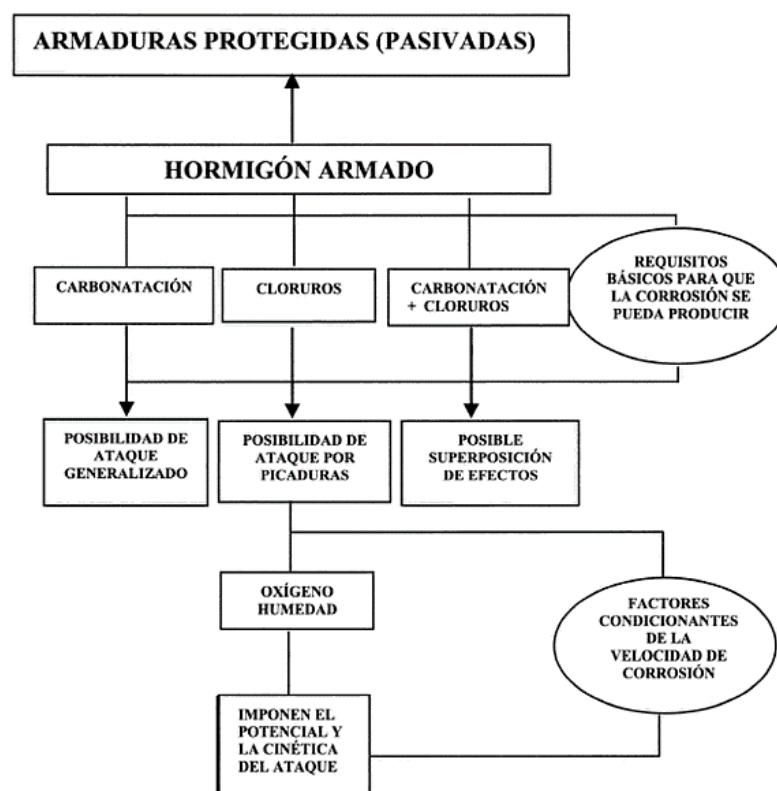
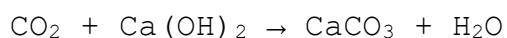


Figura 10. Esquema de posibilidades de corrosión del acero en el hormigón y factores que regulan su velocidad, (GONZÁLEZ, 2007) .

Los parámetros termodinámicos permiten obtener información acerca del estado energético de un sistema electroquímico y la susceptibilidad de que se produzca la corrosión. Los parámetros cinéticos, observan los mecanismos presentes en la corrosión metálica y su evolución en el tiempo. Es muy importante la medición de ambos tipos de parámetros en estructuras de hormigón armado, para establecer diagnósticos sobre el proceso de corrosión en las armaduras de acero e implementar acciones para su protección y/o rehabilitación. (DEL VALLE, 2001)

Carbonatación: Es la reducción de la alcalinidad por lixiviación o neutralización por dióxido de carbono u otro material ácido. La carbonatación es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del hormigón:



Esta reacción solo ocurre en presencia de agua. Como resultado, el pH del hormigón carbonatado se reduce a valores menores que 9, lo que sitúa al acero dentro de la zona I de corrosión, y fuera de la zona de pasividad. Con la reducción del pH la capa protectora de óxidos (estado pasivo) ya no será termodinámicamente estable y perderá su carácter protector. Una vez que el frente carbonatado alcanza la armadura comienza la disolución de la película pasiva que protege el acero de la corrosión.

El proceso de carbonatación con CO₂ del aire, depende “de la humedad relativa del ambiente, la temperatura, la permeabilidad del hormigón y la concentración de CO₂”. (ACI 201.2R-01)

La mayor velocidad de carbonatación se produce para una humedad relativa entre el 50 al 60% (a una temperatura $t=25^{\circ}\text{C}$), ya que si es menor no hay suficiente agua, y si es mayor, el agua contenida en los poros reduce la velocidad de difusión del dióxido de carbono en el hormigón (YORIS, 2010). Otros factores que influyen en la velocidad de carbonatación son el tipo de cemento (con o sin adiciones), el contenido de cemento y la porosidad del árido. (BERMÚDEZ, 2007)

En la figura 11, se muestra fotos de una columna y una viga de hormigón con las varillas de refuerzo expuestas. Posteriormente se comprobó daños por carbonatación. Estas imágenes fueron captadas durante la inspección preliminar a la evaluación del desempeño del edificio de Ministerio de Agricultura de Guayaquil, el cual fue posteriormente demolido.



Figura 11. Acero de refuerzo expuesto en columna y viga de hormigón con daños por carbonatación, en la ciudad de Guayaquil. Fuente: Autor.

Acción electroquímica del ión cloruro en presencia de oxígeno:
La corrosión es causada por la presencia en la superficie del acero de una concentración de iones cloruro superior a la concentración crítica.

En el hormigón, estos iones ocasionan la corrosión por picaduras de las armaduras. Los iones cloruro pueden encontrarse en los elementos de la mezcla del hormigón (agua, agregados, aditivos), provenir de las sales de deshielo o por la exposición al agua de mar. (GONZÁLEZ, 2007)

El acero se corroe cuando se produce la reacción anódica de disolución como ion ferroso con una reacción catódica simultánea (reducción de oxígeno) en presencia de agua. Este complejo proceso de corrosión se muestra esquematizado en sus diferentes etapas en la figura 12.

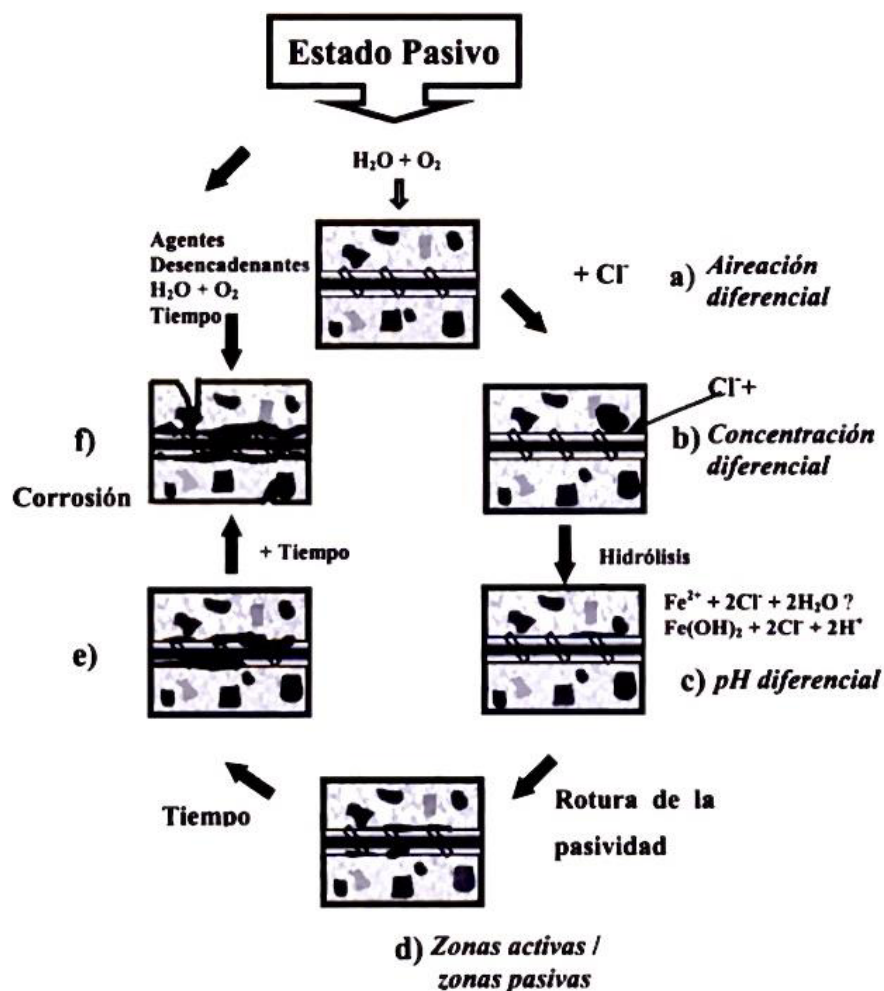


Figura 12. Esquema idealizado del mecanismo de corrosión en estructuras de hormigón armado, contaminadas de cloruros y con suficiente aporte de oxígeno, (GONZÁLEZ, 2007).

- a) Formación de celdas de aireación diferencial en los resquicios.
- b) Enriquecimiento progresivo de los resquicios en Fe^{2+} y Cl^- .
- c) Disminución del contenido de oxígeno disuelto en los resquicios y progresiva acidificación de estos por hidrólisis.
- d) Iniciación de las picaduras por la rotura de las capas pasivantes en los resquicios.
- e) Propagación de las picaduras, incluso sin el concurso del oxígeno, con la reducción de protones como semirreacción parcial catódica del proceso de corrosión.
- f) Con el transcurso del tiempo la propagación de la corrosión se convierte de local en generalizada.

La pérdida del estado pasivo, siempre que la oferta de oxígeno y humedad sea alta, conlleva el paso desde un riesgo despreciable a uno inadmisibles.

Hay que considerar el fenómeno que se produce de las estructuras marinas sumergidas pero que se encuentran en la denominada zona de salpicadura, las cuales se ven afectadas por los ciclos de mojado y secado producto de los vientos y los cambios en las mareas, lo que ocasiona que la zona se encuentre mojada continuamente por agua de mar y a la vez con alto nivel de aireación, apreciándose en esta zona la máxima velocidad de corrosión.

De acuerdo con González (GONZÁLEZ,2007), la corrosión en el hormigón contaminado por cloruros se produce bajo la presencia de los siguientes factores:

- Singularidades geométricas en la interfase metal/medio.

- Oxígeno disuelto en la solución saturada de Ca(OH)_2 o en la fase acuosa del hormigón, que generan pilas de aireación diferencial en las singularidades geométricas.
- Cloruros en el medio, que lleguen a estabilizar un pH mucho más ácido en el defecto y logren garantizar la conservación del estado activo en su interior.

1.4.4. MODELO DE VIDA ÚTIL DEL HORMIGÓN.

La durabilidad de las construcciones de concreto reforzado es un tema de gran importancia en el aspecto económico, pero sobre todo por la seguridad que estas estructuras puedan brindar durante su vida de servicio. La norma EHE-08 ofrece valores de vida útil nominal según el tipo de estructura, como se detalla en la tabla 8.

Tabla 8. Vida útil en función el tipo de estructura, según EHE-08.

Tipo de Estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal	3-10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyos de tuberías)	10-25 años
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas	15-50 años
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

Existen varias teorías y modelos para predecir la vida útil de diseño y la vida residual de servicio de las estructuras de hormigón armado. Uno de los modelos más empleados es el de Tuutti, el cual fue específicamente desarrollado para el caso de corrosión de armaduras. Este modelo establece dos periodos en una representación esquemática de vida útil, indicando los principales factores que afectan a cada periodo, de acuerdo con esquema de la figura 13. (DURAR, 1997)

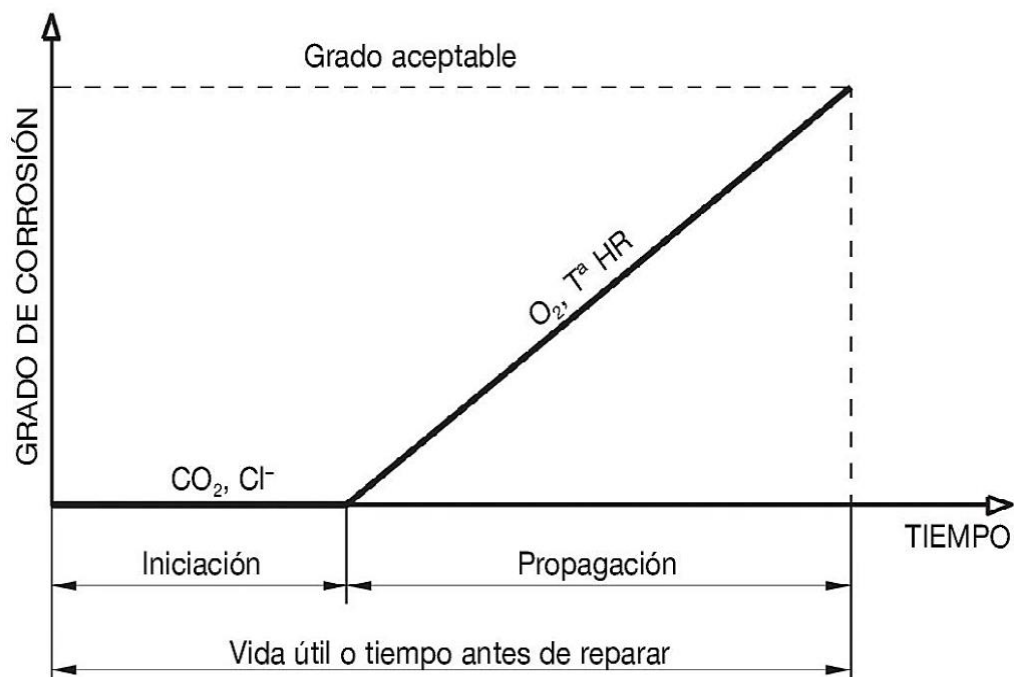


Figura 13. Modelo de vida útil de Tuutti, (DURAR, 1997).

Periodo de iniciación de la corrosión: Tiempo que tardan los procesos difusivos de los iones cloruro (Cl^-) o la carbonatación (CO_2 atmosférico) en llegar hasta la armadura y despasivarla.

Periodo de propagación: La armadura se corroe libremente, hasta que alcanza un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad y funcionalidad o estética. Este periodo está determinado por la velocidad de corrosión de la armadura, la cual está relacionada con la pendiente de la recta en la zona

de propagación y pueden verse involucrados los mecanismos de protección que se hayan utilizado. Algunos de los factores de mayor influencia en esta etapa son el ingreso de oxígeno (O_2), las condiciones climáticas como la temperatura ambiente (T^a), la humedad relativa (HR), los tiempos de humectación y secado, así como la porosidad del hormigón, el espesor de la capa de recubrimiento y la composición química de la solución de poro alrededor del acero. (TUUTTI, 1982)

Los valores límites de deterioro dependerán de los criterios que se definan en cada proyecto en particular, generalmente en función de una reducción admisible de la sección transversal de la armadura. Los factores para considerar son múltiples: tipo de elemento estructural (viga, pilar, etc.), consideraciones estéticas, riesgo de desprendimiento de trozos de hormigón que puedan dañar a las personas, entre otros. Se define entonces como **vida útil o tiempo antes de reparar**, al periodo de iniciación más el de propagación; y como **vida residual**, desde que finaliza el límite aceptable y resulta necesaria la reparación de la estructura para restituir las condiciones de seguridad, funcionalidad o estética, similares o superiores a las del proyecto. Por lo tanto, se denomina vida útil mientras la estructura no sea intervenida, aunque se esté degradando progresivamente a una determinada velocidad.

Por sus características favorables, su extensiva utilización y fácil adquisición en el mercado ecuatoriano, en el presente trabajo se han evaluado las propiedades del hormigón de cemento puzolánico y su efecto sobre la corrosión del acero utilizado como refuerzo.

Para determinar la velocidad de corrosión de armaduras de acero embebidas en hormigón de cemento puzolánico, se ha optado por aplicar técnicas electroquímicas, ampliamente utilizadas en la

investigación de estos fenómenos, y de esta manera predecir el comportamiento e influencia en la vida útil de estructuras fabricadas con estos materiales.

CAPITULO II:

TECNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGON EN ATMOSFERAS AGRESIVAS.

Existen diferentes técnicas que se pueden emplear para la evaluación de la durabilidad de las estructuras de hormigón, algunas de las cuales ya han sido validadas y estandarizadas a nivel internacional. Pero debido a que los factores relacionados con el tema son diversos, aún no se puede afirmar que se dispone de criterios definitivos; sin embargo, se ha llegado a consensos de validez para rangos y límites de parámetros que permiten evaluar y predecir tendencias y comportamientos bajo ciertas condiciones.

Para desarrollar el presente trabajo de evaluación, se han seleccionado aquellos parámetros que se pueden analizar con la infraestructura existente a la fecha ejecución en el Laboratorio de Corrosión de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, y con el uso de los equipos y facilidades prestadas por el Centro Técnico del Hormigón de HOLCIM Ecuador. Los factores para evaluar y ensayos a realizar, son los siguientes:

- Tipo de cemento y diseño de la mezcla del hormigón.
- Geometría y dimensiones de los elementos.
- Proceso de fabricación y curado.
- La clase de exposición a las que se someterá las probetas.
- Periodo de pruebas y frecuencia de los ensayos.
- Ensayos:
 - o Resistencia Mecánica de la mezcla
 - o Resistencia y Resistividad eléctricas.

- o Monitoreo de Potencial de Corrosión.
- o Medición de Resistencia a la Polarización y con ello la velocidad de corrosión.
- o Difusión de contaminantes: Carbonatación y contenido de cloruros.

El objetivo será determinar el comportamiento de las probetas de hormigón de cemento puzolánico bajo condiciones específicas y predecir las tendencias de las curvas de vida útil y deterioro.

2.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN.

2.1.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN.

Los factores que influyen en el diseño de las mezclas varían de acuerdo con el servicio que prestará la estructura. En estado fresco, la mezcla debe cumplir requisitos de trabajabilidad, consistencia, fluidez y tiempo de fragüe. En estado endurecido se aplican criterios de elasticidad; resistencia a la compresión, tracción, y flexión; durabilidad y aislamiento, entre otros.

El diseño de la mezcla de hormigón a ser evaluado fue elaborado con la colaboración del Centro Técnico del Hormigón de Holcim Ecuador, el cual ofrece asesoría técnica y realiza ensayos de calidad de mezclas de hormigón. Se utilizó un modelo de mezcla en dos versiones: una mezcla patrón y una mezcla con adición de inhibidor, como se detalla en las tablas 9 y 10.

Los elementos que conforman la mezcla del concreto son de tipo activo: cemento, agua, aditivos; y de tipo inerte: arena, piedras y aire. Antes de ser incorporados a la mezcla, cada elemento es analizado para comprobar requisitos físicos y químicos que deben cumplirse para obtener el tipo de mezcla deseado.

**Tabla 9. Diseño de Hormigón con Cemento Tipo IP -
Mezcla Patrón**

Material	Dosificación por m³	Absorción Po (%)	Humedad W (%)
Cemento IP	500 kg		
Piedra 12.5 mm	533 kg	1,69	0,302
Arena Triturada	291 kg	2,50	3,5
Arena de río	791 kg	1,83	3,5
Agua	210 kg		
Aditivo superplastificante SIKAMENT NR	1% del contenido de cemento		

**Tabla 10. Diseño de Hormigón con Cemento Tipo IP -
Mezcla con Inhibidor.**

Material	Dosificación por m³	Absorción Po (%)	Humedad W (%)
Cemento IP	500 kg		
Piedra 12.5 mm	533 kg	1,69	0,302
Arena Triturada	291 kg	2,50	3,5
Arena de río	791 kg	1,83	3,5
Agua	210 kg		
Aditivo superplastificante SIKAMENT NR	1% del contenido de cemento		
Inhibidor de corrosión MCI 2006 NS	0,6 kg / m ³		

2.1.2 PROCESO DE MEZCLA.

La preparación de materiales, proceso de mezcla y elaboración de probetas, fue realizado bajo la norma ASTM C 192-02 "Elaboración y Curado de Probetas de Concreto en Laboratorio".

Los elementos que conforman la mezcla fueron pesados en balanzas calibradas. Se midieron las condiciones ambientales del laboratorio: Humedad Relativa 81% y Temperatura ambiente: 21,5°C, así como las temperaturas de cada elemento (piedras, arenas y cemento). Adicionalmente, se determinó el porcentaje de humedad y el porcentaje de absorción de los agregados sólidos. Todo esto con el fin de considerar el incremento de masa debido al agua de los poros de los materiales y realizar correcciones en las relaciones finales agua/cemento, de ser necesario. En las figuras 14 y 15 se muestran diversos pasos del proceso de mezcla.



Figura 14. Pesaje de componentes de la mezcla. Fuente: Autor.



Figura 15. Proceso de mezcla. Fuente: Autor.

2.1.3 COLADO DE PROBETAS.

Se elaboraron 2 tipos de probetas: cúbicas y cilíndricas. Para ambos casos se utilizaron moldes estandarizados por la norma ASTM C 192/C192M-14 "Práctica estándar para elaborar y curar especímenes de concreto en el Laboratorio" y ASTM C470/470M-09 "Especificación estándar para la fabricación de moldes para encofrado vertical de cilindros hormigón para ensayos".

Los moldes fueron engrasados antes de proceder al vaciado de las mezclas. Se ejecutó el proceso de varillado y se utilizó un vibrador externo para consolidación de la mezcla en los moldes.

Se permitió el secado en moldes durante 24 horas, cubiertos con plástico para prevenir la evaporación de agua. Posteriormente se realizó el desmolde y codificación de los cilindros según el tipo de mezcla que contenían y el ensayo o ambiente al que estarían destinados. Luego, las probetas fueron sumergidas en una piscina con agua saturada con hidróxido de calcio a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para el proceso de curado hasta el momento en que estuviese programado el ensayo correspondiente. Después de cumplido el tiempo de curado en condiciones de laboratorio, las probetas fueron colocadas en cámaras acondicionadas convenientemente para semejar las condiciones de exposición requeridas.

2.1.3.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS CÚBICAS.

Se fabricaron probetas cúbicas de 100 mm por lado utilizando moldes prismáticos y una estructura de madera para soporte de los insertos metálicos que cada probeta debía contener, y además para dividir el molde de manera que se obtengan dos (2) probetas de las dimensiones requeridas (figura 16).



Figura 16. Elaboración de probetas cúbicas. Fuente: Autor.

Los insertos metálicos de cada probeta cumplen con funciones específicas durante los ensayos a realizar:

- **Electrodos de trabajo:** 2 varillas corrugadas de acero norma NTE INEN 102 grado A42, de 100 mm de longitud total y de 63,7 mm de longitud interna expuesta (delimitada por material para aislamiento eléctrico), para obtener un área de ensayo de 20 cm².
- **Contra electrodos:** 2 barras de acero inoxidable A304, de 100 mm de longitud y de 63,7 mm de longitud interna expuesta (delimitada por material para aislamiento eléctrico).

- **Electrodo de referencia:** Cinta de Titanio bajo norma ASTM B265-13ae1 (Especificación estándar para el titanio y aleaciones de titanio en tiras, hojas, y planchas), de grado 1; recubierto de una mezcla de óxidos Metálicos ($\text{IrO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$), generalmente utilizado como ánodo inerte para protección catódica. Las cintas tienen 6,35 mm de ancho y 0,635 mm de espesor, y fueron cortadas en secciones de 100 mm de largo.

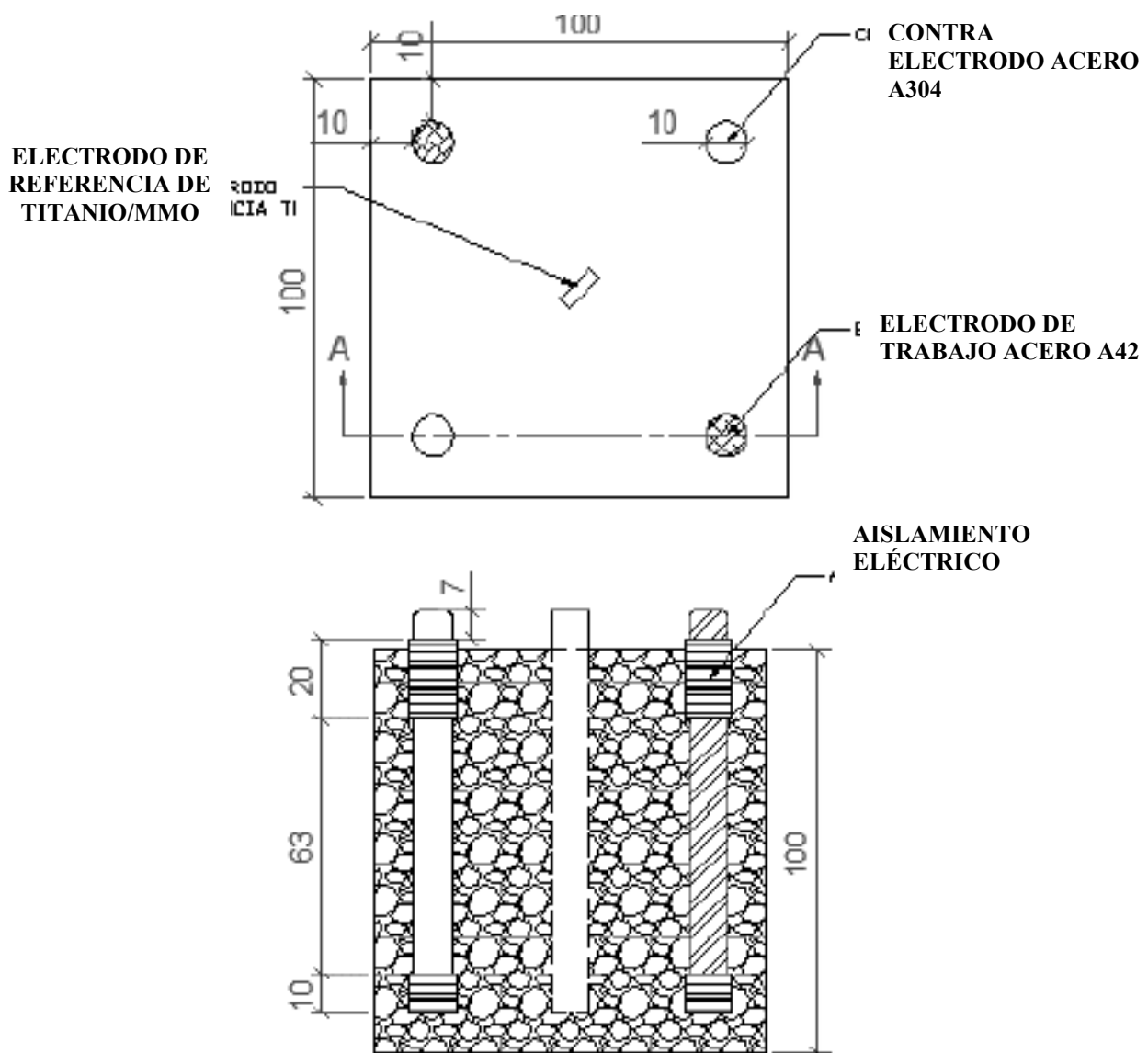


Figura 17. Distribución de elementos y dimensiones (en mm) de las probetas cúbicas, (PANCHANA, 2010).

La distribución de los elementos dentro de la probeta se muestra en la figura 17. Los electrodos de trabajo y los contra electrodos, fueron ubicados simétricamente y de manera tal que el espesor mínimo del recubrimiento con respecto a las caras externas de la probeta de hormigón sea de 10 mm. El electrodo de referencia fue insertado en el centro de la probeta.

2.1.3.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.

Se construyeron probetas de hormigón cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de longitud. Estas probetas no tuvieron insertos metálicos (figura 18) y se las elaboró para ensayos de rotura y ensayos de difusión de contaminantes, como se detallará más adelante.



Figura 18. Elaboración de las probetas cilíndricas. Fuente: Autor.

2.2 DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS Y CONDICIONES DE EXPOSICIÓN.

Previo a la elaboración de las probetas, se proyectó un plan de trabajo detallando las mediciones requeridas, las fechas en que se deberían realizar y la cantidad y el tipo de probetas necesarias para cada tipo de análisis. En las tablas 11, 12 y 13 se indica la distribución de probetas.

Tabla 11. Probetas cilíndricas para ensayos de rotura.

TIEMPO DE CURADO (días)	TIPO DE MEZCLA		CANTIDAD DE PROBETAS (cantidad)
	Mezcla patrón sin inhibidor (cantidad)	Mezcla con inhibidor (cantidad)	
7 DÍAS	2	2	4
14 DÍAS	2	2	4
28 DÍAS	2	2	4
TOTAL PROBETAS	6	6	12

Tabla 12. Probetas cúbicas para ensayos de cinética de la corrosión.

MEDIO DE ENSAYO	TIPO DE MEZCLA		CANTIDAD DE PROBETAS (cantidad)
	Mezcla patrón sin inhibidor (cantidad)	Mezcla con inhibidor (cantidad)	
CARBONATACIÓN	2	2	4
AGUA SALADA	2	2	4
AMBIENTE EXTERNO	2	2	4
TOTAL PROBETAS	6	6	12

Tabla 13. Probetas cilíndricas para ensayos de difusión de contaminantes.

MEDIO DE ENSAYO	CANTIDAD DE PROBETAS
	Mezcla patrón sin inhibidor (cantidad)
CARBONATACIÓN	4
AGUA SALADA	4
AMBIENTE EXTERNO	4
TOTAL PROBETAS	12

Los ensayos de cinética de corrosión y de difusión se realizaron con probetas expuestas a los contaminantes más frecuentes y que además suelen ser los que causan mayor afectación por corrosión.

El periodo de evaluación de las probetas fue de 1 año. Durante este periodo se mantuvieron expuestas a los diferentes ambientes, los que serán descritos a continuación.

2.2.1 EXPOSICIÓN EN ATMÓSFERA NATURAL DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.

Guayaquil se encuentra en la región Litoral o Costa del Ecuador, al noroeste de América de Sur, como se puede apreciar en la Figura 19.

Tiene dos estaciones: Una temporada conocida como invierno, lluviosa, húmeda y con calor tropical, entre diciembre y abril; y otra temporada llamada verano, seco y más fresca desde mayo a diciembre. La mayor cantidad de precipitación anual se produce en el invierno. La temperatura promedio varía entre los 20° y 32° C.

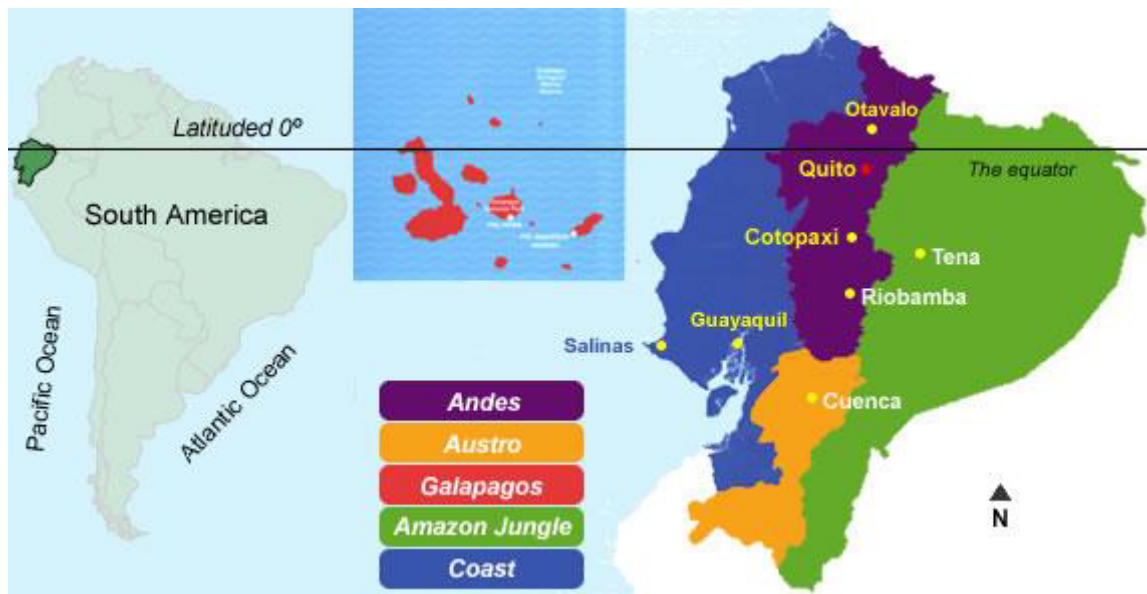


Figura 19. Ubicación de la Ciudad de Guayaquil respecto a la Línea Ecuatorial, (IMAGUI, 2017).

En las figuras 20, 21, 22 y 23 se muestran valores promedio mensuales de variables climáticas de la ciudad de Guayaquil: Temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento.

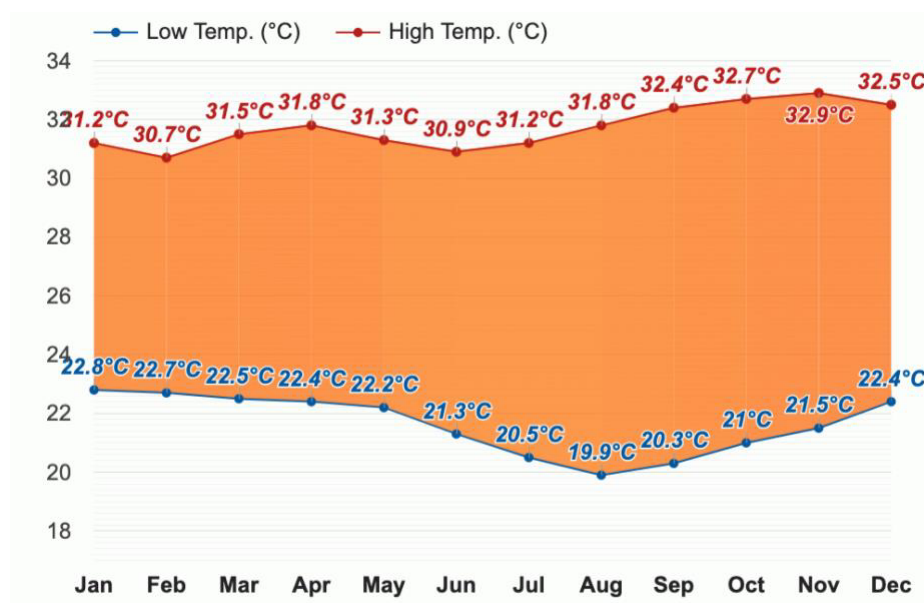


Figura 20. Temperatura promedio mensual en Guayaquil, (WEATHER ATLAS, 2021).

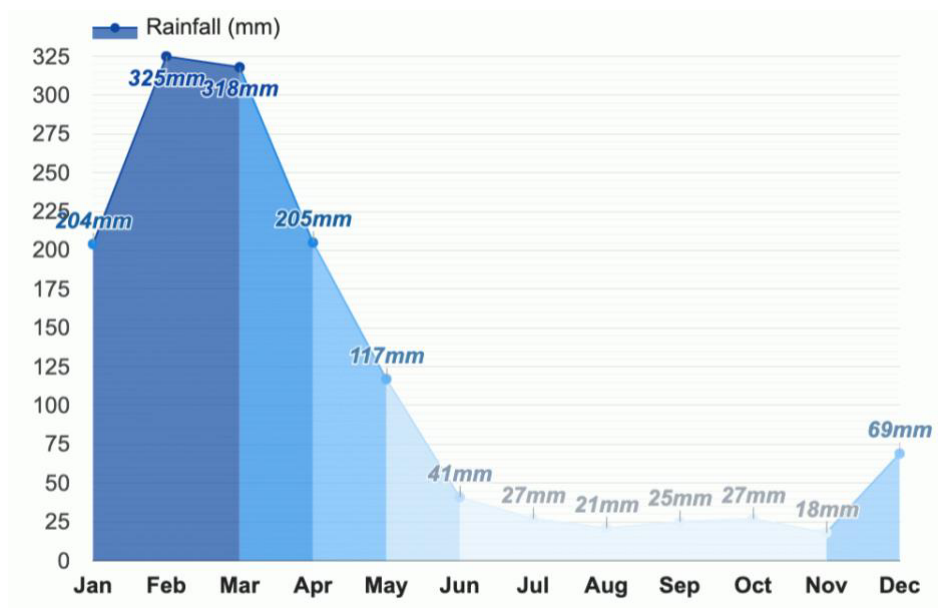


Figura 21. Precipitación promedio mensual en Guayaquil, (WEATHER ATLAS, 2021) .

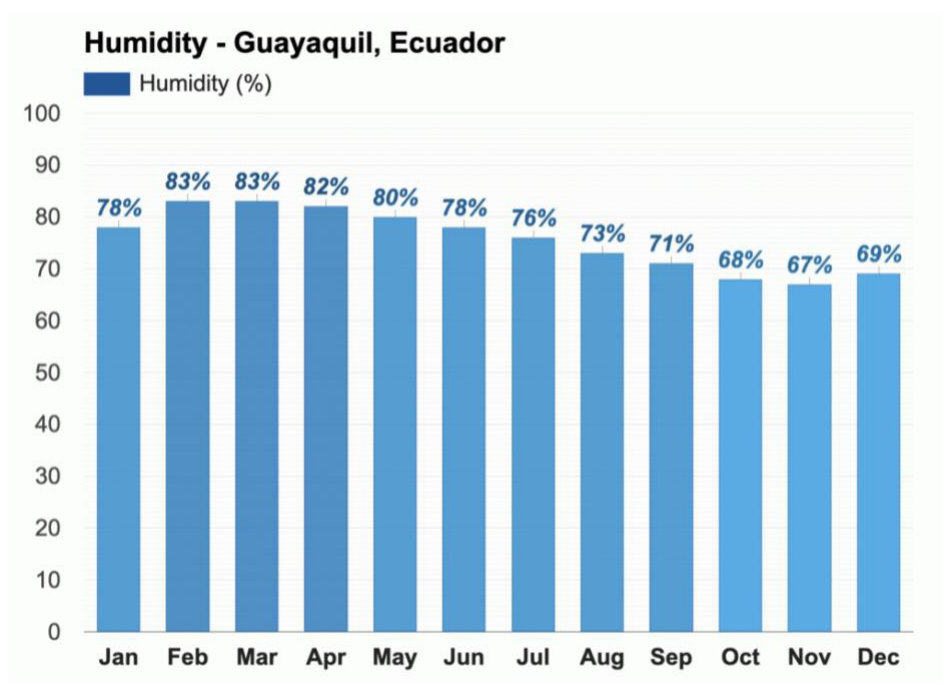


Figura 22. Humedad relativa promedio mensual en Guayaquil, (WEATHER ATLAS, 2021) .

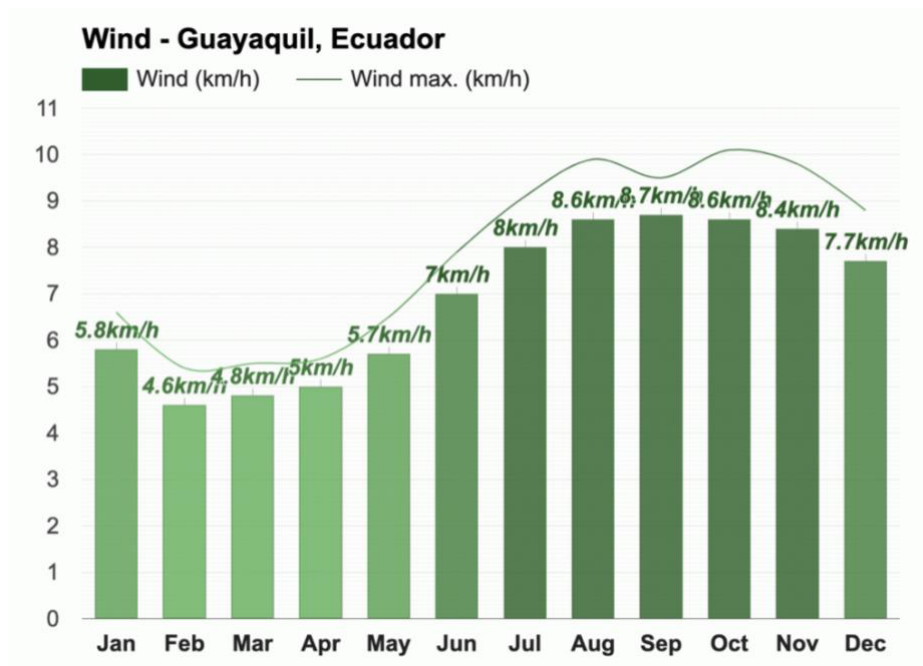


Figura 23. Velocidad del viento promedio mensual en Guayaquil, (WEATHER ATLAS, 2021) .

2.2.2 EXPOSICIÓN A DIÓXIDO DE CARBONO.

Con el objetivo de mantener una atmósfera con dióxido de carbono, se construyó una cámara hermética que garantice el suministro del dióxido de carbono y mantenga una humedad relativa entre el 50 y 60% a una temperatura de 25°C.

Como cámara contenedora (figura 24), se utilizó una caja de poliestireno, el cual es un material liviano, capaz de resistir la presión interna del sistema sin sufrir deformaciones.

La cámara se mantuvo sellada y ligeramente presurizada (presión positiva), con un suministro constante y monitoreado de dióxido de carbono puro, alimentado con un tanque de 20 kg.

Se construyó un sistema de distribución con manguera neumática (10 Bar); y se utilizó un manómetro con regulador para mantener constante la presión del gas en el contenedor.



Figura 24. Cámara de carbonatación. Fuente: Autor.

Dentro de la cámara se colocaron dos recipientes con una solución de 500 ml de nitrato de magnesio hexahidratado, con la finalidad de mantener la humedad relativa requerida para que se produzca el proceso de carbonatación. Se utilizó nitrato de magnesio hexahidratado, de grado analítico, el cual se encuentra en forma sólida (granulada) y tiene una solubilidad de 420 g/l a 20°C. (MERCK, 2021)

De acuerdo con Greenspan (GREENSPAN, 1977), el uso de soluciones binarias saturadas, con solutos no volátiles, constituye un método simple y económico de control de humedad relativa a una temperatura dada. Al preparar una solución saturada, siempre resultará fácil determinar si existe saturación, lo que permite conocer cuándo debe renovarse la solución.

Un grupo de probetas cilíndricas para ensayos de difusión y otro grupo de probetas cúbicas, fueron colocadas en esta cámara, bajo las condiciones especificadas.

2.2.3 EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN POR CLORUROS.

Para estudiar la contaminación por cloruros, se manejó por separado a las probetas cilíndricas de difusión de contaminantes y a las probetas cúbicas de ensayos de velocidad de corrosión.

Para las probetas cúbicas, se utilizó un recipiente contenedor, con una solución en agua destilada 3,5% m/m de cloruro de sodio (sal de grado analítico). El nivel de inmersión se mantuvo constante, durante todo el ciclo de pruebas, sumergiendo 8 cm de la probeta y dejando libres los 2 cm superiores y las barras de prueba (figura 25).



Figura 25. Probetas cúbicas en inmersión en solución de NaCl.

Fuente: Autor.

Las probetas cilíndricas que se utilizaron para ensayos de difusión del cloruro de sodio recibieron un tratamiento diferente. El objetivo fue promover la difusión de los contaminantes verticalmente de arriba hacia abajo, y luego medir el avance de los iones de cloruro durante el periodo de exposición, de acuerdo con los lineamientos de la norma AASHTO T-259.

Se utilizó pintura de látex para cubrir la superficie lateral de estas probetas cilíndricas, así como un anillo externo en la cara superior, como se puede observar en la figura 26; con la finalidad de focalizar el flujo en la parte central de la probeta. La parte superior de la probeta fue adosada a una sección de tubería de PVC, que serviría de contenedor de la solución de cloruro de sodio al 3,5%. Los bordes de la unión fueron sellados con silicona, para evitar las fugas en lo posible. Durante el periodo de evaluación, se mantuvo un nivel constante de solución de 3 cm.

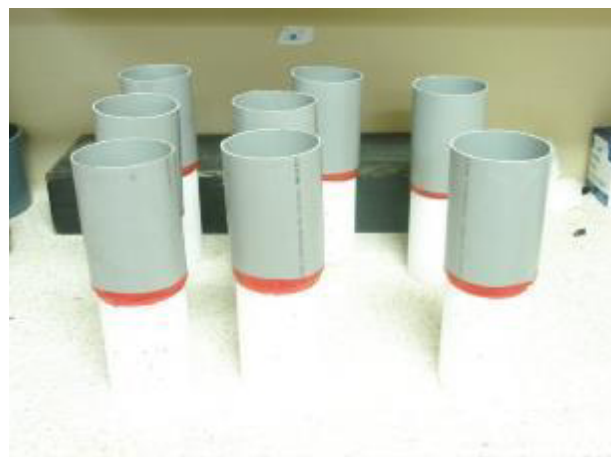


Figura 26. Probetas cilíndricas en proceso de difusión de solución de NaCl. Fuente: Autor.

2.3 TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.

2.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Las mezclas de cemento deben cumplir los requerimientos proyectados por el diseñador y los indicados por el fabricante; la resistencia a la compresión del concreto es un criterio comúnmente empleado para diseño de edificios y otras estructuras.

La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión (figura 27); y se calcula a partir de la carga de rotura dividida para el área de la sección que resiste la carga. Estos ensayos se realizan bajo la norma ASTM C 39/C39M-14a "Método estándar de Prueba de resistencia a la Compresión de Probetas Cilíndricas de Concreto".



Figura 27. Banco de pruebas para ensayos de rotura. Fuente: Autor.

Para cada "edad" se ensayaron 2 probetas, según la distribución de la tabla 13. Se promediaron los dos valores de resistencia bajo las mismas condiciones de ensayo para un mismo tiempo de curado.

La resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, dependen de la relación agua/cemento, cantidad y tipo de agregados minerales o químicos, porosidad, densidad y microestructura. (FLORES, 2008)

2.3.2 MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA Y CÁLCULO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN.

De acuerdo con la Ley de Ohm, la resistividad es una propiedad volumétrica de los materiales, que indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas, es decir una medida de su oposición al paso de corriente. La Resistencia eléctrica R (Ohm) de cualquier objeto depende únicamente de su geometría (área transversal y longitud) y de su resistividad (ecuación 1). La Resistencia eléctrica R (Ohm) se mide aplicando un voltaje V (V) y midiendo el paso de corriente I (A).

La resistividad eléctrica del hormigón ρ (Ohm.cm) es un parámetro que depende del contenido de humedad y de los electrolitos presentes (cloruros, sulfatos, etc.), así como de la estructura y composición de los poros del hormigón. La resistividad eléctrica ρ suele ser obtenida usando la ecuación 2, expresando el factor geométrico A/l como K (cm²/cm).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

$$\rho = RK \quad (2)$$

En el caso del hormigón, cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad y mayor su resistencia mecánica al tener más fase sólida por volumen. La resistividad depende, además, del tipo de cemento, la relación agua/cemento, el proceso de curado, la porosidad de la estructura, entre otros. La resistividad es un indicador de la saturación de agua del hormigón, pues la resistividad aumenta cuando el hormigón no se encuentra saturado de agua. (PÉREZ, 2010)

La resistividad eléctrica del hormigón afecta directamente a la velocidad de corrosión del acero embebido en el concreto. Varios investigadores han logrado resultados experimentales, que permiten calificar los riesgos de corrosión en función de ρ . Las tablas 14 y 15 ofrecen una guía para evaluar la probabilidad de corrosión, según la resistividad medida en el hormigón.

Tabla 14. Resistividad eléctrica del hormigón y riesgo de corrosión, (DURAR, 1997).

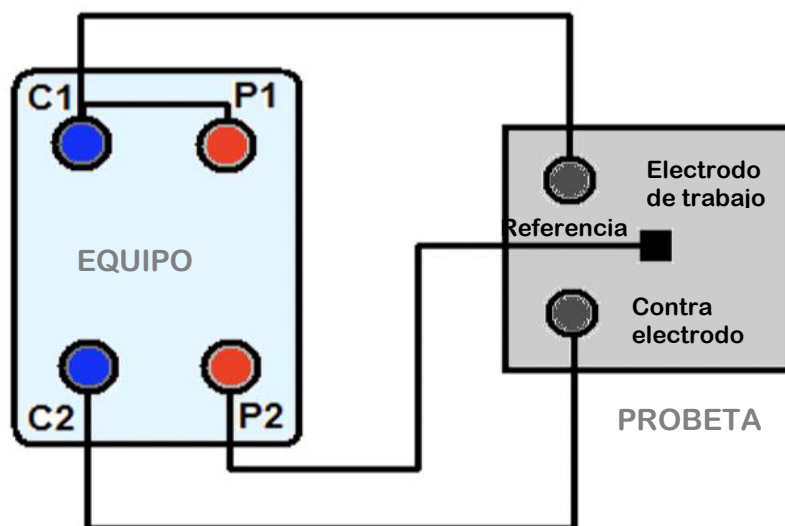
ρ	Criterio
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Poco riesgo de corrosión
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Alto riesgo de corrosión

Tabla 15. Probabilidad de corrosión según la resistividad del hormigón, (DUFFÓ, 2019).

ρ ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)	Probabilidad de corrosión
$> 100 - 200$	Hormigón muy seco. No permite distinguir entre acero al estado activo o pasivo. Las velocidades de corrosión serán muy bajas independientemente del contenido de cloruros y del nivel de carbonatación
$50 - 100$	Bajas velocidades de corrosión
$10 - 50$	Moderada a alta velocidad de corrosión si el acero está activo en hormigones carbonatados y/o contaminados con cloruro
< 10	La resistividad no es un parámetro que controle la velocidad de corrosión

La resistencia eléctrica de cada probeta cúbica hormigón fue medida quincenalmente durante 1 año, utilizando un medidor de resistencia NILSON 400, generalmente utilizado para mediciones en suelos y resistencia de puestas a tierra. Este equipo permite

Para la técnica de medición se adaptó el método tipo Wenner a la configuración de las probetas cúbicas, método que se explica a continuación con la ayuda de las figuras 28 y 29.



En esta técnica se emplean cuatro electrodos y una corriente conocida se envía entre los electrodos externos o de corriente C1 y C2, para medir la diferencia de potencial entre los electrodos interiores o de potencial P1 y P2.

La resistividad se obtiene como función del voltaje, intensidad y la distancia entre los electrodos. El equipo proporciona la resistencia del hormigón R_Q (Ohm) debida al electrolito, en las condiciones de evaluación.

Luego, para obtener la Resistividad, según la ecuación 2, es necesario conocer el factor geométrico correspondiente a la configuración particular de las probetas, lo que incluye las dimensiones y distribución de las barras embebidas en el hormigón. Este valor es una constante para las condiciones geométricas indicadas y se conoce como factor de celda o factor geométrico K .

2.3.2.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CELDA K .

Para obtener el valor de la constante K se utilizó un dispositivo prismático con base de sección cuadrada de 10 cm de lado (la misma sección que tienen las probetas en estudio). Dentro de este dispositivo se introdujo una estructura de madera que servía de soporte a las barras de acero. De esta manera, se logró una configuración similar a las probetas de hormigón (Figura 30).

Se utilizó cloruro de potasio como electrolito de resistividad eléctrica conocida, a varias concentraciones comerciales de soluciones estándar de conductividad (ELICROM, 2021), según lo indicado en la tabla 16. Se procedió a realizar las mediciones de resistencia R empleando el equipo Nilsson 400, con el procedimiento descrito en 2.3.2.



Figura 30. Dispositivo para determinación de factor de celda (K).

Con la ecuación 2 y los valores obtenidos de R y las resistividades de las soluciones preparadas, se determinó que el valor de la constante de la celda es 6,94 cm ajustando los datos por el método de "cuadrados mínimos", como se puede observar en la figura 31.

Tabla 16. Valores de resistencia medidos a diferentes concentraciones de KCl.

Concentración	Conductividad	Resistividad	Resistencia
M	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{Ohm}.\text{cm}$	Ohm
0,001	147	6802.7	980
0,01	1413	707.7	104
0,1	12890	77.6	10

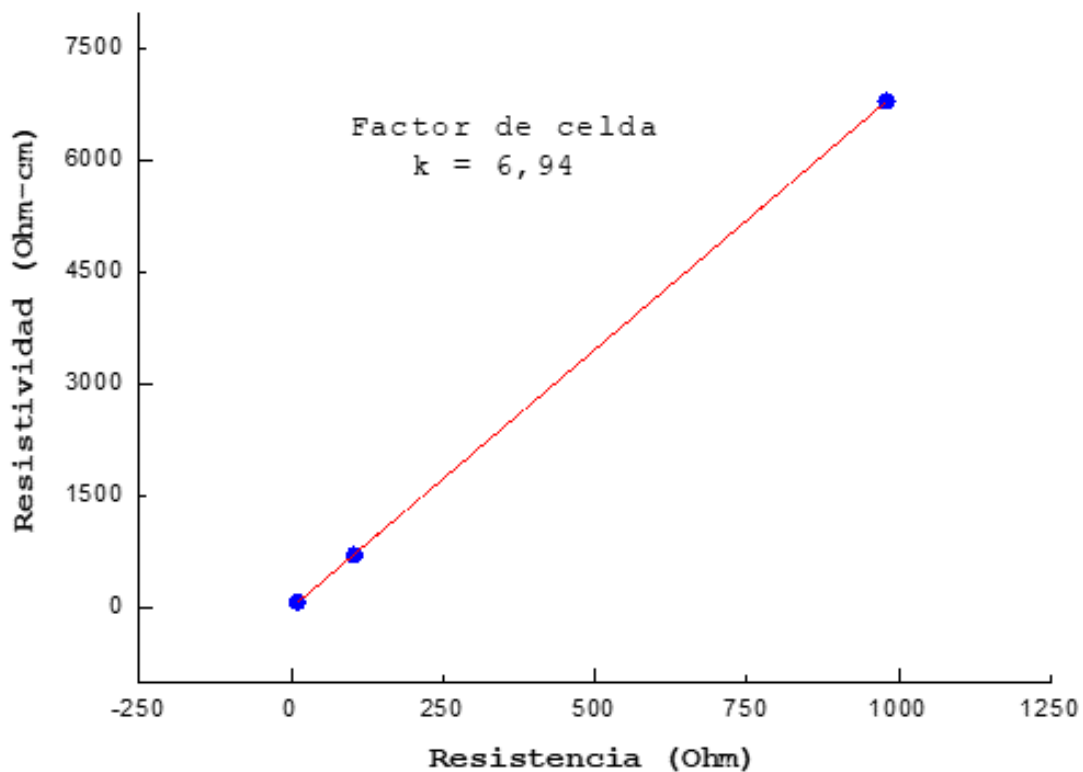


Figura 31. Ajuste de curva para determinación de factor de Celda K .

2.3.3 MEDICIÓN DE POTENCIALES DE CORROSIÓN DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN (E_{corr}).

El potencial de corrosión del acero embebido en el hormigón E_{corr} , es un parámetro que indica el estado del acero de la armadura (activo o pasivo).

La medición de potenciales de corrosión de las barras de acero inmersas en hormigón fue ejecutada según las recomendaciones de la norma ASTM C 876 - 09 "Método de prueba estándar para determinar los potenciales de media celda de acero de refuerzo sin recubrimiento de hormigón", utilizando multímetros calibrados y de alta impedancia interna.

Los valores de E_{corr} fueron interpretados según la norma indicada, de acuerdo con los rangos especificados en la tabla 17, usando como referencia un electrodo de cobre-sulfato de cobre **CSE**.

Tabla 17. Rangos de Potencial de Corrosión para acero en Hormigón, (ASTM C 876 - 09).

E_{corr} vs CSE (mV)	Riesgo por corrosión	Tipo de Corrosión
> -200	Bajo	Acero en estado pasivo
-200 a -350	Moderado	Transición activo - pasiva
<-350	Alto	Corrosión activa

La primera parte del proceso se ocupaba de medir la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia interno **ERI**, con respecto a cada electrodo de trabajo (**Ax** y **Ay**), conectando el negativo del multímetro al electrodo de referencia interno de la probeta **ERI**, y el positivo a uno de los electrodos de trabajo, y luego al otro (figura 32).



Figura 32. Medición de Potencial de Corrosión E_{corr} . Fuente: Autor.

Debido a que el **ERI** no proporciona una medida estándar, las lecturas se convirtieron utilizando un electrodo de cobre **CSE**. Para ello, se procedió a medir la diferencia de potenciales entre el **ERI** y el **CSE** en cada una de las caras laterales de las probetas cúbicas de hormigón y calculando un promedio entre estas lecturas (figura 33). Esta actividad fue desarrollada bajo las recomendaciones de la norma ASTM C876-09. De esta manera, es posible referir los E_{corr} medidos, respecto del **CSE**.



Figura 33. Lecturas con electrodo CSE. Fuente: Autor.

2.3.4 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL.

El objetivo es determinar la evolución del potencial de corrosión E_{corr} y de la densidad de corrosión i_{corr} con relación al tiempo de evaluación de las probetas y al medio de exposición. Una de las técnicas electroquímicas para medir la resistencia de polarización R_p es la de Stern-Geary, llevando al sistema desde su potencial de corrosión E_{corr} a otro potencial, catódica o anódicamente. La corrosión de las barras de acero embebidas en el hormigón es un fenómeno electroquímico, por lo tanto, es posible perturbar al sistema, aplicando estímulos eléctricos de valores conocidos y medir las respuestas del conjunto. La

polarización es el desplazamiento del potencial de corrosión E_{corr} de un electrodo y su valor se denomina sobrepotencial η .

Las reacciones electroquímicas “producen” o “consumen” electrones, por lo que la velocidad del flujo electrónico desde o hacia la interfase que reacciona, es una medida de la velocidad de reacción. Normalmente, sobre un metal que se corroe, ocurren dos o más reacciones electroquímicas de manera simultánea e independiente.

Al aplicar el principio de conservación de cargas sobre todas las reacciones (anódicas y catódicas) que ocurren de manera simultánea sobre la superficie conductora de electrones de un metal que se corroe, la velocidad total de oxidación debe ser igual a la velocidad total de reducción. Como espontáneamente no puede haber circulación neta de corriente, la corriente anódica debe ser exactamente igual a la corriente catódica; lo cual ocurre al denominado Potencial de Corrosión E_{corr} (Potencial mixto o de reposo).

A este valor de potencial ocurren las reacciones de disolución del metal a una velocidad $i_{anódica}$ y las reacciones de reducción a una velocidad $i_{catódica}$; esta densidad de corriente se denomina densidad de corriente de corrosión i_{corr} . La ecuación que describe este comportamiento en base a los valores de las respectivas pendientes de Tafel anódica y catódica b_a y b_c , es la siguiente (GALVELE, 2006):

$$i = i_{corr} \left[e^{\frac{2,303}{b_a} \eta} - e^{-\frac{2,303}{b_c} \eta} \right] \quad (3)$$

Para pequeños sobrepotenciales (cerca del potencial de corrosión) esta ecuación se transforma en lineal:

$$i = i_{corr} 2,303 \eta \left(\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c} \right) \quad (4)$$

Luego, derivando la densidad de corriente respecto del potencial, se llega a:

$$\frac{\partial i}{\partial \eta} = i_{corr} 2,303 \left(\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c} \right) \quad (5)$$

La resistencia a la polarización se puede definir en función del desplazamiento de potencial (para pequeños sobrepotenciales) en relación con una densidad de corriente aplicada:

$$\left. \frac{\partial i}{\partial \eta} \right|_{\eta \rightarrow 0} = \frac{1}{Rp} = \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (6)$$

De las ecuaciones 5 y 6 se obtiene que:

$$\frac{1}{Rp} = i_{corr} 2,303 \left(\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c} \right) \quad (7)$$

Finalmente, utilizando una constante $B = (b_a \cdot b_c) / [2,303 (b_a + b_c)]$, se obtiene la ecuación de Stern-Geary, que define la relación entre la resistencia a la polarización y la densidad de corriente de corrosión (velocidad de corrosión).

$$i_{corr} = \frac{B}{Rp} \quad (8)$$

Los valores de la constante **B** han sido estudiados en diferentes trabajos para sistemas conocidos. En el caso del sistema acero de refuerzo - hormigón, los valores de referencia de la constante **B**, varían en función del estado de actividad o pasividad del acero, siendo 26 mV para acero en estado activo y 52 mV para acero en estado pasivo. (ANDRADE, 1978)

Según González, Albéniz y Feliú (GONZALEZ, 1996), "el margen de variabilidad de las pendientes de Tafel no es muy amplio y, además, el hecho de encontrarse en el numerador y denominador restringe aún más el rango de valores posibles de B que, en la mayoría de los sistemas, están comprendidos entre 0,013 y 0,052 V. Esto quiere decir que, adoptando un valor medio entre los posibles, se puede determinar la velocidad de corrosión con un factor de error de 2 como máximo, suficientemente aproximado para muchas aplicaciones". De acuerdo con esta teoría, para valores entre -0,200 y -0,350 V_{CSC}, o transición activo-pasiva, el valor de B sería el valor medio de los indicados.

Debe considerarse que, la Resistencia Eléctrica Total **R_t**, medida mediante el método de resistencia de polarización es la suma de la Resistencia a la Polarización Lineal **R_p**, más la Resistencia debida al electrolito **R_Ω** (ecuación 9). (ANDRADE, 2004)

$$R_t = R_p + R_{\Omega} \quad (9)$$

En la práctica, el valor de **R_Ω** se obtuvo con el equipo Medidor de Resistividades modelo Nilsson 400.

La velocidad de corrosión permite predecir la velocidad de deterioro en términos de la disminución esperada para su sección transversal. La tabla 18 presenta la clasificación propuesta por la red iberoamericana DURAR (DURAR, 1997), donde se evalúa el

riesgo de daño de las estructuras de hormigón armado en función de algunas características del hormigón y algunos de los agentes agresivos que causan la corrosión del acero.

Tabla 18. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil, (DURAR, 1997).

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de Corrosión
$< 0,1$	Despreciable
$0,1 - 0,5$	Moderado
$0,5 - 1$	Elevado
> 1	Muy elevado

Los ensayos de Resistencia a la Polarización Lineal fueron ejecutados con la ayuda del Potencio-Galvanostato EG&G modelo 362. Este equipo cuenta con un graficador X-Y, el cual es un sistema análogo de adquisición de datos que realiza gráficas en papel de formato logarítmico con un puntero mecánico. Este sistema graficador fue reemplazado por una tarjeta de adquisición de datos (NI USB-6211) en línea con una computadora, lo que incrementó la eficiencia y precisión de las lecturas. En la figura 34 se muestra el dispositivo utilizado.

Los controles del equipo se ajustaron para funcionar en modo de control de corriente y se aplicó una corriente I de $20\mu\text{A}$. A los 60 segundos de inyectar la corriente se medía los potenciales de los electrodos de trabajo. Se realizaron ensayos para cada electrodo de trabajo AX y AY y estos valores se promediaron para obtener un valor E_{60s} por cada probeta.



Figura 34. Potencio-Galvanostato EG&G modelo 362 y sistema de adquisición de datos. Fuente: Autor.

2.3.5 ENSAYOS DE DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES.

El hormigón protege al acero de refuerzo gracias a su alcalinidad ($\text{pH} > 12,5$), permitiendo que el acero se mantenga en estado pasivo y con una velocidad de corrosión poco significativa.

Dos de los principales contaminantes que pueden destruir la película pasivante son los iones cloruro y el dióxido de carbono. Debido a que el hormigón supone un considerable impedimento físico a la penetración por difusión, es importante conocer su resistencia a la penetración de los agentes agresivos, para lo cual existen técnicas de evaluación estandarizadas.

2.3.5.1 DIFUSIÓN DE CLORUROS.

La corrosión iniciada por iones cloruro es causada por la presencia en la superficie del acero de una concentración de iones cloruro superior a la concentración crítica. Los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de

poros del hormigón o haber sido incorporados como contaminante con algunos de los componentes de la mezcla.

Hasta ahora no se ha encontrado un valor único para la concentración crítica, puesto que depende de las características del hormigón: "pH de la solución de los poros, contenido de humedad, temperatura, tipo de catión que acompaña al cloruro, contenido de aluminato Tricálcico (C_3A) y finura del cemento, adiciones, etc."; y del acero: "composición, impurezas, desigualdades de la superficie, envejecimiento" (CASTELLOTE, 2002).

Estos parámetros influyen en la naturaleza de la capa pasiva, lo que determina el potencial de corrosión de la armadura. La capa pasiva evoluciona con el tiempo y lo mismo sucede con el potencial. (ALONSO, 2002)

El agua de los mares presenta generalmente una composición química uniforme, con 3,5% de sales solubles en peso. (MEHTA, 1986)

El objetivo de este ensayo fue elaborar una curva de avance de los iones cloruro, con relación al tiempo. El ensayo se realizó en 2 fases: Las primeras muestras fueron analizadas a los 5 meses de exposición y el segundo grupo al cumplir 1 año. Para cada ensayo se utilizaron 4 probetas elaboradas con mezcla patrón (sin inhibidor): 2 expuestas a la difusión de cloruros por gravedad, y 2 probetas no expuestas o equivalentes al tiempo de exposición $t=0$.

Al cumplir el tiempo de exposición requerido, se cortaron 3 secciones de 20 mm de espesor de la parte superior de las probetas expuestas a la acción de los cloruros y una rebanada de las probetas no expuestas, según el esquema de la figura 35.

Cada sección fue limpiada, y triturada hasta alcanzar una finura de 850 μm aproximadamente, según lo indicado por la norma ASTM C1152 "Método de prueba estándar para el cloruro soluble en ácido en mortero de hormigón". Para el proceso de trituración, se utilizaron trituradoras de mandíbulas, luego de rodillos y finalmente de disco.

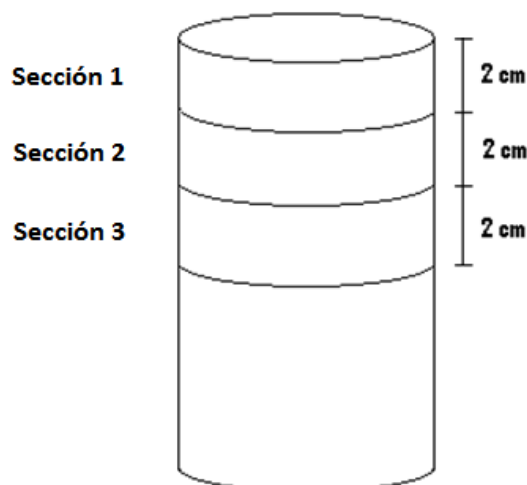


Figura 35. Esquema de corte de probetas para análisis de difusión de cloruros. Fuente: Autor.

El polvo obtenido fue pasado por un tamiz 20, pesado y almacenado cuidando la correcta identificación de procedencia. En la figura 36 se muestra una sección cortada de la probeta y el polvo obtenido.

Estas secciones se pulverizaron para realizar el análisis químico por titulación volumétrica con nitrato de plata para calcular el porcentaje de cloruros solubles por masa de concreto, con precisión del 0,001%, tal como lo recomienda la norma ASTM C 1152. De acuerdo con lo indicado en la norma mencionada, el cloruro obtenido de esta manera equivaldría a cloruros totales.



Figura 36. Sección de probeta cilíndrica y polvo obtenido de la misma. Fuente: Autor.

Los iones cloruro que difunden a través del hormigón se pueden representar mediante la segunda ley de la difusión de Fick, cuya forma general en una dimensión, se presenta en la ecuación 10, asumiendo que el mecanismo de penetración de iones cloruro que prevalece es la difusión en estado no estacionario y el coeficiente de difusión es constante (SALCEDO, 2005):

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (10)$$

De donde:

- c Concentración de iones cloruro (%)
- t Tiempo de exposición a cloruros (s)
- x Profundidad de concentración de cloruros (mm)
- D Coeficiente de difusión (mm²/s)

La ecuación 10 expresa que cuando existe difusión, la concentración de cloruros varía de acuerdo a la profundidad del

material y el tiempo. El coeficiente de difusión se refiere a la difusividad de una sustancia en otra. (BESNIER, 2019)

En el caso de la difusión de gases o líquidos en los poros de un sólido como el hormigón, que tiene poros de diferentes tamaños y formas y con interconexiones que incluyen cuerpo y garganta de poro de sección transversal variable, se define el coeficiente efectivo de difusión, para describir la difusión promedio en cualquier posición dentro de las capas del material. (MASCIARELLI, 2012)

Para obtener el coeficiente efectivo de difusión de cloruros en el concreto, la solución de la ecuación 10 es la siguiente:

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \text{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{ef} \cdot t}} \right] \quad (11)$$

En donde:

$C(x,t)$	Concentración de cloruros (%)
C_s	Concentración de cloruros en la parte superficial del concreto (%)
C_0	Concentración de cloruros en el concreto de control (%)
erf	Función error
x	Profundidad (mm)
t	Tiempo de exposición a cloruros (s)
D_{ef}	Coeficiente efectivo de difusión de cloruros en concreto (mm ² /s)

La ecuación 11 fue resuelta con la ayuda de un modelo matemático desarrollado con el software Mathcad, el cual permite ajustar un perfil de concentraciones de cloruros modelado con los valores

experimentales, para luego predecir la velocidad de ingreso de cloruros, asumiendo que el proceso está controlado por difusión.

Debido a los múltiples factores que afectan la calidad del hormigón, así como las múltiples condiciones de exposición, la bibliografía presenta diferentes valores para los elementos de la ecuación 11. A continuación se recoge valores típicos relacionados.

Coeficiente efectivo de difusión de cloruros en concreto:

Bamforth (BAMFORTH, 1996), ha definido que los valores de D_{ef} varían entre 10^{-6} y 10^{-7} mm²/s, dependiendo de la calidad del concreto. El valor de D_{ef} tiende a disminuir cuando baja la relación agua/cemento, aumenta el tiempo de curado, o se adiciona puzolanas. (TORRES, 2001)

Rangos de concentración superficial de iones cloruro: Los valores de C_s se ven afectados por diversos factores relacionados con el medio ambiente y las propiedades del concreto. El valor de C_s es afectado por el tipo de concreto, principalmente por la cantidad de cemento que posee la mezcla y si en ésta se usan puzolanas o no.

Para cuestiones de diseño algunos autores consideran que el valor promedio de C_s permanece constante después de seis meses de que la estructura entra en servicio (GONZALEZ, 2005). En la práctica, los valores de C_s llegan a verse afectados por la distancia de la estructura respecto a la costa y las condiciones agresivas del medio como los ciclos de mojado/secado, la temperatura ambiente, los vientos dominantes; factores que inciden en la concentración de oxígeno y la velocidad de avance del ion cloruro a través de los poros de la estructura.

En la tabla 19 (BAMFORTH, 1995) se presenta rangos de valores para C_s , para el diseño por durabilidad de estructuras en ambiente marino, para concretos con y sin puzolanas:

Tabla 19. Rango de concentraciones de iones cloruros en la superficie según el porcentaje del peso del material cementante y el tipo de ambiente, (BAMFORTH, 1995).

Ambiente	Cemento Portland	Cemento Pozolánico
Extremo	> 0,75%	> 0,90%
Severo	0,50 % - 0,75 %	0,60 % - 0,90 %
Moderado	0,25 % - 0,50 %	0,30 % - 0,60 %
Benigno	< 0,25 %	< 0,30 %

Concentración crítica de iones cloruro: Es el contenido de iones cloruros a nivel de la armadura con capacidad de iniciar la corrosión. Puede expresarse como relación $\frac{Cl^-}{OH^-}$, porcentaje de cloruros totales o porcentaje de cloruros libres en peso de cemento. (ALONSO, 2009)

La concentración crítica de cloruros depende de varios factores, entre ellos la calidad del hormigón, su grado de carbonatación y la humedad relativa, como se indicó en la Figura 12. Sólo resultan peligrosos los cloruros que quedan disueltos en la fase acuosa de los poros, es decir los cloruros libres, sin embargo, en la bibliografía hay diferentes opiniones sobre los valores límite y el uso de cloruros totales o cloruros libres. Por ejemplo, Bermúdez (BERMUDEZ, 2007) presenta resultados (tabla 20) de valores recogidos por varios autores, siendo los cloruros totales denominados "Solubles en ácido" y cloruros libres "Solubles en agua", bajo la metodología ASTM utilizada para su medición.

Tabla 20. Contenido crítico de cloruros que provoca el inicio de la corrosión, recogido por varios autores, (BERMUDEZ, 2007) .

	Solubles en agua	Solubles en ácido
ACI 201	0,10 a 0,15*	-
ACI 222	-	0,20
ACI 318	0,15 a 0,30	0,20
BS 8110	-	0,40
Normas Australianas	-	0,60
RILEM	-	0,40
Normas Noruegas	-	0,60
Hope e Ip	-	0,10 a 0,20
Everett y Treadaway	-	0,40
Thomas	-	0,50
Hussain, Al-Gahtani y Rasheeduzzafar [‡]	-	0,18 a 1,2
Page y Havdahl	0,54	1,00
Stratfull	-	0,15

*0,10: ambiente húmedo expuesto a cloruros; 0,15: ambiente húmedo no expuesto a cloruros.

[‡] Valor crítico usado en un estudio.

Los valores indicados por el ACI 201, ACI 222 y BS 8110 son límites normativos y no verdaderos valores críticos de inicio de corrosión

Tabla 21. Riesgo de corrosión de la barra de refuerzo con relación a los rangos de concentraciones críticas de iones cloruros totales y solubles (BAMFORTH, 1995) .

Concentración de iones cloruros a la profundidad del acero(%p de cemento)	Riesgos para la iniciación de la corrosión
<0,4	Insignificante
0,4-1,0	posible
1,0-2,0	probable
>2,0	seguro

En la tabla 21 (BAMFORTH, 1995), se define valores de concentración a la profundidad del acero. Para comparar entre los diferentes valores propuestos, se realizará cálculos para una concentración crítica de cloruros totales de 0,4% en masa de cemento, desde donde se considera como posible el riesgo para la

iniciación de la corrosión. Esta concentración crítica se denominará "umbral".

Recubrimiento mínimo de hormigón al refuerzo: La NORMA NEC-SE-HM indica que las barras de acero de refuerzo deberán ser colocadas a una distancia mínima, referida en tablas de la norma ACI 318-2014. Este recubrimiento de hormigón evita el pandeo bajo ciertas condiciones de carga de compresión, evita la oxidación cuando se exponga al clima y la pérdida de resistencia cuando se exponga al fuego.

El recubrimiento se mide desde la superficie del concreto hasta la superficie externa del acero. En ambientes corrosivos o con condiciones severas de exposición, se debe aumentar el espesor de recubrimiento y tomar en cuenta su densidad y porosidad o incluir otro tipo de protección, según el Reglamento ACI 318-2019 para concreto estructural.

La tabla 22 presenta un resumen de los valores de recubrimiento mínimo para hormigón de refuerzo en condiciones de exposición a la intemperie, de acuerdo con la norma citada. Cuando se trate de construcciones costa afuera o en la línea de costa, la Guía para diseño y construcción ACI-357.3R-14 hace recomendaciones adicionales en base a la ubicación de la estructura y al tamaño de los agregados y el diámetro de las barras de refuerzo.

Los valores de la tabla 22 sirven como guía para seleccionar un valor de profundidad **x** a ser utilizado en el ajuste del perfil de concentraciones. El valor de referencia para cálculos y predicciones será de 50 mm de recubrimiento sobre el acero de refuerzo.

Tabla 22. Recubrimiento de hormigón mínimo recomendado sobre armadura, (ACI 3573R-14).

ZONA	RECUBRIMIENTO SOBRE EL ACERO DE REFUERZO PRINCIPAL (mm)
Zona atmosférica no sujeta a spray.	50
Zona de salpicadura y zona atmosférica sujeta a niebla salina (zona de variación de mareas)	65
Zona sumergida	50

2.3.5.2 DIFUSIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO

La carbonatación es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del hormigón, principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Como resultado, el pH del hormigón carbonatado se reduce a valores menores que 9. Una vez que el frente carbonatado alcanza la armadura comienza la disolución de la película pasiva que protege el acero de la corrosión.

El ensayo de difusión de dióxido de carbono se realizó en dos fases:

1. Ensayo a los 4 meses de exposición.
2. Ensayo a los 12 meses de exposición.

Para cada prueba se utilizaron 3 probetas de hormigón de mezcla patrón (sin inhibidor), 2 expuestas a la carbonatación en la

cámara y 1 probeta no expuesta al contaminante utilizada como patrón. Las probetas fueron cortadas longitudinalmente para evaluar el avance de la carbonatación en sentido radial y rociadas con una solución indicadora de fenolftaleína 1% p/v en alcohol etílico.

El indicador fenolftaleína actúa de manera tal que las zonas no carbonatadas del hormigón adquieren una coloración fucsia pues se mantiene el pH, y en las zonas carbonatadas, por la disminución del pH, no se observa la coloración. Se hicieron cortes longitudinales en las probetas y las medidas de avance de carbonatación fueron medidas con un calibrador vernier tomándose el valor máximo para cada probeta.

La constante de carbonatación **K** se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$x = K\sqrt{t} \quad (16)$$

siendo **x** el espesor de la capa carbonatada (mm), **K** la constante de carbonatación (mm.años^{-1/2}) y **t** el tiempo de exposición al medio (años).

CAPITULO III:

VALORES EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas. Las probetas en sus diferentes configuraciones (Ver tablas 11, 12 y 13) se elaboraron en el Centro Técnico del Hormigón de Holcim en la ciudad de Guayaquil, desde el 12 al 15 de mayo del 2009.

Los primeros ensayos realizados fueron los de resistencia a la compresión de acuerdo con el tiempo de curado. Las probetas restantes fueron colocadas en los medios de ensayo (ambiente, semi-inmersión en solución salina y cámara de carbonatación) en el laboratorio de corrosión de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL, un mes después.

Los ensayos electroquímicos de medición de resistencia a la polarización lineal fueron realizados periódicamente (cada semana) durante 1 año.

3.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.

Estas pruebas fueron realizadas para verificar si la mezcla de concreto cumple con los parámetros de resistencia indicados por el fabricante y para comprobar la homogeneidad de las probetas que serían utilizadas en los ensayos posteriores.

El peso promedio de las probetas fue de 3,87 Kg y la velocidad de carga aplicada 2,4 KN/s. Los valores obtenidos se detallan en la tabla 23 y se ilustran gráficamente en la figura 37.

Tabla 23. Valores promedio de la resistencia a la compresión obtenidos en los ensayos.

TIEMPO DE CURADO (días)	Resistencia a la compresión (MPa)	
	Mezcla patrón sin inhibidor	Mezcla con inhibidor
7 DÍAS	36,92	35,81
14 DÍAS	48,00	49,30
28 DÍAS	50,26	52,89

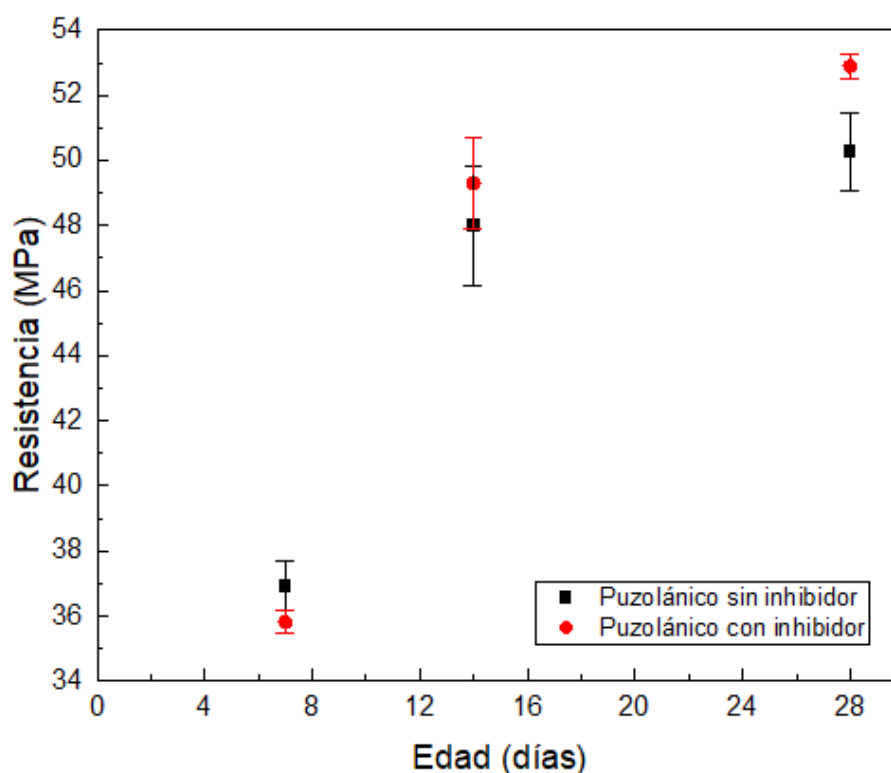


Figura 37. Gráfico Resistencia a la Compresión vs Tiempo.

Para los dos tipos de mezcla, se han obtenido valores mayores a los 25 MPa a los 28 días de fraguado indicados en la tabla 2 para este tipo de cemento. La mezcla con inhibidor muestra una resistencia a la compresión 5,23% mayor que la muestra patrón sin inhibidor, a los 28 días de edad. Según la ASTM C39/C39M-17, bajo condiciones de laboratorio para ensayos realizados por un mismo operador, la precisión es del 3,2% para cilindros de 100 x 200 mm. Por lo tanto, se confirmaría lo indicado por el

fabricante del inhibidor, el cual menciona que el producto tiene un efecto mínimo en algunas propiedades de la mezcla, entre ellas un aumento en la resistencia a la compresión. (CORTEC, 2021)

La Norma NEC-SE-HM Estructuras de Hormigón Armado (NEC-SE-HM, 2014), clasifica a las categorías y clases de exposición para relacionarlos con los requisitos que deben cumplir las mezclas de hormigón. Cuando se requiere protección del refuerzo contra la corrosión en su nivel de severidad más alto, en condiciones de "Hormigón expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos para descongelar: sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen", la resistencia especificada a la compresión mínima f'_c es de 35 MPa. Luego, esta misma norma indica que debido a que "la evaluación de los resultados de pruebas de resistencia del hormigón tiene en cuenta que la producción está sometida a variaciones en los componentes, medición, pruebas y resultados de los ensayos, se debe dosificar el hormigón de manera que se obtenga una resistencia promedio f'_{cr} muy por encima de la resistencia especificada". En este caso el valor más alto es requerido en el caso de hormigones sin registros estadísticos, calculándose la resistencia media requerida (en Mpa), de la siguiente manera:

$$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5.0 \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Tomando como ejemplo, el caso de una f'_c de 35 MPa, el valor de f'_{cr} , debería ser 43,4 MPa. En este caso, la mezcla ensayada se encuentra por encima de estos valores.

3.2 ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL

3.2.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE RESISTENCIA R_0 Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA ρ .

Para este ensayo se utilizaron probetas cúbicas con insertos de varillas de acero como armaduras. Dichas probetas fueron ubicadas dentro de su medio de ensayo respectivo: en cámara de carbonatación, en cámara de semi-inmersión en agua salada y expuestas al medio ambiente exterior sin protección de ningún tipo.

La resistividad eléctrica del hormigón ρ es función de la humedad contenida, los electrolitos presentes y de la estructura y composición de los poros del hormigón (ANDRADE, 2011). Debido a que la geometría de todas las probetas ensayadas es similar, la resistencia eléctrica en las pruebas realizadas será función de su resistividad. Las mediciones obtenidas con el equipo medidor de resistencias se corrigen con el factor de celda calculado en 2.3.2.1.

Se realizaron 4 mediciones quincenales por tipo de medio y se grafica el promedio de estos valores. Los resultados obtenidos en cada caso se comparan con el criterio general de valores de resistividad eléctrica del hormigón de la tabla 15.

Bajo las condiciones de exposición en la **cámara de carbonatación** con dióxido de carbono y humedad relativa 50-60%, las lecturas realizadas periódicamente indican un aumento creciente de la resistividad hasta los 406 días de ensayo, dando cuenta del continuo proceso de hidratación del cemento, llegando a 69.000 Ohm.cm para las probetas sin inhibidor de corrosión y 51.700 Ohm.cm para las mezclas que contienen inhibidor (figura 38).

Estos valores se ubican en el rango correspondiente a bajas velocidades de corrosión. El porcentaje de desviación estándar se calculó entre 8% y 30% para los ensayos con probetas sin inhibidor y entre 12% y 22% para probetas con inhibidor.

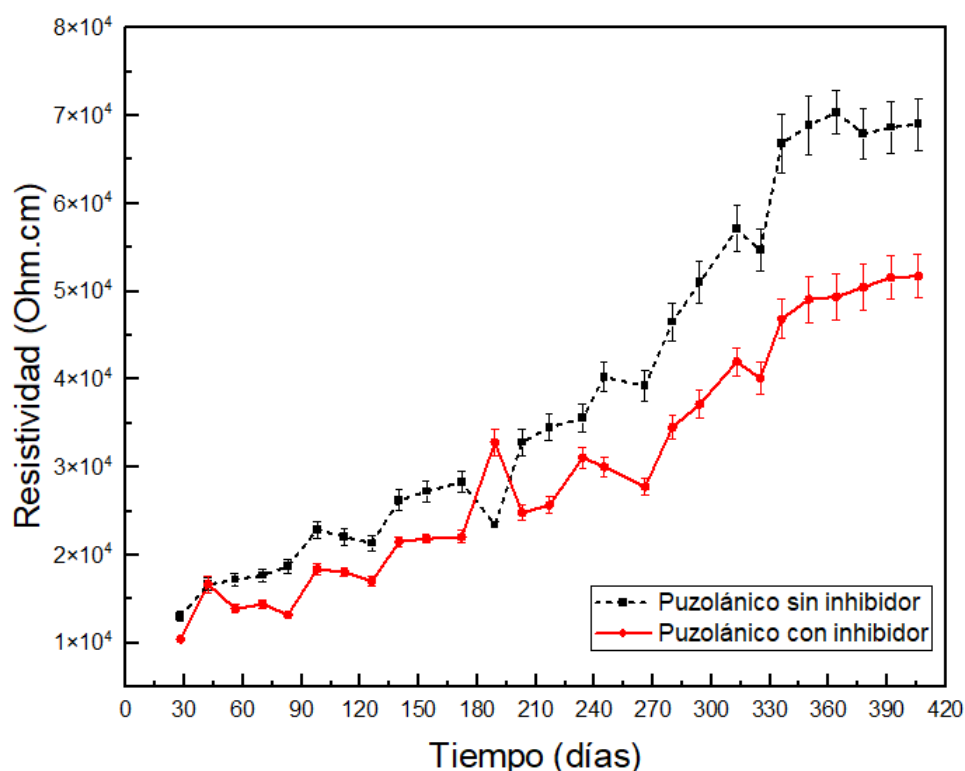


Figura 38. Resistividad durante el periodo de ensayo en muestras en cámara de carbonatación.

En **semi-inmersión en agua salada** el tiempo de exposición fue de 410 días (figura 51). Se pudo observar que el hormigón se saturó con agua, aunque el contenedor no estaba cerrado herméticamente y el nivel de agua se mantuvo constante sumergiendo 8 cm de la probeta y dejando libres los 2 cm superiores del cubo de hormigón y las barras de prueba.

La resistividad en estas probetas llegó a valores cercanos a 8.900 Ohm.cm para mezclas sin inhibidor y de 10.580 Ohm.cm para mezclas con inhibidor de corrosión. Estos valores indicarían que la resistividad no podría considerarse como un parámetro de control para la velocidad de corrosión para estas probetas. La

desviación estándar en estos ensayos se encuentra entre el 4% y el 15% para los ensayos con probetas sin inhibidor y entre el 9% y el 21% para probetas con inhibidor.

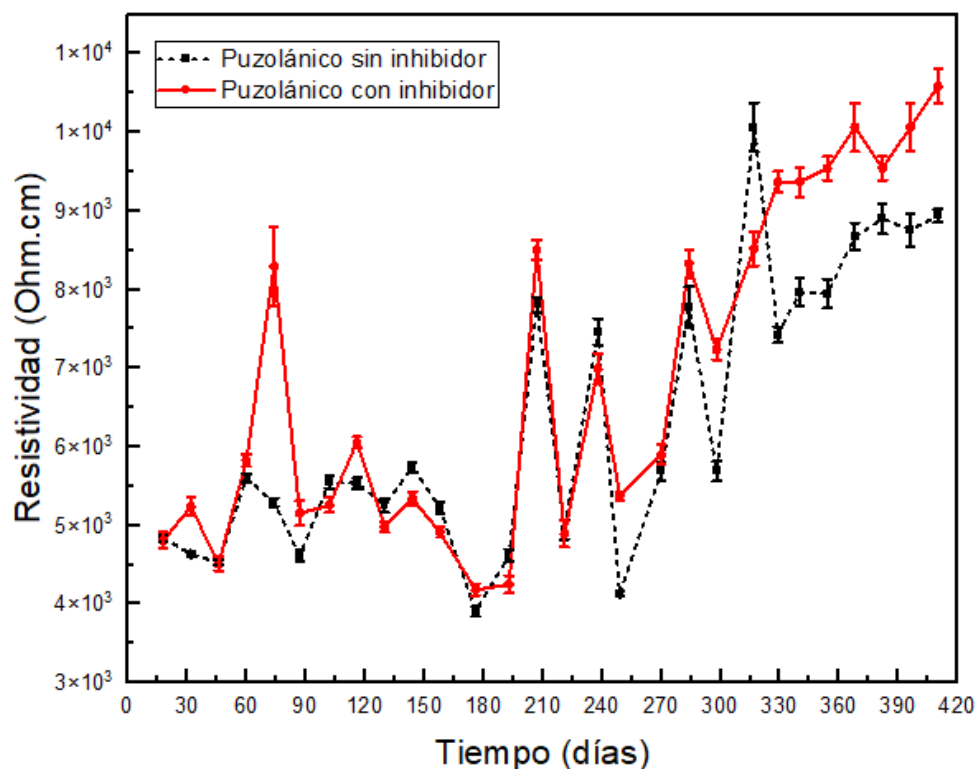


Figura 39. Resistividad durante el periodo de ensayo en muestras en inmersión en agua salada.

Las probetas expuestas al **medio ambiente externo** también fueron mantenidas durante 410 días, iniciando su periodo de exposición en la segunda quincena del mes de julio del 2009. Desde junio hasta noviembre son épocas que se caracterizan por falta de precipitaciones (lluvias) en la zona del litoral o costa del Ecuador.

En la figura 40 se observa claramente cómo la resistividad aumenta progresivamente, alcanzándose un primer pico de resistividad de 54.800 Oh.cm a mediados de diciembre (aproximadamente a los 170 días).

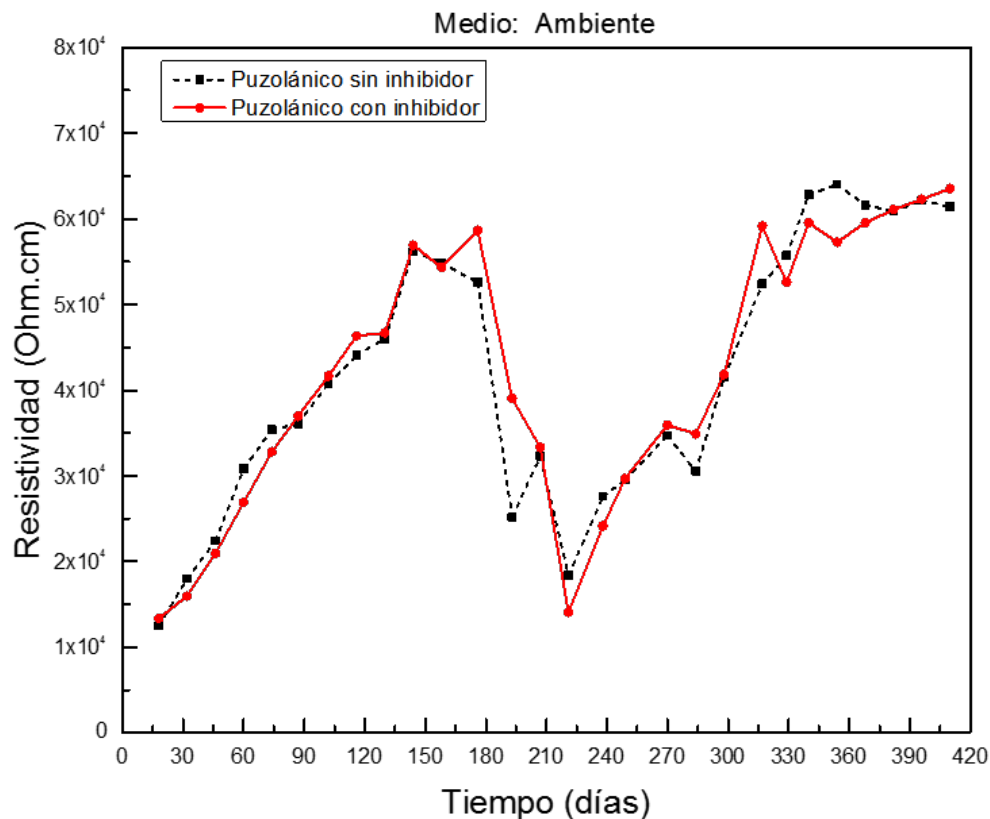


Figura 40. Resistividad durante el periodo de ensayo en muestras expuestas al medio ambiente.

Posteriormente, coincidiendo con el “invierno” o época lluviosa de la costa ecuatoriana, se llega al valor de resistividad más bajo en el mes de febrero con 14.000 a 18000 Ohm.cm (220 días de exposición aproximadamente). Luego vuelve la temporada seca y esta vez se llega en julio (350 días) a un segundo pico de resistividad de 64.000 Ohm.cm. Estos valores indican que las armaduras en esta mezcla de hormigón tienen un riesgo de corrosión entre bajo y moderado. El primer pico de resistividad se mantiene por un mes adicional para las mezclas con inhibidor. Con los valores medidos no es posible resaltar diferencias en el comportamiento entre ambas mezclas.

La temperatura de exposición de las probetas fue la siguiente: el promedio en la costa se mantiene casi constante la mayoría de los días (28 a 32 °C) con altos niveles de radiación solar y altos niveles de humedad relativa durante el “invierno”, bajando

pocos grados en la época de "verano" o meses secos. Suele haber mayores diferencias de temperatura entre el día y la noche, siendo igualmente las noches de "verano" más frescas que el resto del año (20°C promedio).

En los ensayos en probetas expuestas al medio ambiente, el porcentaje de desviación estándar que se obtuvo va desde el 2% al 16% para los ensayos con probetas sin inhibidor y entre el 7% y 20% para probetas con inhibidor.

3.2.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE POTENCIALES DE CORROSIÓN DE LAS BARRAS DE ACERO EMBEBIDAS EN HORMIGÓN (E_{corr}).

El potencial de corrosión de las barras de acero embebidas en hormigón fue medido cada quince días para determinar su evolución y definir si las armaduras se encontraban en estado activo o en estado pasivo de corrosión según la tabla 19 "Rangos de potencial de corrosión para acero en hormigón" de la norma ASTM C876 - 09. En todos los periodos de ensayo se obtuvo 4 lecturas, las cuales se promedian para representar un punto en las gráficas.

Los niveles de potencial de corrosión E_{corr} vs CSE, medidos en las varillas de las probetas expuestas durante 406 días a la **carbonatación acelerada**, se encontraron en valores mayores al límite de -200 mV (figura 41), lo que implica que las armaduras se encontraban en estado pasivo. Esto indicaría el contaminante dióxido de carbono no habría llegado hasta el acero, manteniéndose la película pasiva del acero que lo protege contra la corrosión. El comportamiento entre mezclas con inhibidor y sin él, no muestran diferencias apreciables, estando ambas dentro de los rangos de estado pasivo de potenciales.

El porcentaje de desviación estándar de los resultados obtenidos en ensayos de probetas expuestas a la carbonatación se calculó

entre 4% y 18%. Con inhibidor los porcentajes de dispersión se calcularon entre 12% y 25%

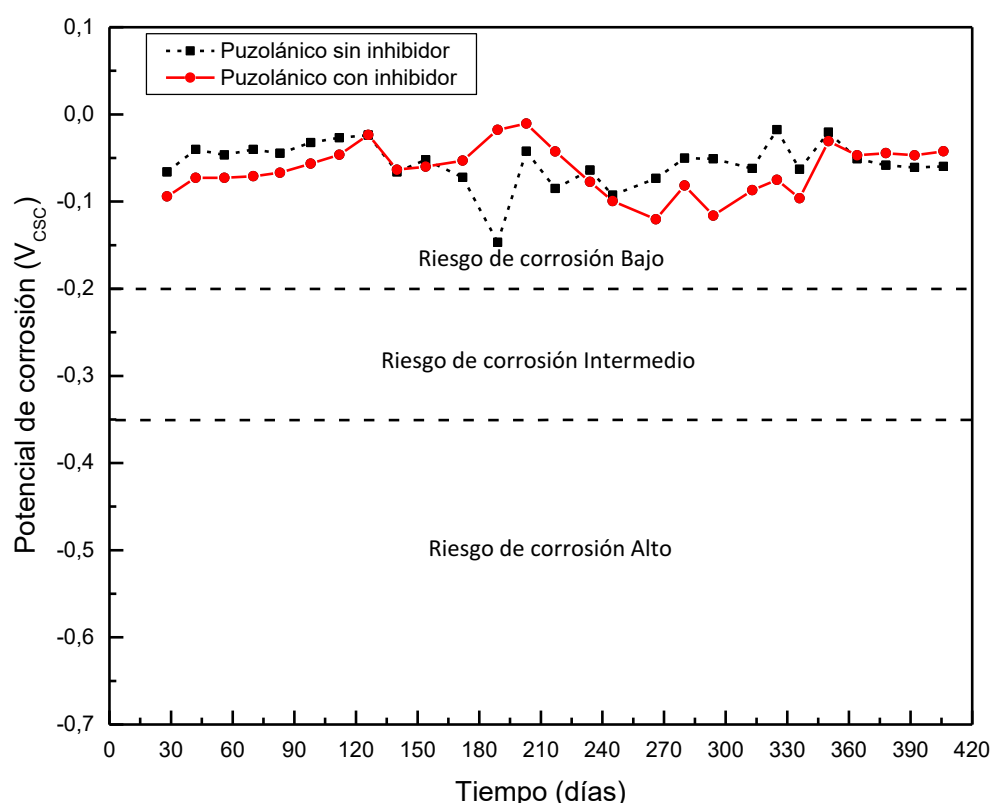


Figura 41. Potenciales de corrosión medidos durante el periodo de ensayo en muestras en cámara de carbonatación.

Las armaduras de probetas en **inmersión en agua salada** mostraron valores de potenciales promedio quincenales desde el riesgo de corrosión intermedio con valores menores a los -200 mV, descendiendo hasta -670 mV para las mezclas sin inhibidor y -650 mV para mezclas con inhibidor. Posteriormente los potenciales vuelven a subir, pero manteniéndose en riesgo de corrosión alto, como se observa en la figura 42.

Se mantuvo las probetas en este ambiente durante 410 días. Los resultados de ensayos en probetas sin inhibidor oscilaron entre porcentajes de desviación estándar desde 3% al 10%. Con inhibidor, los porcentajes de dispersión se ubican entre 1% y 16%

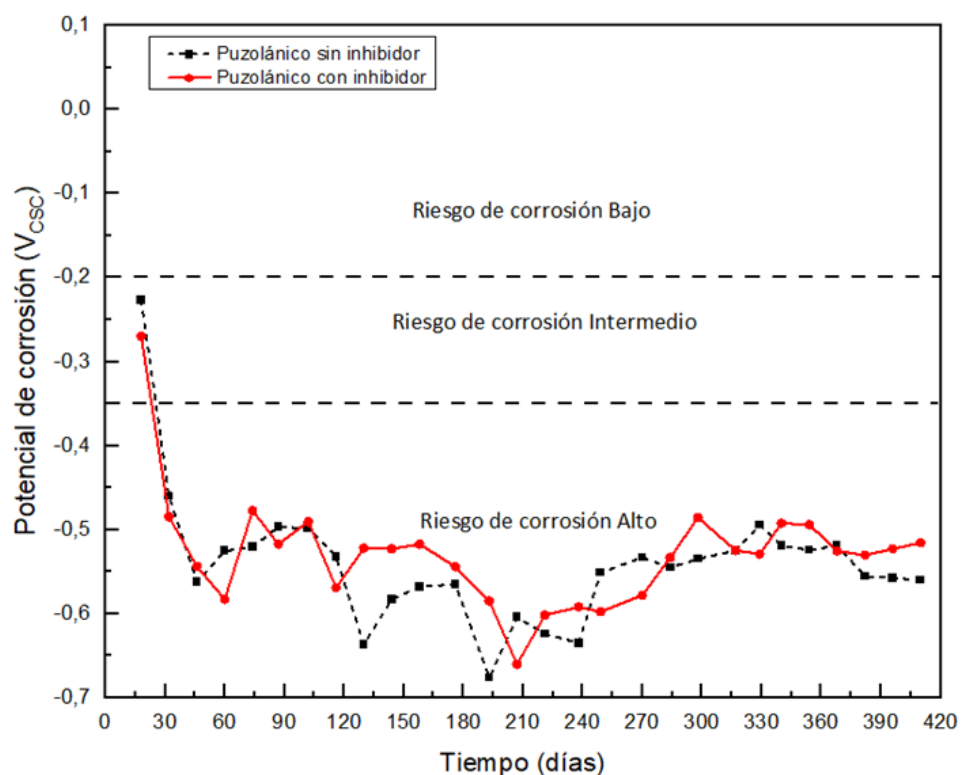


Figura 42. Potenciales de corrosión medidos durante el periodo de ensayo en muestras en agua salada.

Las probetas expuestas al **medio ambiente** también se mantuvieron en estado pasivo, con valores mayores a los -200 mV. En este caso los valores en mezclas con inhibidor son aproximadamente iguales a los obtenidos en las mezclas sin inhibidor (Figura 43). Para este medio, los porcentajes de desviación estándar de probetas sin inhibidor van desde el 4% al 17% y en probetas con inhibidor los porcentajes de dispersión varían del 2% al 26%. Durante 410 días se mantuvo a las probetas expuestas a este medio.

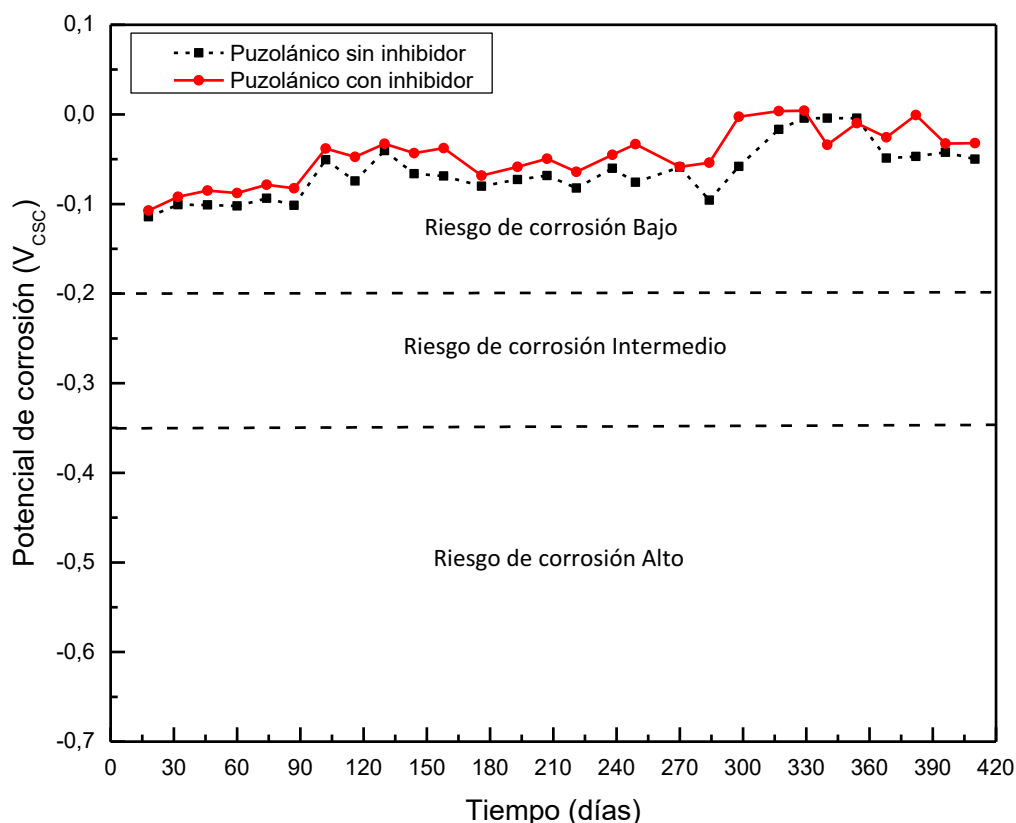


Figura 43. Potenciales de corrosión medidos durante el periodo de ensayo en muestras expuestas al medio ambiente.

3.2.3 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL: DENSIDAD DE CORRIENTE DE CORROSIÓN (i_{corr}).

Se realizaron ensayos de resistencia a la polarización cada quince días, obteniéndose 4 mediciones en cada periodo de ensayo, y el promedio de estos valores permitió resolver la ecuación 8, junto a los resultados de los ensayos anteriormente presentados.

El valor de la constante **B**, se determinó en cada periodo a partir del potencial de corrosión E_{corr} según su estado de actividad o pasividad, según la tabla 17. De acuerdo con las mediciones realizadas, sólo las armaduras en inmersión en agua salada presentaron potenciales correspondientes a valores de **B** en estado activo durante todo el periodo de pruebas, excepto en la primera medición a los 18 días de exposición al medio. Todas las demás probetas presentaron valores de estado pasivo.

El resultado obtenido de i_{corr} con el reemplazo de los valores correspondientes en la ecuación 12 se divide por el área expuesta en las armaduras o electrodos de trabajo (20 cm^2) y se obtiene la densidad de corriente de corrosión i_{corr} equivalente a la velocidad de disminución de la sección transversal de las armaduras. La tabla 18 clasifica los valores de i_{corr} en términos del nivel de corrosión indicando si es despreciable, moderado, elevado o muy elevado.

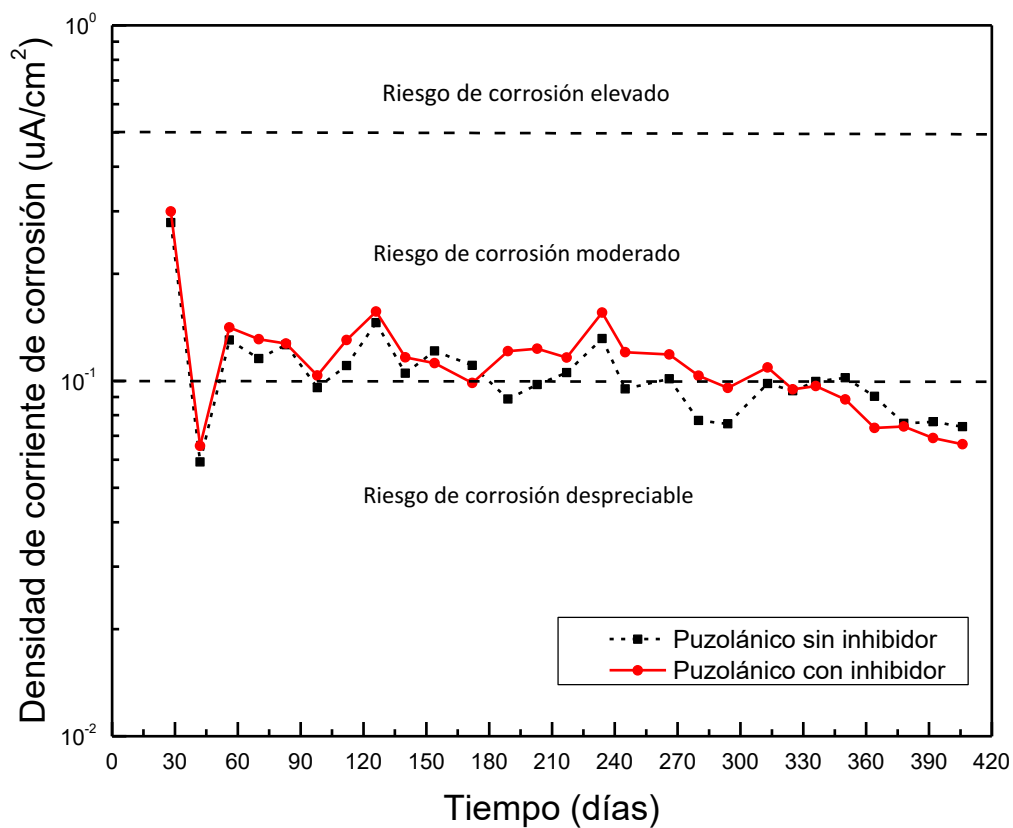


Figura 44. Densidad de corriente durante el periodo de ensayo en muestras en cámara de carbonatación.

Las probetas mantenidas en **cámara de carbonatación** reflejaron un valor inicial promedio de $0,28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en la medición realizada a los 28 días de ensayo (Figura 44). Posteriormente estos valores se fueron estabilizando en valores cercanos al límite entre riesgo de corrosión moderado a despreciable, y finalmente cerca

de los 300 días de ensayo empezaron a mostrar una tendencia hacia la zona de riesgo de corrosión despreciable.

El comportamiento fue similar para las mezclas con y sin inhibidor hasta los 406 días de ensayo. En los ensayos de resistencia a la polarización realizados se obtuvo porcentajes de dispersión del 9% al 25% en probetas sin inhibidor y los porcentajes de dispersión estuvieron entre 5% y 29% para probetas con inhibidor.

El primer valor medido en las muestras en ***inmersión en agua salada*** a los 18 días de exposición fue de 0,18 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y fue similar para las mezclas con y sin inhibidor (Figura 45). A partir de allí, las probetas sin inhibidor arrojaron valores mayores de densidad de corriente de corrosión, para la mayoría de las mediciones. Luego, en ambas mezclas los valores de densidad de corriente se mostraron en descenso, obteniendo las muestras con inhibidor densidades menores que las muestras sin inhibidor.

Durante todo el periodo de ensayos en inmersión en agua salada (410 días), estuvieron dentro de la franja de riesgo de corrosión moderado, aunque las armaduras en mezclas sin inhibidor alcanzaron valores de densidad de corriente en niveles de riesgo de corrosión elevado durante los primeros meses de ensayo. Para este grupo de probetas ensayadas, los porcentajes de dispersión estándar oscilan entre el 3% y el 15% para probetas sin inhibidor y entre 2% y 19% para probetas con inhibidor.

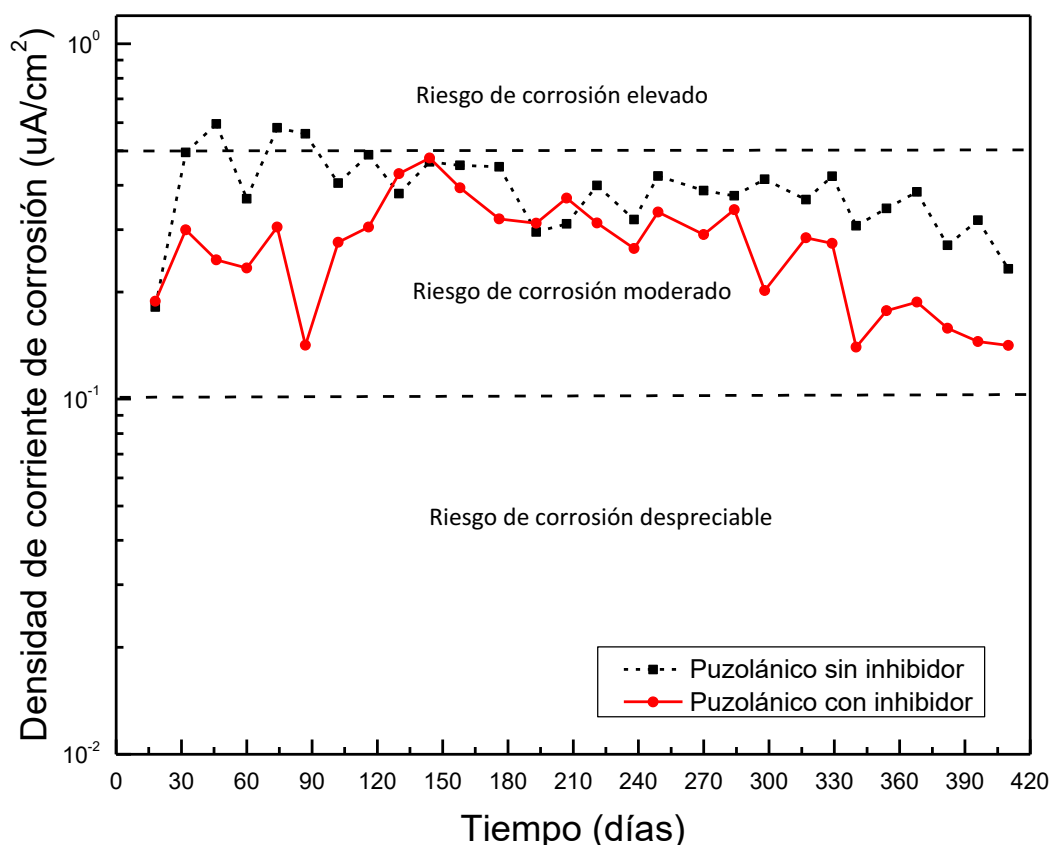


Figura 45. Densidad de corriente durante el periodo de ensayo, muestras en inmersión en agua salada.

En las probetas expuestas al **ambiente exterior** sin protección se alcanzaron valores de $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para mezclas sin inhibidor y de $0,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para las mezclas con inhibidor al inicio de los ensayos (Figura 46). Luego fluctuaron alrededor del límite entre riesgo de corrosión moderado a despreciable, sin que se revele diferencias marcadas en el comportamiento de ambas mezclas.

Los porcentajes de dispersión estándar de ensayos con probetas expuestas al medio ambiente se encuentran entre el 2% y el 21% para probetas sin inhibidor y desde 3% al 17% para probetas con inhibidor. El periodo de exposición fue de 410 días en este medio.

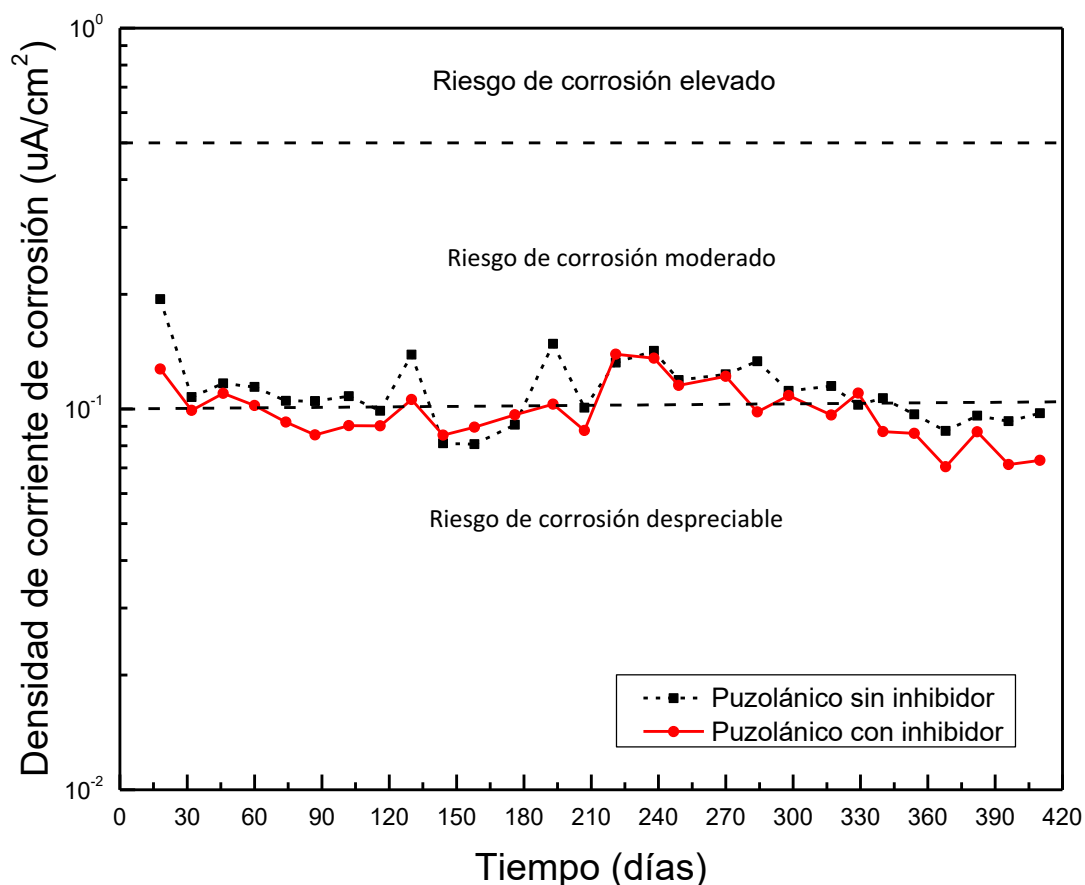


Figura 46. Densidad de corriente durante el periodo de ensayo, muestras expuestas al medio ambiente.

3.3 ENSAYOS DE DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES.

3.3.1 DIFUSIÓN DE IONES CLORURO.

En la tabla 24 se muestran los valores (medidos) de concentración de cloruros en % en masa de cemento, obtenidos en las muestras analizadas a 5 y 12 meses de exposición en probetas cilíndricas, según lo indicado en 2.2.3 y 2.3.5.1. Las secciones 1,2 y 3 indicadas de la tabla 24 están acorde al esquema de corte de la figura 35.

El valor C_0 de la ecuación 11, se obtiene de las probetas no expuestas (las que representan al tiempo de exposición $t=0$), con un valor de 0,145%; es decir que los componentes de la mezcla de hormigón o el agua de curado, aportaron iones de cloruro.

Con estos datos se realizó el ajuste del perfil de concentraciones para los dos periodos de ensayo con el software Mathcad. Los valores calculados se muestran en la tabla 24 y en la figura 47 se grafican los valores de concentración de cloruros en masa de cemento (%) medidos y calculados.

Tabla 24. Valores promedio de concentración de cloruros medidos en diferentes secciones de las probetas ensayadas.

PROFUNDIDAD (cm)	CONCENTRACIÓN DE CLORUROS MEDIDO (% en masa de cemento)		CONCENTRACIÓN DE CLORUROS CALCULADO (% en masa de cemento)	
	5 MESES	1 AÑO	5 MESES	1 AÑO
1	0,395	0,420	0,388	0,423
3	0,255	0,330	0,264	0,344
5	0,190	0,285	0,194	0,273

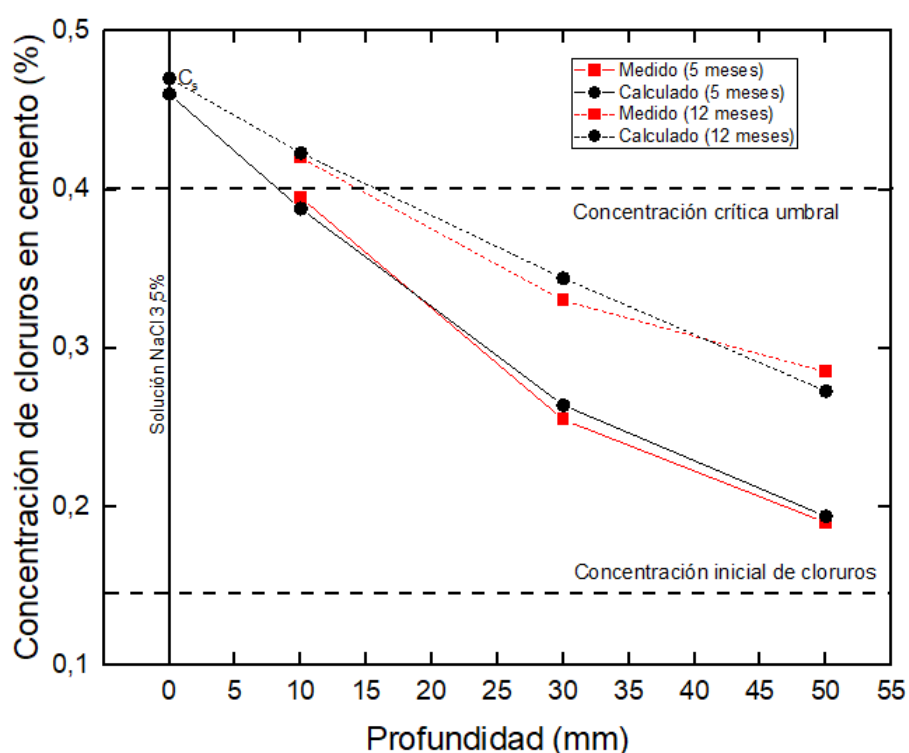


Figura 47. Concentración de iones cloruro en masa de cemento (%) en función del espesor del recubrimiento. Valores medidos y calculados.

Al resolver la ecuación 11 en Mathcad también se obtiene el valor de la concentración superficial C_s y el coeficiente de difusión efectivo, los cuales se muestran en la tabla 25. La concentración superficial para los periodos analizados, ubican a la mezcla de hormigón de cemento Puzolánico en condiciones de un ambiente marino de agresividad moderada, según los rangos indicados en la tabla 19. Los valores de coeficiente efectivo de difusión se encuentran entre los valores típicos indicados por Bamforth entre 10^{-6} y 10^{-7} mm²/s (BAMFORTH, 1996). El coeficiente efectivo de difusión y la concentración superficial fueron mayores a un tiempo de evaluación más prolongado. Aunque en teoría en las ecuaciones 10 y 11 estos valores son constantes, en la práctica esto no se cumple, debido a que el hormigón no es homogéneo y sus propiedades se modifican con la distancia desde la superficie, orientación de la superficie, condiciones de curado, variaciones en la humectación durante el periodo de ensayos, entre otros factores. (ARVA, 2003)

Tabla 25. Valores de Coeficiente de difusión efectivo y concentración superficial calculados.

Tiempo (años)	Def (mm²/s)	Cs (%)
0,417	4,102E-06	0,46
1	5,422E-06	0,47

Como se indicó en 2.3.5.1, para realizar los análisis se tomaron valores límite de profundidad promedio y concentración crítica umbral. Los valores obtenidos de concentración crítica para la profundidad promedio de 50 mm se encuentran por debajo de la concentración crítica umbral de 0,40% tomada como referencia de la tabla 21 (BAMFORTH, 1995). Los valores de C_s medidos y calculados mediante el ajuste muestran tendencias similares para ambos periodos de ensayo.

Con esta información, es posible hacer predicciones para determinar el tiempo de posible iniciación de la corrosión, cuando el valor crítico umbral de 0,40% en cloruros totales tomado como referencia haya sido alcanzado para el espesor o profundidad de penetración requerido (50 mm). Según los datos obtenidos a los 5 meses de exposición, la concentración crítica umbral de 0,40% se alcanzará a los 16,6 años, mientras que con los datos obtenidos al año de exposición la concentración crítica umbral se alcanzará a los 9,8 años. Esto se ha graficado en la figura 48.

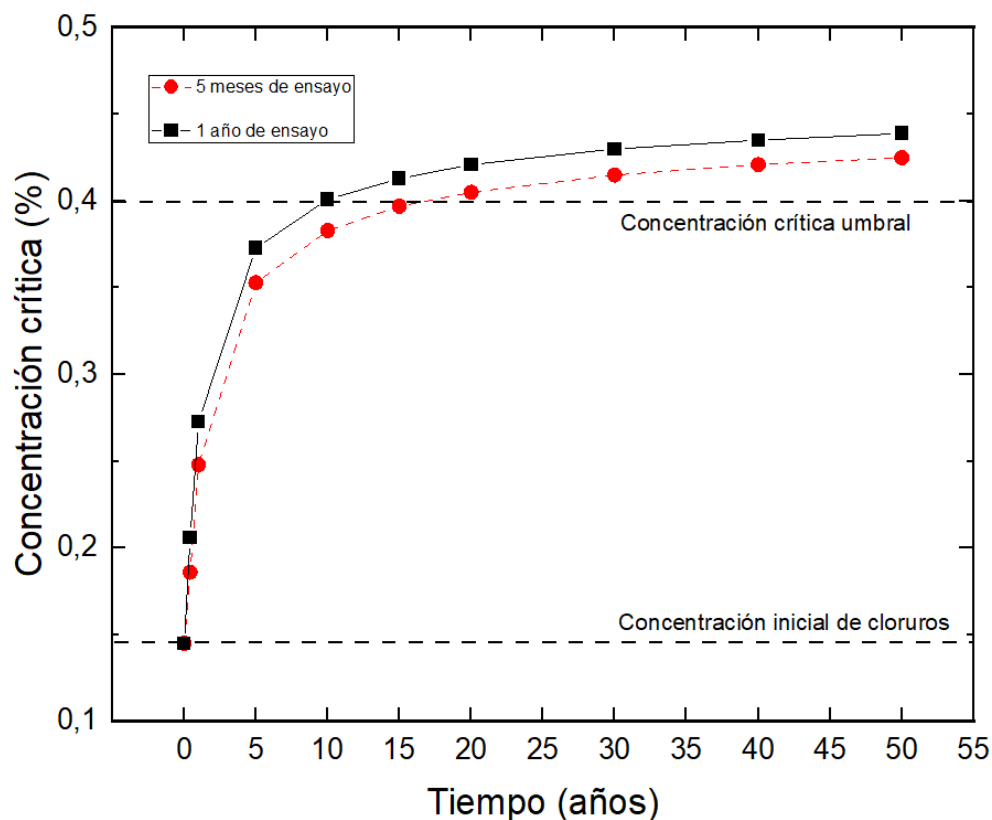


Figura 48. Concentración de iones cloruro en % de masa de cemento en función del tiempo, a una profundidad de penetración de 50 mm. Valores medidos y calculados.

A pesar de que el ingreso de cloruros al hormigón no es solamente difusivo, para estudiar el proceso, frecuentemente se emplean modelos matemáticos basados en la teoría de la difusión, a partir

del análisis de la concentración de cloruros en función de la profundidad (ARVA, 2003); asumiendo que los valores del coeficiente de penetración de cloruros y la concentración de cloruros en la parte superficial del concreto son constantes, el hormigón es homogéneo y el cloruro no reacciona con el hormigón. En la práctica, el hormigón no es homogéneo, existen variaciones en los niveles de hidratación y el coeficiente de difusión es dependiente del contenido de cloruros en el hormigón.

Las probetas cúbicas en semi inmersión en agua salada, mostraban a los 30 días de ensayos comportamientos correspondientes a riesgo de corrosión alto para los potenciales medidos y riesgo de corrosión moderado para la densidad de corriente calculada, como se observa en las figuras 42 y 45. Por medio de Mathcad se calculó que bajo los parámetros obtenidos en los ensayos de difusión de cloruros, a los 30 días se alcanzaría una concentración de cloruros de 0,29% (ensayo de 5 meses) y 0,32% (ensayo de 12 meses) a una profundidad de 1 cm, el cual era el espesor de recubrimiento real en las probetas cúbicas inmersas en agua salada. Bajo este mismo esquema, la concentración crítica de cloruros de 0,40 a 1 cm de profundidad se alcanzaría a los 242 días (ensayo de 5 meses) y 157 días (ensayo de 12 meses).

3.3.2 DIFUSIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO.

Las probetas destinadas a pruebas de carbonatación fueron ensayadas a los 122 y 364 días de exposición. En cada período se analizaron 2 probetas de la cámara de carbonatación y 1 probeta expuesta al medio ambiente externo no protegido. Se cortaron las probetas cilíndricas en 2 partes, en dirección longitudinal como se puede apreciar en la figura 49.



Figura 49. Corte de probetas para ensayo de avance de carbonatación.

Después de cortar las probetas, se limpió el polvo cuidadosamente y luego, se roció con atomizador la solución de fenolftaleína al 1% p/v en alcohol etílico. Como instrumento de medición se utilizó un vernier calibrado, con precisión de 0,5 mm.

Para las mediciones, se tomaron las siguientes consideraciones: si el frente de carbonatación es homogéneo, la profundidad de carbonatación correspondería a la cantidad medida. Si el frente es irregular, se medirá una profundidad máxima. Además, se evitará realizar mediciones sobre agregados.

Se realizaron varias lecturas en los dos frentes de cada sección. De los valores medidos se calculó una media y una mediana, tomando como valor final la mediana considerando que proporcionaría valores típicos menos afectados por la posible dispersión de valores. La tabla 26 muestra los valores obtenidos por probeta y el promedio entre las 2 probetas de cámara de carbonatación ensayadas en cada período.

Tabla 26. Mediciones de profundidad de carbonatación y cálculo de constante de carbonatación.

Tipo de probeta	Código de probeta	Tiempo de exposición (días)	Tiempo de exposición (años)	Profundidad avance CO ₂ por probeta (mm)	Profundidad promedio (mm)	K (mm/año ^{0,5})
CÁMARA DE CARBONATACIÓN	PX - D - C - 1	122	0.334	6.2	5.9	10.21
	PX - D - C - 2			5.6		
EXPOSICIÓN AMBIENTE	PX - D - N - 1			2.0	2	3.46
CÁMARA DE CARBONATACIÓN	PX - D - C - 3	364	0.997	6.8	7.5	7.51
	PX - D - C - 4			8.2		
EXPOSICIÓN AMBIENTE	PX - D - N - 2			2.7	2.7	2.70

Realizando una proyección del perfil de avance de la profundidad de carbonatación (figuras 50 y 51), con la ecuación $x = K\sqrt{t}$, presentada en 2.3.5.2, se obtiene que, para probetas expuestas al medio ambiente exterior sin protección, luego de 60 años y con los valores de las constantes obtenidas se alcanzan profundidades de 26,8 mm para 122 días y 20,9 mm para 364 días respectivamente. En probetas expuestas a la carbonatación acelerada en la cámara, la proyección de 60 años alcanzaría valores de 79,0 mm para 122 días de ensayo y 58,2 mm para 364 días.

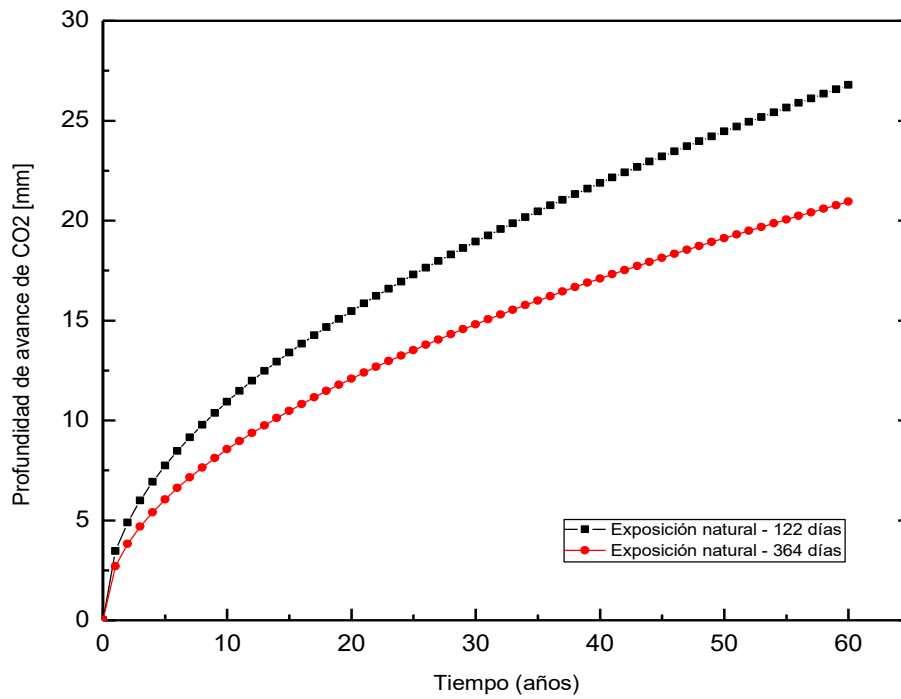


Figura 50. Proyección del perfil de avance de profundidad de carbonatación respecto al tiempo, con datos de ensayos de 122 y 364 días de exposición en medio ambiente exterior.

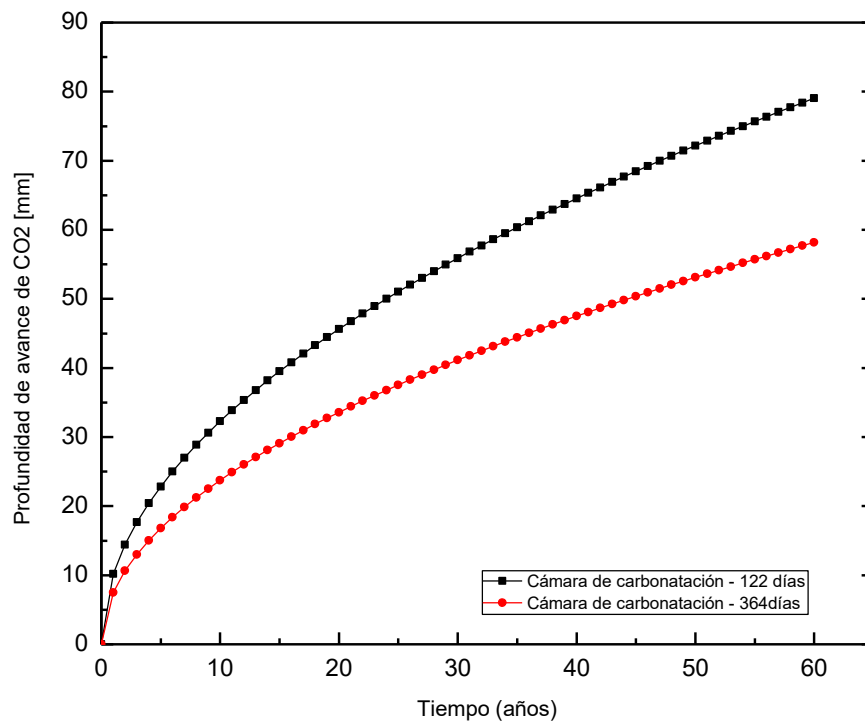


Figura 51. Proyección del perfil de avance de profundidad de carbonatación respecto al tiempo, con datos de ensayos de 122 y 364 días de exposición cámara de carbonatación a 99% de CO₂.

La cantidad máxima de CO₂ que se absorbe mediante "carbonatación natural, entre 20 y 30% (por gramos de cemento), es similar a los valores que se alcanzan con ensayos de carbonatación acelerada al 100% de CO₂ con humedad relativa entre 50 y 75%. Las diferencias en las 'velocidades' están condicionadas por la humedad ambiental" (GALÁN, 2011).

Alonso y Andrade (ALONSO, 1993) han clasificado a los hormigones expuestos al exterior de acuerdo a su valor de la constante de carbonatación: Baja calidad, a los hormigones con valores mayores a 6 mm.año^{-0,5}, calidad media/regular a los que presentan valores entre 3 mm.año^{-0,5} a 6 mm.año^{-0,5}, y de alta calidad a los hormigones con valores menores de 3 mm.año^{-0,5}. Esto ubicaría a las mezclas analizadas en calidad baja de acuerdo a los resultados de ensayos acelerados, a pesar de que el cemento Puzolánico tipo IP es considerado de uso general en el Ecuador.

3.4 MODELO DE VIDA ÚTIL DE TUUTTI.

De acuerdo con el modelo de vida útil de Tuutti, el tiempo que tardarían en llegar los contaminantes hasta las armaduras a la profundidad propuesta de 50 mm equivaldría al período de iniciación de la corrosión por acción de los procesos difusivos estudiados. En resumen, de los ensayos realizados:

Iones cloruro: La concentración crítica umbral de 0,40% alcanzaría las armaduras a la profundidad propuesta de 50 mm luego de 16,6 años (proyección con 5 meses de ensayo) y a los 9,8 años (proyección con 1 año de ensayos) como indica la figura 48.

Carbonatación: El valor de la constante de carbonatación obtenido en las probetas expuestas al ambiente exterior indicaría que la carbonatación alcanzaría el espesor de 50 mm propuesto, en 209 años para el ensayo de 122 días y 342

años para el ensayo de 364 días. Con la proyección de valores obtenidos con la cámara de carbonatación, se alcanzaría la profundidad de 50 mm de las armaduras después de 25 años (ensayo de 122 días) y 45 años (ensayo de 364 días).

CAPITULO IV:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Según la Norma NEC-SE-HM Estructuras de Hormigón Armado (NEC-SE-HM, 2014), el valor de resistencia a la compresión promedio está por encima de la resistencia especificada. De acuerdo con esto, se estaría cumpliendo con el requisito de resistencia cuando se requiere protección del refuerzo contra la corrosión, en su nivel de severidad más alto, en condiciones de "Hormigón expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos para descongelar: sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen".
2. Las armaduras de probetas mantenidas en cámara de carbonatación presentaron resultados de resistividad equivalentes a bajas probabilidades de corrosión. Los potenciales de corrosión se mantuvieron en estado pasivo en este periodo, es decir con bajo riesgo de corrosión respecto a este contaminante. Los valores de densidad de corriente de corrosión bordearon el límite entre riesgo de corrosión despreciable a moderado, con una tendencia final hacia el riesgo despreciable.
3. Las armaduras de probetas en inmersión en agua salada presentan valores de resistividad que indicarían que este parámetro no es suficiente para evaluar su probabilidad de corrosión, de acuerdo a la tabla 15. Los potenciales de corrosión demuestran riesgo de corrosión alto durante toda la fase de mediciones, es decir en estado de

corrosión activo; sin embargo, la densidad de corriente de corrosión se mantuvo con valores promedio de riesgo de corrosión moderado. Según Garcés (GARCÉS, 2020) esta diferencia se debe a que el potencial de corrosión representa la termodinámica o potencialidad que tiene el acero para corroerse, pero la densidad de corrosión se relaciona con la cinética del proceso corrosivo.

Los ensayos de difusión de este ion, indican que se obtendría una concentración crítica umbral de 0,40% en las armaduras a un espesor propuesto de 50 mm, antes de 10 años. Como se indicó anteriormente, se alcanzaría el valor propuesto de concentración crítica de cloruros umbral a 1 cm de profundidad en las probetas cúbicas, con 242 días (ensayo de 5 meses) y 157 días (ensayo de 12 meses).

4. La mezcla ensayada no sería apta para construcciones en ambientes de inmersión directa en agua salada. Las pruebas electroquímicas y de difusión aplicadas coinciden en que la corrosión de las armaduras es activa.
5. Las armaduras expuestas al medio ambiente presentaron valores fluctuantes de resistividad de acuerdo con la humedad debida a las lluvias estacionales, en el rango de probabilidad de corrosión baja a moderada. Los valores de potencial de corrosión indicaron riesgo de corrosión bajo equivalente al estado pasivo de corrosión de las armaduras. En relación con la densidad de corriente de corrosión, los resultados fluctuaron en el límite entre riesgo de corrosión moderado a despreciable. En las condiciones ambientales estándares de la ciudad de Guayaquil, las mezclas ensayadas actúan protegiendo a las armaduras respecto a la corrosión, por lo que, aun

mostrando variaciones estacionales de resistividad, no se evidencian cambios apreciables en los potenciales ni en la densidad de corrosión y encontrándose las armaduras en estado pasivo, durante el periodo de pruebas.

6. No se observa un efecto marcado por la acción del inhibidor durante el periodo de ensayos. En las mediciones finales de resistividad, potenciales y densidad de corrosión muestran comportamientos ligeramente mejores que las muestras sin inhibidor.
7. Al analizar las gráficas 38, 39 y 40, y comparar el comportamiento de la resistividad en los diversos medios de exposición, se observa una diferencia entre hormigones con y sin inhibidor en cámara de carbonatación, siendo el hormigón con inhibidor aparentemente menos resistivo. Como indica D'ANDREA, (D'ANDREA, 2010), varios autores "han demostrado que las propiedades eléctricas del hormigón están directamente relacionadas a las características microestructurales del hormigón (porosidad, tortuosidad)". Tomando en cuenta esto, ya que sólo los hormigones en cámara de carbonatación presentan diferencias leves en resistividad, no se podría concluir que hay cambios microestructurales entre hormigones con y sin inhibidor. El inhibidor de corrosión mixto tiene capacidad de migración en fase de vapor, por lo que puede viajar a través de los poros del hormigón, y condensarse en la superficie de los metales, formando capas moleculares protectoras (CORTEC, 2021), por lo que, en próximos estudios, podría evaluarse si este fenómeno de migración es el que causaría la aparente disminución de resistividad en la cámara de carbonatación.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis con diferentes diseños de hormigón para un mismo tipo de cemento y para varios tipos de cemento.
2. Aplicar diferentes técnicas de ensayo de penetración de cloruros para correlacionar resultados, por ejemplo, el Método multirrégimen (UNE 83987, 2014) o el método CTH basado en la norma NT Build 492 (NT build 492, 1999); y comparar si los valores reportados son consistentes.
3. Evaluar muestras de testigos expuestos al medio ambiente marino, para integrar el conjunto de factores que caracterizan a un hormigón en un entorno real.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO Designation T259-02, "Método estándar de prueba para Resistencia del hormigón a la penetración de iones cloruro", American Association of State and Highway Transportation, 2017.
- ACI 201.2R-01, "Guía para la Durabilidad del Hormigón", American Concrete Institute, 2001.
- ACI 201.2R-16, "Guía para la Durabilidad del Hormigón", American Concrete Institute, 2016.
- ACI 318S-14, "Requisitos de Reglamento para Concreto estructural", American Concrete Institute, 2014.
- ACI 318-19, "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural", American Concrete Institute, 2019.
- ACI 357.3R-14, "Guide for Design and Construction of Waterfront and Coastal Concrete Marine Structures", American Concrete Institute, 2014.
- ALONSO C., Lifetime of rebars in carbonated concrete. En Proceedings of the 10th European Corrosion Congress, trabajo No. 165, Barcelona, España, 1993.
- ALONSO, C., "Análisis de la concentración crítica de cloruros en la vida útil de las estructuras", Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2009.
- ALONSO, C., "Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements", Electrochimica Acta, Vol. 47, 2002.
- ANDRADE, C., "Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras", Programa temático del Consejo Superior de Investigaciones Científicas "Corrosión y protección de materiales", subprograma "Corrosión de armaduras", 1989.
- ANDRADE C., "Quantitative measurements of corrosion rate of

reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements", Werkstoffe und korrosion, Vol. 29, 1978.

- Andrade C., "On-site measurements of corrosion rate of reinforcements", Construction and Building Materials 15, 2001.
- ANDRADE C., "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method", RILEM TC 154-EMC, Materials and Structures, Vol 37, 2004.
- ANDRADE, C., "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción ALCONPAT, Volumen 1, Número 2, 2011.
- ANGST U., B. Elsener, C. Larsen, Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete-A review, Cem. Concr. Res. 39, 2009.
- ARVA A., Morris W., Alvarez M. G. y Duffó G., "Corrosión en estructuras de hormigón armado. Aplicación al contenedor de residuos radiactivos de media actividad", Comisión Nacional de Energía Atómica -Unidad de Actividad de Materiales (CAC), Jornadas SAN/CONAMET/SIMPOSIO MATERIA, 2003.
- ASTM A615/A615M - 20 "Especificación de estándar para barras de acero al carbono lisas y corrugadas para refuerzo del hormigón", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM B265-13a e1, "Especificación estándar para el titanio y aleaciones de titanio en tiras, hojas, y planchas", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2013.
- ASTM C 39/C39M-17 "Método estándar de Prueba de resistencia a la Compresión de Probetas Cilíndricas de Concreto", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2017.

- ASTM C 876-09, "Método de prueba estándar para determinar los potenciales de media celda de acero de refuerzo sin recubrimiento de hormigón", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2009.
- ASTM C1152/C1152M-04(2012)e1, "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org. 2012.
- ASTM C1157/C1157M-20a, "Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico", 2020.
- ASTM C 192/C 192M-02, "Práctica Normalizada para la Preparación y Curado de las Muestras de Ensayo de Hormigón en el Laboratorio", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2002.
- ASTM C470/470M-09 "Especificación estándar para moldes para la formación de ensayos de hormigón Cilindros verticalmente", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2009
- ASTM C494/494M-19 "Especificación estándar para aditivos químicos para concreto", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2019
- ASTM C595/C595M-20, "Especificación de estándar para cementos hidráulicos mezclados", ASTM INTERNATIONAL, www.astm.org, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM G15-08, "Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing", ASTM INTERNATIONAL, West Conshohocken, PA, www.astm.org., 2008.
- BAMFORTH, P., "Chloride penetration and service life," publicación presentada en Corrosion and protection of metals in contact with concrete - COST-509 Workshop, Sevilla, España, septiembre, 1995.
- BAMFORTH, P., "Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments",

publicación presentada en SCI 4th International symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction, 1996.

- BENTUR, A., "Steel corrosion in concrete, Fundamentals and Civil Engineering Practice", E & FN Spon, Chapman & Hall, 1997.
- BERMÚDEZ M., "Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida", Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos, Tesis doctoral, Madrid, 2007.
- BERMUDEZ, M., "La corrosión del hormigón armado en ambiente marino: Contenido crítico de cloruros", Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, 2007.
- BESNIER M., "Determinación de difusividad efectiva en la impregnación de pino radiata con silicato de sodio", Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Maderas, Escuela Ingeniería Civil Química, Concepción, 2019.
- BLANCO M., "Análisis de las corrientes de macrocelda en estructuras de hormigón armado", ETS de Ingeniería de Edificación, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2019.
- CAMPOSANO J., INECYC, Instituto Ecuatoriano Del Cemento Y Del Hormigón, notas técnicas, Hormigones de alto desempeño, Primera parte, Primera Edición, 2011.
- CASTELLOTE, M., "Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values". Corrosion Science, Vol. 44, 2002.
- CORNEJO, P., "Depósitos minerales no metálicos del Ecuador", Escuela Politécnica Nacional, Ingeniería Geológica, Quito, 2016.

- CORTEC, "MEZCLAS DE HORMIGÓN MCI®: Mejora La Durabilidad Y Alarga La Vida Útil", <https://www.cortecmci.com/mci-concrete-admixtures/>, 2021.
- CYTED, "Rocas y minerales industriales de Iberoamérica", Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto Tecnológico Geominero de España", Madrid, 2000.
- D'ANDREA R., "Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: Aplicación de la resistividad eléctrica", Tesis doctoral, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja CSIC, 2010.
- DEL VALLE A., "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado", Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica No. 182, Sanfandila, Qro, 2001.
- DUFFÓ G., "CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. Un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños", Gerencia Materiales, Departamento Corrosión, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Universidad Nacional de San Martín, CIENCIA E INVESTIGACIÓN - TOMO 69 N° 4, 2019.
- DURAR - Red temática XV.B Durabilidad de la Armadura "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo- CYTED, 1997.
- EHE-08, Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)", Gobierno de España - Ministerio de Fomento, 2008.
- ELICROM, Estándar de conductividad de cloruro de sodio, <https://elicrom.com/estandar-de-conductividad-cloruro-de-sodio-1000us-cm-500ml-1440049/>, 2021.
- FLORES J., "Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico", Instituto Politécnico Nacional, Centro

Interdisciplinario e Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, CIIDIR Oaxaca, 2008.

- GALÁN I., "Carbonatación del hormigón; combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH", Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Tesis doctoral, 2011.
- GALVELE J. R., "Degradación de materiales: Corrosión", Jorge Baudino Ediciones, 2006.
- GARCÉS P., "Corrosión de armaduras en estructuras de Hormigón Armado", Editorial Club Universitario, España, 2008.
- GONZÁLEZ J., "Corrosión en las estructuras de hormigón armado; fundamentos, medida, diagnosis y prevención", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, 2007.
- GONZALEZ J., "Valores de la constante B del método de resistencia de polarización para veinte sistemas metal-medio diferentes", Rev. Metal. Madrid, España, 1996.
- GONZALEZ, Y., "Simulación de la difusión de iones cloruro en un elemento de hormigón", Universidad Industrial de Santander, 2005.
- GREENSPAN L., "Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions", JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry Vol. 81 A, No.1, 1977.
- GRINGER, "Pacific_Ring_of_Fire" (imagen), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pacific_Ring_of_Fire-es.svg, 2009.
- HARMSSEN T., "Diseño de Estructuras de Concreto Armado", 4ª. Edición, Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial, 2005.
- HERNÁNDEZ, C., "La ceniza volcánica y los cementos con puzolanas", <https://www.eluniverso.com/opinion/cartas-al-director/la-ceniza-volcanica-y-los-cementos-con-puzolanas-nota/>, 2021.

- HILL C., Mapamundi, 100 mapas del mundo para imprimir y descargar gratis,, <https://www.tuexperto.com/2017/05/12/mapamundi-100-mapas-del-mundo-para-imprimir-y-descargar-gratis/>., 2017
- HOLCIM ECUADOR S.A., "Certificado de Producto: Holcim RMX", Doc ID: ACB0-H00-RC25, Laboratorio Planta Guayaquil, 2008.
- HOLCIM ECUADOR S.A., Memoria de sostenibilidad 2016, [https://www.holcim.com.ec/sites/ecuador/files/atoms/files/2016 memoria de sostenibilidad final.pdf](https://www.holcim.com.ec/sites/ecuador/files/atoms/files/2016%20memoria%20de%20sostenibilidad%20final.pdf), 2016.
- IMAGUI, <https://www.imagui.com/a/imagen-del-mapa-del-ecuador-y-sus-regiones-Trep6e7k8>, 2017.
- INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnico Ecuatoriano NTE INEN 102:2003, Tercera revisión, "Varillas con resaltes de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos", Primera Edición, Quito, 2003.
- INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnico Ecuatoriano NTE INEN 151:2010, Tercera revisión, "Cemento Hidráulico. Definición de Términos", Primera Edición, Quito, 2010.
- INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnico Ecuatoriano NTE INEN 2380:2011, Segunda revisión, "Cementos Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos", Primera Edición, Quito, 2011.
- INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnico Ecuatoriano NTE INEN 490:2011 Quinta revisión, "Cementos Hidráulicos. Requisitos", Primera Edición, Quito, 2011.
- KOSMATKA H., Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, 2004.
- LAMÚS F., Concreto reforzado: Fundamentos, Colección Ingeniería y salud en el trabajo, ECOE ediciones, 1ª. Edición, Colombia, 2015.

- LEÓN A., "Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador", Ambiente Construido, Porto Alegre, 2020.
- MASCIARELLI R., "Unidad No. 2: Transferencia de Materia", Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Cátedra de Ing. de las reacciones, Rosario, 2012.
- MEDINA E, "Construcción de estructuras de hormigón armado - Edificación", Delta Publicaciones, 2ª Edición, 2008.
- MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. "Concrete. Structure, Properties and Materials", 113-178. Prentice Hall, 1986.
- MERCK, Magnesium nitrate hexahydrate, https://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/Magnesium-nitrate-hexahydrate,MDA_CHEM-105853, Merck KGaA, 2021.
- MTOP, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Mapa de la ruta de los volcanes, Mapas turísticos, <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/001-Ruta-de-los-volcanes.pdf>, 2013.
- NEC-SE-HM, "Estructuras de hormigón armado", Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014.
- NRMCA CIP 25, "Corrosión del acero en el concreto", National Ready Mixed Concrete Association NRMCA, www.nrmca.org, 2008.
- NT BUILD 492, "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", NORDTEST, Finlandia, 1999.
- PÁEZ A., "Hormigón Armado", Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1986.
- PALADINES A., "La minería y el cambio de matriz productiva", diario "El Telégrafo", www.telegrafo.com.ec, junio 01, 2013.
- PANCHANA C., Influencia Del Carboxilato De Amina En La Velocidad De Corrosión Del Acero A42 En Hormigones Diseñados Con Cemento Pórtland Tipo II, Escuela Superior Politécnica

del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Ecuador, 2010.

- PÉREZ L., "Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión", Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España, 2010.
- POURSAEE, A., "Corrosion of Steel in Concrete Structures", Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 61, Woodhead Publishing, 2016.
- SALCEDO, D.; "Un año de evaluación de concreto armado expuesto a una atmósfera urbana y otra marina agresiva", Universidad del Zulia, Artículo 5410, Vecor, 2005.
- SÁNCHEZ D., "Tecnología del concreto y del mortero", Quinta edición, Bhandar Editores Ltda., Colombia, 2001.
- SÁNCHEZ L., "Mejorar la capacidad del filtro de coque en la empresa Holcim planta Guayaquil", Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial, 2011.
- SANJUÁN M., "Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland", Publicaciones de la Universidad de Alicante", 2004.
- TORRES A., "Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica No. 181, Sanfadilla; Qro, 2001.
- TORRES J., "Desarrollo de sensores de corrosión de estructuras de hormigón armado, basados en el principio de par galvánico", Universidad Nacional de San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2020.
- TUUTTI K., "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Lund University, Stockholm, 1982.
- UNE 83987, "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multirrégimen",

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2014.

- WEATHER ATLAS, 2021, <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/guayaquil-clima>.
- YORIS A., "Carbonatación del Hormigón Armado: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana", CINPAR 2010 – VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Córdoba, Argentina, 2010.