

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS	CÓDIGO	FO-GS-15	
		VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		
		APROBÓ		
		Líder de Calidad		

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): EDGAR DAVID APELLIDOS: DUARTE ROMERO

NOMBRE(S): FABIAN ANDRÉS APELLIDOS: LLAIN ASCANIO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JORGE FERNANDO APELLIDOS: MARQUEZ PEÑARANDA

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EFFECTO DE LA CARBONATACION SOBRE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CONSTRUIDAS EN CLIMAS CALIDOS

RESUMEN

Esta monografía tiene como finalidad permitir el acceso a la información publicada en revistas especializadas sobre la consecuencia de la carbonatación en las infraestructuras a base de concreto en ambientes de clima cálido. Estructurando un documento que permita identificar las variables asociadas al proceso de carbonatación, compile el estado del arte sobre el producto generado por la carbonatación en las estructuras de concreto reforzado presentes en diferentes ambientes que sean cálidos, permitiendo contrastar el proceso descrito en las diferentes condiciones ambientales presentes en la literatura especializada y finalmente presentando las patologías asociadas al proceso de carbonatación y la posible estrategia de mantenimiento sugerida para cada caso. Se planteó como objetivo principal contribuir al conocimiento del efecto de carbonatación sobre las estructuras de concreto reforzado localizadas en ambiente de clima cálido. Se llegó a la conclusión de que entre los materiales más novedosos implementados con el fin de proporcionar una mayor durabilidad al concreto son los recubrimientos hidrófobos (Vaca, 2020), estos componentes capaces de minimizar enormemente la absorción de agua del concreto.

PALABRAS CLAVE: Carbonatación, estructura, concreto reforzado, clima cálido, durabilidad

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 110 PLANOS: _0_ ILUSTRACIONES: _31_ CD ROOM: _1_

****Copia No Controlada****

EFFECTO DE LA CARBONATACION SOBRE ESTRUCTURAS DE CONCRETO
REFORZADO CONSTRUIDAS EN CLIMAS CALIDOS

EDGAR DAVID DUARTE ROMERO

FABIAN ANDRÉS LLAIN ASCANIO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTADNER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

EFFECTO DE LA CARBONATACION SOBRE ESTRUCTURAS DE CONCRETO
REFORZADO CONSTRUIDAS EN CLIMAS CALIDOS

EDGAR DAVID DUARTE ROMERO

FABIAN ANDRÉS LLAIN ASCANIO

Monografía efecto de la carbonatación en estructuras de concreto en ambientes de clima cálido

Director

JORGE FERNANDO MARQUEZ PEÑARANDA

IC Sp MSc PhD

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTADNER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 20 DE DICIEMBRE DE 2021 HORA: 04:00 p.m.

LUGAR: SUSTENTACIÓN VIRTUAL POR MEDIO DE TIC

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO: "EFECTO DE LA CARBONATACION SOBRE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CONSTRUIDAS EN CLIMAS CALIDOS".

JURADOS: ING. NICOLÁS ALFONSO CORREA DUARTE
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA

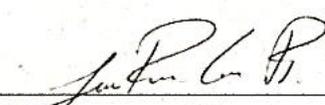
DIRECTOR: INGENIERO JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA.

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN	
		NÚMERO	LETRA
EDGAR DAVID DUARTE ROMERO	1010085	4.4	CUATRO, CUATRO

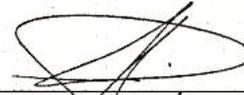
APROBADA



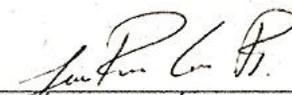
ING. NICOLÁS ALFONSO CORREA
DUARTE



ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO



ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA



Vo. Bo. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO
Coordinador Comité Curricular
Especialización en Estructuras

María del C.

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 20 DE DICIEMBRE DE 2021 HORA: 04:00 p.m.

LUGAR: SUSTENTACIÓN VIRTUAL POR MEDIO DE TIC

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

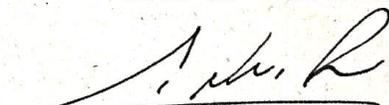
TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO: "EFECTO DE LA CARBONATACION SOBRE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CONSTRUIDAS EN CLIMAS CALIDOS".

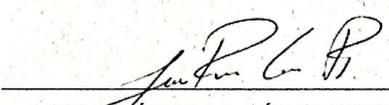
JURADOS: ING. NICOLÁS ALFONSO CORREA DUARTE
ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA

DIRECTOR: INGENIERO JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA.

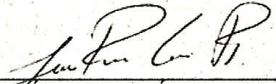
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACIÓN
		NÚMERO LETRA
FABIAN ANDRES LLAIN ASCANIO	1010093	4.4 CUATRO, CUATRO

APROBADA


ING. NICOLÁS ALFONSO CORREA
DUARTE


ING. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO


ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA


Vo. Bo. JOSÉ RAFAEL CÁCERES RUBIO
Coordinador Comité Curricular
Especialización en Estructuras

María del C.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. El Tema	14
1.1 Título	14
1.2 Generalidades del Tema	14
1.3 Objetivos de Investigación	18
1.3.1 Objetivo General	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Justificación	19
1.5 Alcance y Limitaciones	20
1.5.1 Alcance	20
1.5.2 Limitaciones	21
1.6 Delimitaciones	21
1.6.1 Delimitación Espacial	21
1.6.2 Delimitación Temporal	22
1.6.3 Delimitación Conceptual	22
2. Marco Referencial	23
2.1 Antecedentes y Estado del Arte	23
2.1.1 Antecedentes Empíricos	23
2.1.2 Estado del Arte / Antecedentes Bibliográficos	27

2.2 Marco Teórico	30
2.2.1 Concreto	30
2.2.2 Carbonatación	31
2.2.3 Corrosión Inducida por Carbonatación	33
2.2.4 Modelos de Predicción de la Profundidad de Carbonatación	34
2.3 Marco Conceptual	37
2.4 Marco Contextual	38
2.5 Marco Legal	39
3. Diseño Metodológico	41
3.1 Tipo de Investigación	41
3.1.1 Población	41
3.1.2 Muestra	42
3.2 Instrumentos para la Recolección de Información	42
3.3 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos	42
3.4 Fases y Actividades Específicas del Proyecto	43
4. Monografía Efecto de la Carbonatación en Estructuras de Concreto en Ambientes de Clima Cálido	44
4.1 El Efecto del Clima y su Influencia en los Concretos	44
4.1.1 Características de un Ambiente de Clima Cálido	48
4.1.2 Antecedentes	49
4.2. Factores Relevantes a la Hora de Estudiar la Carbonatación	52
4.2.1 Porosidad del Concreto, Humedad Relativa y Temperatura	52

4.2.2 Relación Agua / Cemento	63
4.2.3 El Tipo de Cemento	65
4.2.4 PH del Concreto y Aditivos	68
4.3 Tiempos de Observación	69
4.3.1 Resultados de estudios en tiempos de observación.	70
4.4 Tipos de Estructuras	74
5. Métodos de Prevención y Rehabilitación en Estructuras de Concreto Reforzado Propensas a la Corrosión por Carbonatación	82
5.1 Métodos Convencionales de Reparación	83
5.2 Métodos No Convencionales de Reparación	84
5.3 Realcalinización del Concreto y Criterios de Eficiencia	85
5.3.1 Principio de la Técnica de Realcalinización Electroquímica (RAE)	86
6. Referencias Bibliográficas	89

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso de carbonatación del concreto con el acero de refuerzo.	15
Figura 2. Reacciones que ocurren durante el proceso de carbonatación	17
Figura 3. Proporción de carbonatación en cada estación urbana después de 4, 8 y 12 meses de exposición	24
Figura 4. Pr Resistencia a la polarización y tasa de corrosión para el último período en cada lugar urbano de carbonatación en cada estación urbana después de 4, 8 y 12 meses de exposición	24
Figura 5. Prueba de la profundidad de carbonatación spray de fenolftaleína. Violeta: hormigón todavía alcalino, incoloro: hormigón carbonatado.	34
Figura 6. Las fases a desarrollar durante el proyecto	43
Figura 7. Demanda de agua de la mezcla de concreto aumenta con el aumento de la temperatura del concreto	45
Figura 8. Estimado de la concentración de CO ₂ en la atmósfera terrestre durante los últimos 400,000 años, Carbon Dioxide Information Analysis Center.	46
Figura 9. Aumento de la temperatura en el mundo 1970- 2020	47
Figura 10. Relación entre la porosidad y la permeabilidad al aire, para concretos con A/C de 0.50 y agregados calizos de alta absorción.	54
Figura 11. Profundidades y coeficientes de carbonatación	54
Figura 12. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.	56
Figura 13. Condiciones en cámaras controladas de “temperatura y humedad relativa”.	57
Figura 14. Probeta de hormigón de 7,5 X 15 cm	57

Figura 15. Pruebas de disolución: dominio de la temperatura en: “a) La conductividad y resistividad, b) El contenido de oxígeno, c) El valor del pH, d) La relación Cl-/OH-,e) Intensidad y potencial de consunción”	59
Figura 16. Ejemplo de evolución de intensidad de corrosión (Icorr) en el tiempo (hr de 0-1000) para cinco humedades ensayadas	61
Figura 17. Valores de intensidad de corrosión (Icorr), después de un año de ensayo (TI, total inmersión), de las probetas sometidas a las condiciones controladas a diferentes temperaturas (T, en grados celsius).	62
Figura 18. Disminución de peso de tubos con diferente analogía a/c	64
Figura 19. Propiedades del Concreto para las mezclas con a/c = 0,45, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”	65
Figura 20. Propiedades del Concreto para las mezclas con a/c = 0,65, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”	66
Figura 21. Corrosividad ambiental según la ISO9223, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”	67
Figura 22. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición para diferentes contenidos de cemento	69
Figura 23. Profundidades de carbonatación medidas en puentes de la prov. de Buenos Aires	70
Figura 24. Profundidad de carbonatación, en función del tiempo para las estructuras relevadas.	71
Figura 25. Propiedades del concreto con relación a/c 0.49 y 0.69 a 28 días.	73
Figura 26. Resultados del avance del “frente de carbonatación”	74
Figura 27. Estructura de soporte de tanque elevado	75
Figura 28. Puente vial: Atmósfera urbana	78

Figura 29. Sistema de fundación y losa de entrepiso de nave: Atmósfera industrial	79
Figura 30. Esquema de la “Realcalinización Electroquímica”.	87
Figura 31. “Mecanismos actuantes durante la RAE”	87

Introducción

La progresiva implementación en el uso del concreto a lo largo de los últimos años, ha transformado de concreto en el material de edificación industrial más implementado a nivel mundial. De acuerdo con el reporte de ASOCEM (2019), la disposición en el gasto del material de cemento ha alcanzado mundialmente los “4,129 millones de Toneladas (Mt), estimándose que su consumo (gasto) per cápita global abarco la cantidad de 557 kilogramos (Kg) de forma anual del concreto por cada habitante en el mundo, estimándose para el año 2017” (p. 3).

El concreto, en comparación con otros materiales de construcción, es de bajo costo y fácil de obtener en cualquier parte del mundo, por lo que el análisis de la resistencia de las estructuras de concreto reforzado está justificado de diferentes maneras, puesto que las averías de las infraestructuras a base de concreto generan pérdidas económicas a un grado mundialmente considerable, donde según Lee et al., (2018) la designan como “la carbonatación como el factor primordial que ocasionan imperfecciones (daños) en las construcciones de concreto armado (RC)” (p.101).

Roa et al., (2014), considera que la reacción química de la carbonatación “es el origen primordial de más frecuencia en los perjuicios representados en las estructuras de concreto” (p. 23), y aunque muchos ingenieros y contratistas pertenecientes al sector de la construcción civil se encuentran familiarizados con la afectación de la carbonatación a través del concreto reforzado y los efectos consiguientes sobre el refuerzo, es posible que algunos no estén familiarizados con las investigaciones realizadas en los últimos años. Este trabajo permitirá concentrar en un documento

las investigaciones desarrolladas recientemente relacionadas con la derivación de la carbonatación en construcciones a base de concreto dentro de los ambientes con la presencia de climas cálido.

La corrosión los materiales de acero de refuerzo, como reacción electroquímica se considera una de las principales causas que conllevan a realizar un proceso de mantenimiento, restauración y suplantación de las diferentes estructuras a base de concreto reforzado, generando inconvenientes en la resistencia de las estructuras, particularmente de las que se encuentran expuestas a un alto grado de exposición ambiental que sea severo o riguroso, como lo es la presencia de la corrosión producida por la presencia de reacción química de carbonatación por la alta presencia de CO₂ (dióxido de carbono), además de la presencia de ambientes que sean hostiles con la presencia de gases y químicos en altas concentraciones (Corral et al., 2013).

El proyecto nace de la curiosidad sobre el efecto que los agentes externos pueden tener sobre las estructuras de concreto que cumplen un largo periodo de tiempo en funcionamiento; por lo tanto, este trabajo de investigación, se realiza bajo la modalidad de proyecto investigativo y tiene como fin determinar los efectos influyentes de los agentes que promueven y aceleran la carbonatación y el efecto de este sobre el deterioro de los concretos estructurales y el acero en los diferentes proyectos civiles analizados en la literatura revisada.

1. El Tema

1.1 Título

Efecto de la carbonatación sobre estructuras de concreto reforzado construidas en climas cálidos.

1.2 Generalidades del Tema

Durante el proceso de explotación del elemento principal y el propio proceso de fabricación de concreto, se generan significativas exposiciones de CO₂ a la capa atmosférica, en especial durante el proceso de fabricación de cemento en los hornillos rotatorios (Soto, 2014).

Luego durante su vida útil, el concreto, absorbe CO₂, aunque en cantidades mucho menores a las emitidas durante su fabricación, el proceso de retención del CO₂ se denomina carbonatación, el cual representa un problema para la resistencia de las construcciones realizadas con concreto reforzado (Enciso, 2017).

La carbonatación afecta el desempeño, la calidad del servicio, la seguridad de las estructuras de concreto reforzado (RC) cuando las estructuras se encuentran ubicadas en ambientes con concentraciones importantes de CO₂. Las edificaciones realizadas con concreto reforzado se presentan en condiciones aptas a los diferentes componentes agresivos inmersos en el medio ambiente, de acuerdo con Flórez et al., (2020), la velocidad del viento y las condiciones del tiempo de curado y exposición a la luz solar son los factores que pueden producirse asociados al cambio climático sobre la durabilidad de material de concreto y la fortaleza que este presenta ante la

carbonatación. En el caso del dióxido de carbono, señalan Talakokula et al., (2016), que el gas penetra lentamente entre los poros disminuyendo el pH, creando una reacción con los hidróxidos de “calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sodio $\text{Na}(\text{OH})$ y potasio $\text{K}(\text{OH})$ ” (p.67), diluidos en el elemento acuoso del concreto, generando como resultado un componente de pH bajo, el cual se encarga de realizar un desgaste en la barra de acero de refuerzo.

Los elementos con alta vulnerabilidad para verse afectados por la carbonatación, son los que de manera permanente se hallan en exposición con CO_2 y demás gases contaminantes. Unos ejemplos de los diferentes sitios donde se encuentra este tipo de problemas son los sótanos vehiculares, puentes vehiculares, bodegas de químicos, plantas industriales, estructuras en ciudades costeras, entre otros. En la imagen presentada a continuación, se presenta de forma general el proceso de corrosión a causa de la carbonatación del concreto (León, 2020).

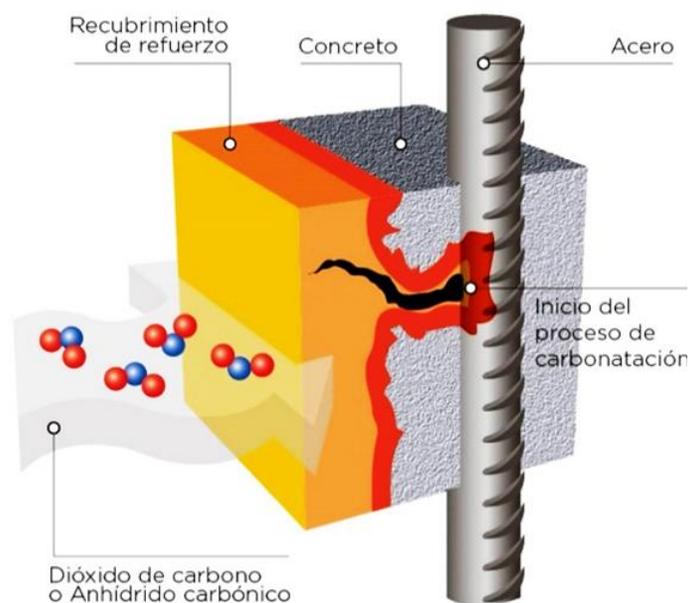


Figura 1.Proceso de carbonatación del concreto con el acero de refuerzo.

Fuente: León, (2020)

El reactivo químico de carbonatación del hormigón comenzó a atraer más atención como resultado del cambio climático, este tipo de corrosión ocurre naturalmente en estructuras RC a un

ritmo bastante lento pero invasivo (León, 2020). En aspectos generales, la corrosión es descubierta cuando se evidencian la presencia de manifestaciones de manera superficial en los elementos, entre estas se encuentran: máculas de óxido, grietas, desprendimientos del recubrimiento de concreto, entre otros (Muñoz & Gómez, 2013). No obstante, desde el momento en que se construyen las edificaciones de las diferentes infraestructuras se comienza el proceso de propagación del dióxido de carbono (CO_2) y/o los cloruros (Cl^-) por medio de las redes de poros, es por esto que en su mayoría las estructuras se ubican en cualquiera de las fases en donde ocurre la división del proceso de corrosión (Mejía, 2017).

Más específicamente, durante el proceso de la carbonatación se genera la interacción de CO_2 con el hidróxido de calcio en el hormigón, en acuerdo con establecido por Zhou et al. (2014), exponen que

“La carbonatación del hormigón (cal, cemento, arena y agua) se caracteriza por ser una reacción química del mineral de portadita, en la matriz de cemento, con gas dióxido de carbono (CO_2) que conduce a la calcita (CaCO_3), los gases a base de CO_2 se diluye en contacto con el H_2O para dar paso a la formación del ácido carbónico (H_2CO_3), reaccionando ante la presencia de hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] y se precipita principalmente como carbonato de calcio (CaCO_3), recubriendo las porosidades existentes. El agotamiento de los iones hidroxilo (OH^-) reduce el pH del agua de los poros de más de 12,5 a menos de 9,0 donde la capa pasiva se vuelve inestable, lo que permite la producción de una corrosión general, siempre y cuando la cantidad de oxígeno (O_2) sea suficiente al igual que el agua (H_2O) en las proximidades de la barra de refuerzo” (p. 107).

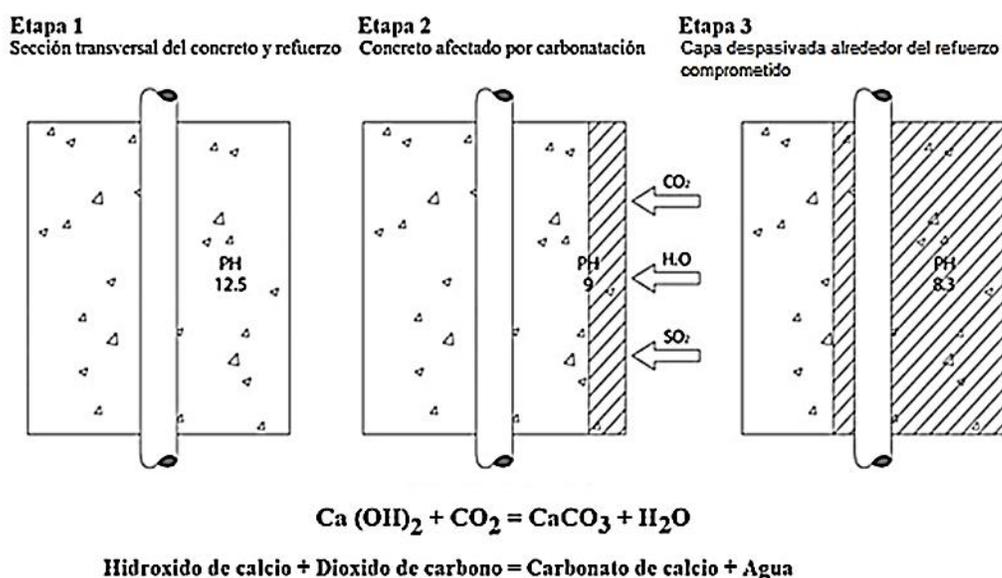


Figura 2. Reacciones que ocurren durante el proceso de carbonatación
Fuente: Zhou et al. (2014).

Algunos estudios muestran que la acción de estos agentes contaminantes progresa desde afuera hacia el interior bajo la forma de un frente carbonatado, por ejemplo, Chiné et al., (2019), plantean que

“En los ambientes interiores, la carbonatación es considerado el factor (causa) primordial en el inicio del posible efecto corrosivo del acero en el hormigón armado, siendo este problema agravado en los últimos años por el aumento de la urbanización y el tráfico de vehículos” (p.46)

Esto ha provocado una cantidad más elevada de dióxido de carbono en la capa atmosférica un problema típico en las ciudades económicamente activas de todo el mundo; por lo que es importante que, los diseñadores de estructuras de hormigón armado respondan a estas variables

climáticas asociadas al entorno urbano mediante especificaciones adecuadas para garantizar que las estructuras funcionen satisfactoriamente durante su vida útil prevista.

En Colombia, por la falta de monitoreo existente y a una deficiente política preventiva en términos de mantenimiento de obras públicas o privadas, resulta de gran importancia estudiar el proceso de carbonatación, permitiendo esclarecer las condiciones necesarias para que ocurra este proceso y los efectos que puede tener en las estructuras civiles en el país (Quimbay, 2013).

En esta monografía se busca resaltar la importancia de conocer los efectos de la carbonatación en el concreto, los cuales afectan directamente debido al deterioro prematuro y a la disminución del tiempo de servicio de las estructuras. Este trabajo tratará sobre los daños generados por la carbonatación a lo largo del tiempo en las estructuras de concreto en ambientes de clima cálido.

1.3 Objetivos de Investigación

1.3.1 Objetivo General

Contribuir al conocimiento del efecto de carbonatación sobre las estructuras de concreto reforzado localizadas en ambiente de clima cálido.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar las variables asociadas al proceso de carbonatación en las estructuras de concreto reforzado.

Compilar el estado del arte sobre las consecuencias de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado en los ambientes cálidos.

Contrastar las causas de carbonatación del concreto reforzado en los diferentes ambientes cálidos reportados en la literatura especializada.

Ejemplificar las patologías asociadas al proceso de carbonatación en diferentes tipos edificaciones.

1.4 Justificación

El comportamiento del concreto reforzado ha sido ampliamente estudiado debido a su fuerte uso como material estructural, uno de los aspectos a tomar en cuenta es el mantenimiento de las obras en uso y la carbonatación se presenta como el medio que genera un daño más acentuado en las edificaciones dentro de un ambiente urbano, aunque es necesario contar con ciertas condiciones ambientales, entre ellas, que exista humedad en el entorno de la estructura, alto contenido de CO₂ y permeabilidad en el concreto (Ruiz et al., 2017).

Por tal motivo, podemos afirmar que la ciudad de Cúcuta es un ambiente propicio para el proceso carbonatación dadas sus condiciones naturales, teniendo en la mayor parte del tiempo temperaturas altas durante el día y cambios bastante bruscos durante horas de la noche (24°C a 34°C), en promedio la humedad relativa de la ciudad está siempre por encima del 60%, es por esta razón que un proyecto investigativo de los efectos de la carbonatación en estructuras de concreto es acertado, para evaluar en un futuro las estructuras existentes y estudiar sus afectaciones para conseguir un mayor tiempo de uso y de vida útil (De Guzmán, 2001).

Esta monografía tiene como finalidad permitir el acceso a la información publicada en revistas especializadas sobre la consecuencia de la carbonatación en las infraestructuras a base de concreto en ambientes de clima cálido. Estructurando un documento que permita identificar las

variables asociadas al proceso de carbonatación, compile el estado del arte sobre el producto generado por la carbonatación en las estructuras de concreto reforzado presentes en diferentes ambientes que sean cálidos, permitiendo contrastar el proceso descrito en las diferentes condiciones ambientales presentes en la literatura especializada y finalmente presentando las patologías asociadas al proceso de carbonatación y la posible estrategia de mantenimiento sugerida para cada caso.

El aporte de esta investigación está relacionado con lograr la concentración de un solo documento la información más actualizada para comprender el proceso de la carbonatación dentro de las estructuras edificadas con concreto reforzado en ambientes cálidos permitiendo así a los ingenieros del sector de la construcción en Colombia conocer las variables relacionadas con el proceso y el mantenimiento más adecuado de acuerdo con las condiciones ambientales presentes en el país.

1.5 Alcance y Limitaciones

1.5.1 Alcance

Este trabajo pretende recopilar las investigaciones recientes dentro del campo de estudio de los efectos de la reacción química de carbonatación en las edificaciones de concreto reforzado en clima cálido a nivel mundial hasta el año 2020. Tomando en cuenta para la selección de información los siguientes aspectos: afectación del CO_2 sobre la matriz del concreto y el predominio de la saturación de agua relativa, contenida de CO_2 atmosférico y permeabilidad del concreto en el proceso de carbonatación.

1.5.2 Limitaciones

La principal limitación del proyecto es el tiempo de ejecución para la realización del mismo, debido a que es necesario revisar de manera detallada una gran cantidad de investigaciones desarrolladas en diversas partes del mundo, las mismas están publicadas en el idioma inglés. Además, solo se tomará en cuenta la información disponible a través de las bases de datos suministradas por la universidad. Por lo que es necesario resaltar que solo nos basaremos en investigaciones y experimentos ya realizados que nos permitirán sacar nuestras conclusiones para exponer un punto de vista en las regiones de clima cálido.

Por otra parte, durante el año 2020 enfrentamos una situación inédita, la aparición de la enfermedad infecciosa la COVID-19, esta pandemia sacudió todos los sectores económicos, por lo que los integrantes de este proyecto investigativo se vieron en la necesidad de distanciarse y cambiar de sitio de residencia. Este factor de alguna forma afecta los encuentros para efectuar las reuniones y trabajo conjunto, además surgieron actividades extra laborales que intervienen en el proceso evolutivo del proyecto.

1.6 Delimitaciones

1.6.1 Delimitación Espacial

La investigación documental ejecutada en la ciudad de San José de Cúcuta, departamento de Norte de Santander, Colombia, tratando de enfocar la búsqueda de resultados de las investigaciones a nivel mundial en aquellos documentos que contengan información comparable en cuanto a su clima y humedad.

1.6.2 Delimitación Temporal

Se estiman cuatro (04) meses para la elaboración de la investigación y la elaboración del documento final.

1.6.3 Delimitación Conceptual

La elaboración de la presente investigación se enfoca su atención en algunos términos en concreto, los cuales generan el mayor interés del lector, algunos de ellos son los siguientes:

Carbonatación.

Contaminación ambiental.

Contaminación vehicular.

Dióxido de carbono.

Fatiga del hormigón.

Ingeniería de estructuras.

Resistencia de materiales.

pH del concreto.

Corrosión del concreto.

Cámara de carbonatación.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes y Estado del Arte

2.1.1 Antecedentes Empíricos

Correa et al., (2008), en su trabajo “*Deterioro del concreto en ambientes urbanos de Colombia*”, determinan como composición de los agentes que causan una contaminación de manera atmosférica, entre estos el “dióxido de carbono” y la presencia de los iones de cloruro, los cuales causan una consecuencia de manera sinérgica que incrementa los procesos de degeneración del concreto. Empero, en el territorio colombiano no se nota la presencia de evaluaciones de campo en los ambientes urbanos que den paso al estudio la magnitud del daño en el concreto y la relación que este posee con la carbonatación y el propio contenido de los iones de cloruro (Cl^-). En el presente, las probetas cilíndricas de concreto se presentaron en distintas atmosferas urbanas en ciudades colombianas como Barranquilla, Bogotá y Medellín (Ver figura 3) en diferentes tipos de estaciones (industrial, comercial y residencia), con la finalidad de formar relaciones con el daño y el tipo de atmosferas (Ver figura 4) para valorar la aceleración en el proceso de corrosión de la barra de refuerzo y la proporción de la carbonatación de la probeta se utilizó la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y ensayos fisicoquímicos con fenolftaleína, correspondientemente.

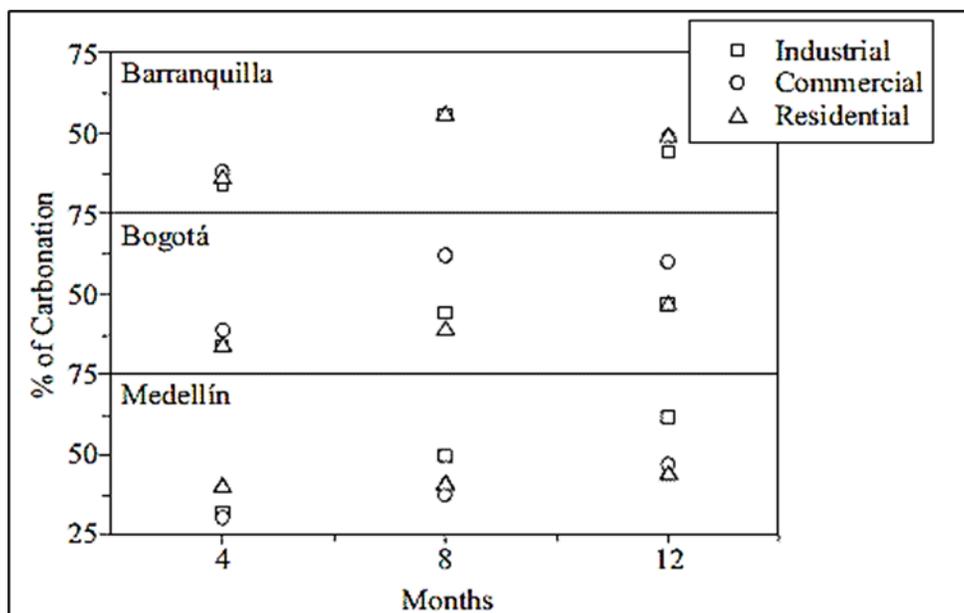


Figura 3. Proporción de carbonatación en cada estación urbana después de 4, 8 y 12 meses de exposición

Fuente: Correa et al., (2008)

Station	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	I_{corr} (mA/cm^2)	Corrosion level [15]
Barranquilla			
Industrial	55.0×10^3	0.473	Moderate
Commercial	56.5×10^3	0.460	Moderate
Residential	27.9×10^3	0.932	High
Bogotá			
Industrial	30.4×10^3	0.855	High
Commercial	27.9×10^3	0.932	High
Residential	29.4×10^3	0.884	High
Medellin			
Industrial	46.0×10^3	0.565	High
Commercial	49.5×10^3	0.525	High
Residential	52.8×10^3	0.492	Moderate

Figura 4. Pr Resistencia a la polarización y tasa de corrosión para el último período en cada lugar urbano de carbonatación en cada estación urbana después de 4, 8 y 12 meses de exposición

Fuente: Correa et al., (2008)

Troconis, (2011), en su proyecto “*Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado*”, logran indicar el choque que hay entre el ambiente en los territorios tropicales en el comportamiento de las estructuras de concreto armado, exponiendo los resultados presentados con un tiempo estimado mayor a cinco años de antigüedad del Proyecto Iberoamericano: “Efecto del Ambiente sobre la Durabilidad de la Armadura”. Para esto se arreglaron nuestras que tengan o no el soporte en las pruebas químicas, físico-mecánicas y electroquímicas, implementando los elementos que hay en los países que se encuentran participando, tales como: Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, México, España, Uruguay, Portugal y Venezuela, presentándoles en 46 estaciones. Esta investigación relaciona el dominio de los diferentes datos meteorológicos de los climas (ambientes) urbanos y marinos en el comportamiento de las estructuras de concreto armado. Estos ambientes se estudiaron, implementando la normativa ISO 9223/9225 y el concreto fue representado de manera física por medio de las normas “ASTM (*American Society for Testing and Materials*)” (Linares et al., 2006), calculado la fortaleza en relación a la compresión, el módulo de elasticidad y porosidad total, de la misma manera, desde el punto de vista de durabilidad, estimando el cálculo de los niveles de la porosidad acelerada a los iones cloruro, la permeabilidad práctica y la filtración capilar. Se mostraron los prismas de concreto de 15x15x30 cm, para las pruebas químicas de (perfil de iones cloruro (Cl⁻) y frente de carbonatación [$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$], y electroquímicas (potencial y velocidad de corrosión), proporcionalmente. De tal manera, se implementó el cemento Portland I y los materiales que hay en cada uno de los países participantes, por medio de lineamientos precisos en el procedimiento que dieron paso a la preparación de los concretos que son afines. Para esto se seleccionó dos correlaciones entre el agua/cemento (a/c): 0,45 y 0,65; donde la primera posee una capacidad reducida de cemento de 400 kg/m³ y la segunda con una

resistencia mínima a la compresión de 210 kg/cm², a los 28 días de curado. En su totalidad los resultados en los ambientes marinos y urbanos revelan los altos niveles de agresividad de los ambientes tropicales, especialmente en los lugares en donde la temperatura anual se sitúa en grados mayores a 25 °C, mereciendo esto de forma evidente demandas mayores en la calidad del concreto para estos países.

Sánchez, et al (2011) en su artículo "*Life-cycle performance of structures subject to multiple deterioration mechanisms*" ("Rendimiento del ciclo de vida de estructuras sujetas a múltiples mecanismos de deterioro"), muestran una perspectiva acerca del mantenimiento de estructuras de concreto, puesto que estudia el deterioro estructural presentado a modo de resultado en el ejercicio variado de la degradación progresiva (por ejemplo, corrosión, fatiga) y eventos repentinos (por ejemplo, terremotos). La condición estructural en un momento dado se mide en términos de la vida restante del sistema, que se define en la práctica mediante un indicador de desempeño estructural apropiado (por ejemplo, desviación entre pisos). La confiabilidad estructural se evalúa contra el diseño prescrito y los umbrales de operación que pueden usarse para establecer estados límite o políticas de intervención. El deterioro progresivo se modela inicialmente como una función determinista. El desempeño estructural con el tiempo se modela como un proceso regenerativo y se obtiene una expresión para el desempeño promedio limitante. El modelo se ilustra con algunos ejemplos y se compara con modelos similares que muestran la importancia.

2.1.2 Estado del Arte / Antecedentes Bibliográficos

A continuación, se exponen algunos trabajos investigativos sobre las consecuencias de la carbonatación en las estructuras de concreto recientemente desarrolladas:

Rimshin & Truntov (2019), en su artículo “*Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration*” (“Determinación del grado de carbonatación de estructuras de hormigón armado existentes y su restauración”), exponen los resultados que se lograron generar en el proceso de realización del estudio técnico de un edificio. De acuerdo con los resultados del estudio, se identificaron lugares con diversos grados de carbonatación. Se presenta una metodología para probar estructuras para determinar el grado de carbonatación. De acuerdo con los resultados del estudio, se identificaron lugares con diversos grados de carbonatación. Se presenta una metodología para probar estructuras para determinar el grado de carbonatación. Se muestran los resultados en la medición del grado de carbonatación en las estructuras por el método de la fenolftaleína. Los datos obtenidos muestran que la concentración de dióxido de carbono tiene un efecto significativo sobre el proceso de corrosión de las armaduras y la pérdida de la cavidad de las edificaciones durante la operación en un edificio existente. Se considera un rango favorable de valores de pH para estructuras de hormigón durante la operación. Se determina la profundidad real media de la capa de hormigón neutralizado. Se describe el método de restauración de estructuras de edificios expuestas a la reacción de carbonatación. Se estudia el impacto de la reacción química de la carbonatación en estructuras de hormigón armado durante la operación del edificio y se presentan los resultados del trabajo de restauración.

Jedidi & Belhassen (2020), en su artículo “*Carbonation of Reinforced Concrete Structures*” (“Carbonatación de estructuras de hormigón armado”), despliegan una visión general

del proceso de la carbonatación del hormigón, inseparable de este material de construcción. Durante la vida útil de la estructura, el dióxido de carbono en la atmósfera ingresa al hormigón desde la superficie del material. El dióxido de carbono (CO_2) puede entonces reaccionar con los resultados (productos) en la propia hidratación del cemento. La carbonatación cambia gradualmente la composición química y la microestructura interna del hormigón. Así, durante la viabilidad de la estructura, el hormigón atrapa el dióxido de carbono hasta un 10-15% del CO_2 emitido durante la descarbonatación de la piedra caliza necesaria para la fabricación del cemento. En la culminación de la viabilidad de la estructura esta vez se puede aprovechar la carbonatación para fijar el CO_2 en la pasta de cemento endurecido del hormigón de demolición. Los resultados recientes muestran que entonces es posible recapturar hasta un 50 a 60% de CO_2 adicional. Además, esta carbonatación es especialmente favorable para mejorar la calidad del árido reciclado del hormigón de demolición, facilitando así su reutilización.

Larrard, et al., (2014), en su investigación *“Effects of climate variations and global warming on the durability of RC structures subjected to carbonation”* (“Efectos de las variaciones climáticas y el calentamiento global sobre la durabilidad de las estructuras de RC sometidas a carbonatación”), discuten como la carbonatación afecta el rendimiento, la capacidad de servicio y la seguridad de las estructuras de hormigón armado (RC) al momento de ser colocadas en entornos con importantes concentraciones de CO_2 . Dado que la cinética de la carbonatación depende de parámetros que podrían verse afectados por el cambio climático (temperatura, presión de CO_2 atmosférico y humedad relativa (HR)), este estudio tiene como objetivo cuantificar el efecto por parte de la alteración climática en la durabilidad de las estructuras de RC sometidas a riesgos de carbonatación. Este trabajo combina un modelo de elementos finitos de carbonatación con un

enfoque de confiabilidad integral para considerar las incertidumbres inherentes al proceso de deterioro. La metodología propuesta se aplica a la evaluación probabilística de los efectos de la carbonatación para varias ciudades de Francia bajo diversos escenarios de cambio climático. Se encontró que el cambio climático y la HR local tienen un impacto significativo en los riesgos de iniciación de la corrosión.

Stefanoni, et al., (2018), en su trabajo “*Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete*” (“Tasa de corrosión del acero al carbono en hormigón carbonatado: una revisión crítica”), plantean que la necesidad de disminuir las emisiones de CO₂ y tratar de obtener materiales con una huella medioambiental reducida esté provocando una reducción del contenido de clínker en los cementos, por lo que la carbonatación del hormigón es más rápida y la corrosión del acero en el hormigón carbonatado durante la fase de propagación es cada vez más interesante para la ciencia y la práctica. Se reportan datos de tasa de corrosión para una amplia gama de tipos de cemento, relaciones a/b y condiciones ambientales. Se elaboran y discuten las correlaciones entre la velocidad de corrosión y los principales parámetros de influencia. Confirma que la aceleración en la corrosión del acero en el hormigón carbonatado no se encuentra bajo control óhmico. Más importantes son el nivel de saturación de los poros y el área efectiva del acero en contacto con los poros llenos de agua. También surge que los nuevos cementos combinados deben ser estudiados sistemáticamente con respecto al procedimiento de corrosión del acero en el concreto carbonatado, ya que el proceso de carbonatación es más rápido, el periodo de distribución de la corrosión podría convertirse en una parte relevante de la vida útil total, por lo tanto, una implementación confiable de las tasas de corrosión en el diseño estructural es importante.

Czarnecki & Woyciechowski (2015), en su artículo “*Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?*” (“Modelado de carbonatación de hormigón; Es un proceso ilimitado en el tiempo y restringido en el espacio”), plantean la modelización matemática del proceso de carbonatación fundado en los resultados de los trabajos investigativos ejecutados en condiciones aceleradas como naturales. El artículo cubre brevemente las características de la carbonatación, sus procesos y efectos; también incluye una revisión crítica de los artículos relacionados con los modelos matemáticos de carbonatación. Suponiendo la naturaleza autolimpiante de la carbonatación, se realizó un tipo hiperbólico de carbonatación. Este tipo describe el progreso de la carbonatación como el proceso indeterminado en el tiempo, teniendo la categoría limitada en la profundidad del concreto que esta reducido por el por el valor de una asíntota de este tipo. Los resultados presentados cubren la investigación sobre la carbonatación del hormigón con una correlación entre el agua-cemento diferente de aglutinantes y tiempos de duración del curado temprano. Se han realizado investigaciones tanto en forma acelerada (concentración de CO₂ al 1%) como en exposiciones a largo plazo en condiciones naturales. Los resultados obtenidos ratificaron estadísticamente que el tipo hiperbólico es un enfoque bien fundamentado cuando se trata del proceso de modelado de carbonatación del hormigón.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Concreto

El concreto (hormigón) se compone de la unión entre dos elementos: los agregados y pasta. La pasta, conformada por cemento portland y agua, en combinación con los agregados,

generalmente de arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), formando una masa parecida a una roca La norma UNE-EN 197-1 (2011), lo define

“Cemento Portland es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente dividido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de un conjunto de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia mecánica y estabilidad, incluso bajo el agua” (p.17).

La composición típica del cemento Portland es de 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ y 3% de otros componentes. Habitualmente, comprende de cuatro ciclos mayoritarios: la alita o silicato tricálcico (3CaO·SiO₂), la belita o silicato dicálcico (2CaO·SiO₂), el aluminato tricálcico (Al₂O₃·3CaO) y el ferroaluminato tetracálcico (Al₂O₃·4CaO) (Bolognini et al., 2015).

2.2.2 Carbonatación

La carbonatación del concreto, es el medio donde el dióxido (bióxido) de carbono del aire se impregna dentro del concreto y produce una reacción con los hidróxidos, como lo son los hidróxidos de calcio para conformar carbonatos. En correlación con el hidróxido de calcio se ve la presencia de la formación de carbonato de calcio. De acuerdo con Kosmatka et al, (2004) la carbonatación y el secado rápido del concreto fresco pueden “llegar a crear consecuencias en la resistencia (durabilidad) de la superficie, sin poderlo prevenir con el curado pertinente” (p.53). La carbonatación del concreto endurecido no ocasiona ningún tipo de daño en la matriz del concreto. No obstante, la carbonatación minimiza los niveles de la alcalinidad (pH) del concreto. Esta alta

alcalinidad (pH) del concreto. La alta alcalinidad es útil para generar una protección de la armadura (refuerzo) frente a la corrosión, y como consecuencia el concreto ha de ser resistente a la carbonatación para poder prevenir la corrosión del acero de refuerzo (Marcondes et al., 2015).

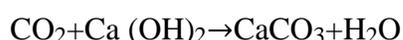
La discusión sobre el comportamiento del hormigón se basa generalmente en la suposición de que el medio ambiente es aire que no reacciona con la pasta de cemento hidratada; sin embargo, Laguna & Mamani, (2019) exponen que

“El aire contiene CO_2 que, ante la manifestación de humedad genera una reacción con el cemento hidratado; el agente real es el ácido carbónico porque el CO_2 gaseoso no es reactivo. De acuerdo con Neville (2011), la acción del CO_2 tiene lugar incluso en pequeñas proporciones, tomando como ejemplo las que se presentan en el aire rural, donde el contenido de CO_2 es de aproximadamente el 0,03% en volumen” (p. 45).

Así mismo, se conoce que sí en un laboratorio sin ventilación, el contenido puede elevarse por encima del 0,1 por ciento; en las grandes ciudades es, en promedio, del 0,3% y, excepcionalmente, del 1%. Un ejemplo de hormigón expuesto a una concentración muy alta de CO_2 lo ofrece el revestimiento de túneles vehiculares (Aite, 2017). La tasa de carbonización del hormigón aumenta con un aumento en la concentración de CO_2 , especialmente a altas relaciones agua/cemento, teniendo lugar el transporte de CO_2 a través del sistema de poros en la pasta de cemento endurecida (Priano, 2011).

2.2.3 Corrosión Inducida por Carbonatación

La despasivación del acero de refuerzo se produce al momento en que el entorno alcalino del hormigón ha sido neutralizado por carbonatación, la reacción del dióxido de carbono de la atmósfera con los componentes alcalinos del hormigón:



Esta reacción ocurre solo en presencia de agua, porque el CO_2 tiene que disolverse en agua, formando ácido carbónico que luego neutraliza los componentes alcalinos. La tasa de carbonatación del hormigón se rige por su porosidad (fácil acceso de CO_2), la concentración de CO_2 en la atmósfera, la humedad relativa (RH) (los poros capilares están abiertos) y la cantidad de componentes alcalinos, principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que tienen que ser neutralizados (Romero, 2020). La reacción de carbonatación del cemento Portland ordinario es bien conocida y, en condiciones ideales de prueba (65% de HR), sigue una ley de OT debido a la difusión de CO_2 progresivamente obstaculizada. Por lo general, la entrada del frente de carbonatación en el hormigón va seguida de la pulverización de una solución del indicador fenolftaleína sobre una superficie recién dividida, las áreas que aún son alcalinas ($\text{pH} > 11$) muestran un color rosa y las áreas que ya están neutralizadas (carbonatadas) son incoloro (ver Figura 3). Esta prueba de indicador da una respuesta “sí / no”, pero no permite los siguientes cambios de pH en el concreto durante la carbonatación que podrían ser importantes para la durabilidad (López & Arellano, 2008).



Figura 5. Prueba de la profundidad de carbonatación spray de fenolftaleína. Violeta: hormigón todavía alcalino, incoloro: hormigón carbonatado.
Fuente: Díaz, (2014)

En el estudio realizado por Galán (2012) en donde estudia la Carbonatación del hormigón: en la combinación de CO_2 con las etapas hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Presenta el Modelos de predicción de la profundidad de carbonatación, en donde establece una serie de fórmulas en las que se explican las siguientes:

2.2.4 Modelos de Predicción de la Profundidad de Carbonatación

En su mayoría, las partes de los modelos que preexisten para pronosticar la profundidad de carbonatación en el hormigón con base en las soluciones de la ecuación de difusión de la ley de Fick, con la expresión básica de matemática, Galán, (2012) considera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Donde C , representa, la concentración de CO_2 , D el coeficiente de difusión, t el tiempo y x la profundidad de penetración del CO_2 .

La solución de esta ecuación, dependiendo de la variación en las condiciones iniciales y en el alrededor da paso a maneras de dar una solución, basadas en determinados modelos que serán explicados posteriormente. El modelo más fácil proviene de la resolución de la presente ecuación estimada la “profundidad” de carbonatación proporcional a la raíz cuadrada del tiempo según la siguiente expresión:

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

En donde x es considerada como la hondura de penetración del agresivo, CO_2 , (mm), k es la ‘velocidad’ de avance del mismo ($\text{mm/año}^{1/2}$) y t es el tiempo (año). Calculando la constante de proporcionalidad o “velocidad” de carbonatación para un cierto tiempo, esta ecuación se puede utilizar para predecir ‘profundidades’ a diferentes edades del hormigón (Flores, 2014).

Diversos escritores han determinado enunciados para poder valorar el valor del cálculo de la “velocidad” de carbonatación en virtud de diferentes factores, tales como: la resistencia mecánica, la concentración de CO_2 , la temperatura, el tiempo de curado, el tipo de cemento, o la humedad relativa. Investigadores entre los cuales resaltan “Tuutti, Bakker, Papadakis y Castellote,” entre otros, proponen diferentes modelos enfocados en el coeficiente de difusión del CO_2 , por su parte, Parrott realiza su modelo en virtud de la permeabilidad al aire. Presentándose un modelo en donde se estudiará las diferentes fórmulas:

El modelo de Tuutti, se encuentra fundado en la expansión de los límites móviles, considerando que el frente de carbonatación mejora según el prototipo de la raíz del lapso y

presume que todo el CO_2 responde con las etapas sólidas de forma que detrás del frente de carbonatación, la concentración de CO_2 es cero, mientras que delante de él es 100%. Según Tuutti la zona de reacción está bien definida por un “frente abrupto” (Cabana & Yupanqui, 2020).

La expresión propuesta para formar pronósticos de la “profundidad” de carbonatación a diferentes momentos en esta fórmula (Passos et al., 2019):

$$\frac{C_s}{C_x} = \sqrt{\pi \cdot \left(\frac{x/\sqrt{t}}{2 \cdot \sqrt{D}}\right) \cdot \exp\left(\frac{x^2/t}{4 \cdot D}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x/\sqrt{t}}{2 \cdot \sqrt{D}}\right)}$$

C_s es la concentración ambiental de CO_2 (kmol/m^3), C_x es la concentración de CO_2 mezclado en el hormigón (kmol/m^3), x es la profundidad de carbonatación (m), t es el tiempo (s) y D es el coeficiente de difusión (m^2/s). Para calcular el CO_2 ligado en el hormigón Tuutti maneja la siguiente fórmula (Passos et al., 2019):

$$C_x = \frac{C_a \cdot HD \cdot c}{56}$$

Donde C_a es la concentración de CaO en el cemento (kg CaO/kg cemento), HD es el nivel de hidratación, c es la cantidad de cemento por m^3 de hormigón (kg/m^3) y 56 es el peso molecular del CaO . Para conseguir una estimación del cálculo del grado de hidratación Tuutti presenta una tabulación en la cual vincula el grado de hidratación con la correspondencia a/c . Tuutti establece que la difusión tiene parte en estado no estacionario y que el coeficiente de difusión es invariable y está en función exclusivamente de la cantidad de humedad del hormigón. Para calcular el

coeficiente de propagación presenta unos diagramas de la difusión positiva del oxígeno en función de la relación a/c y de la humedad relativa para diferentes tipos de cementos y de relaciones a/c. No obstante, los coeficientes de difusión del CO₂ y del O₂ no son similares, Tuutti establece que, condicionalmente, el contenido en humedad del hormigón es la cuantificación para la expansión de los gases, se consiguen adquirir proporciones satisfactoriamente referentes (Passos et al., 2019). Todas estas fórmulas tomándolo en consideración como términos importantes para poder generar los resultados óptimos para la evaluación del presente trabajo.

2.3 Marco Conceptual

A continuación, se presentan los conceptos fundamentales relacionados con el resultado de la carbonatación en las estructuras de concreto reforzado.

Cemento. Según Giordani & Leone (2017) establecen que, en aspectos generales, el cemento es descrito como materia prima para la construcción con propiedades de adhesión y cohesión, que permiten unificar los fragmentos minerales que forman una materia compacta, este concepto está relacionado a una diversidad de materiales de cementación

“Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos: Los cementos que se utilizan en la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que

experimentan una reacción química con ella y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos” (p.2)

Concreto Reforzado. Con base a lo establecido por Orta (2019), el concreto reforzado es aquel que “incluye varillas de acero o refuerzo. Está diseñado para resistir esfuerzos de compresión y tensión. Se aplica en la construcción de elementos estructurales como: vigas, columnas, entrepisos, muros de corte, etc. En el diseño de estructuras de concreto reforzado es práctica común usar resistencias a compresión superiores a 3000 PSI que equivale a 210 Kg/cm²” (p. 5)

Carbonatación. Montani (2021) establece la carbonatación como la pérdida de “pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral” (p.23).

2.4 Marco Contextual

No aplica; debido que, este proyecto está orientado a la investigación documental sobre el resultado de la carbonatación en estructuras de concreto en ambientes de climas cálidos y la información obtenida puede ser de interés en el ámbito nacional.

2.5 Marco Legal

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial decreta en 2010, el “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10” (“la norma sismo resistente 10”), siendo el reglamento colombiano con la responsabilidad de regularizar las condiciones físicas en las construcciones, con el propósito de que el resultado frente a fenómenos sísmológicos sea de manera positiva, realizando una descripción del concreto en su título C

“Materiales: Ensayos de materiales, se indican las responsabilidades del constructor y del supervisor técnico respecto a la calidad de los materiales utilizados en construcción en concreto reforzado y como coordina el Título C con el Título I del Reglamento NSR-10. Materiales cementantes, se definen los cementos de acuerdo con los cementos que se producen en Colombia” (p. 13)

Por su parte, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, plantea en 1999 las Normas Técnicas Colombianas NTC 4595 y NTC 4596. El ICONTEC”, siendo el “Organismo Nacional de Normalización de Colombia, tiene en sus ocupaciones recalcar la realización de dos normas técnicas y certificar con las reglas de calidad para compañías y acciones competitivas. Este instituto es quien representa a la “Organización Internacional para la Estandarización (ISO)”, en el país colombiano. En relación a la normalización, el objetivo de este es suscitar, desplegar y orientar la diligencia de

“Normas Técnicas Colombianas (NTC)” y en conjunto con otros dos instrumentos legales, con la finalidad de lograr conseguir un sistema económico que sea óptimo de conjunto, las mejoras en base a la calidad y permitir paso a las correlaciones cliente-proveedor dentro de los contextos empresarial nacional o internacional” (p.8)

Finalmente, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (“*American Society for Testing and Materials* o *ASTM International*”) (ASTM, 2021), corresponde a una institución de reglas internacionales, encargados de desarrollar y publicar acuerdos efectuados de manera voluntaria de la estructura de dos normativas sistemáticas para una extensa variedad de materiales, bienes, procedimientos y servicios, con la existencia estimada de 12.575 pactos facultativos de pautas de diligencia internacional.

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

La presente investigación, se considera de tipo descriptiva, de carácter documental basada en artículos escritos en revistas técnicas especializadas (Hernández & Mendoza, 2018); y estará enfocada en la recopilación de información de artículos e investigaciones relacionadas al argumento de “carbonatación en estructuras de concreto reforzado”, realizando un estudio en donde se resalte lo más importante y significativo de cada investigación, se ejecutará el análisis de seis artículos por cada semana con un resultado como mínimo de 50 artículos ya evaluados

Esta monografía pretende estudiar la carbonatación en clima cálido, más específicamente en climas similares al presente en la ciudad de Cúcuta, para realizar un enfoque local y buscar una correlación entre el proceso de carbonatación en clima cálido y otros tipos de clima, y así lograr una conclusión final que nos sirva de beneficio para futuras investigaciones en la región.

3.1.1 Población

La población corresponderá a las investigaciones desarrolladas y relacionadas con la carbonatación de estructuras de concreto reforzado accesibles en bases de datos en línea (Quintero, 2003).

3.1.2 Muestra

Se tomará una muestra intencional de aquellas investigaciones desarrolladas en fechas recientes accesibles mediante bases de datos como *Sciencedirect*®, Google académico, además de otras fuentes como tesis y normas nacionales e internacionales aplicables al tema en estudio (Quintero, 2003).

3.2 Instrumentos para la Recolección de Información

En esta monografía se utilizarán fuentes de información secundaria, específicamente bases de datos tales como: *Sciencedirect*®, Google Académico, para la búsqueda, depuración y selección de los artículos que servirán de referencia para el trabajo (Flores et al., 2013).

3.3 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Datos

En la investigación presentada se efectuó un trabajo enfocado en la compilación, análisis y compilación de la información seleccionada a lo largo de todo el proceso productivo del documento, para poder así entender y asimilar de forma sencilla el proceso de carbonatación en las estructuras, y como se puede evaluar el estado de afectación estructural debido a los estudios presentes (Rojas, 2011).

3.4 Fases y Actividades Específicas del Proyecto

A continuación, se especifican las etapas del proyecto investigativo en proceso.

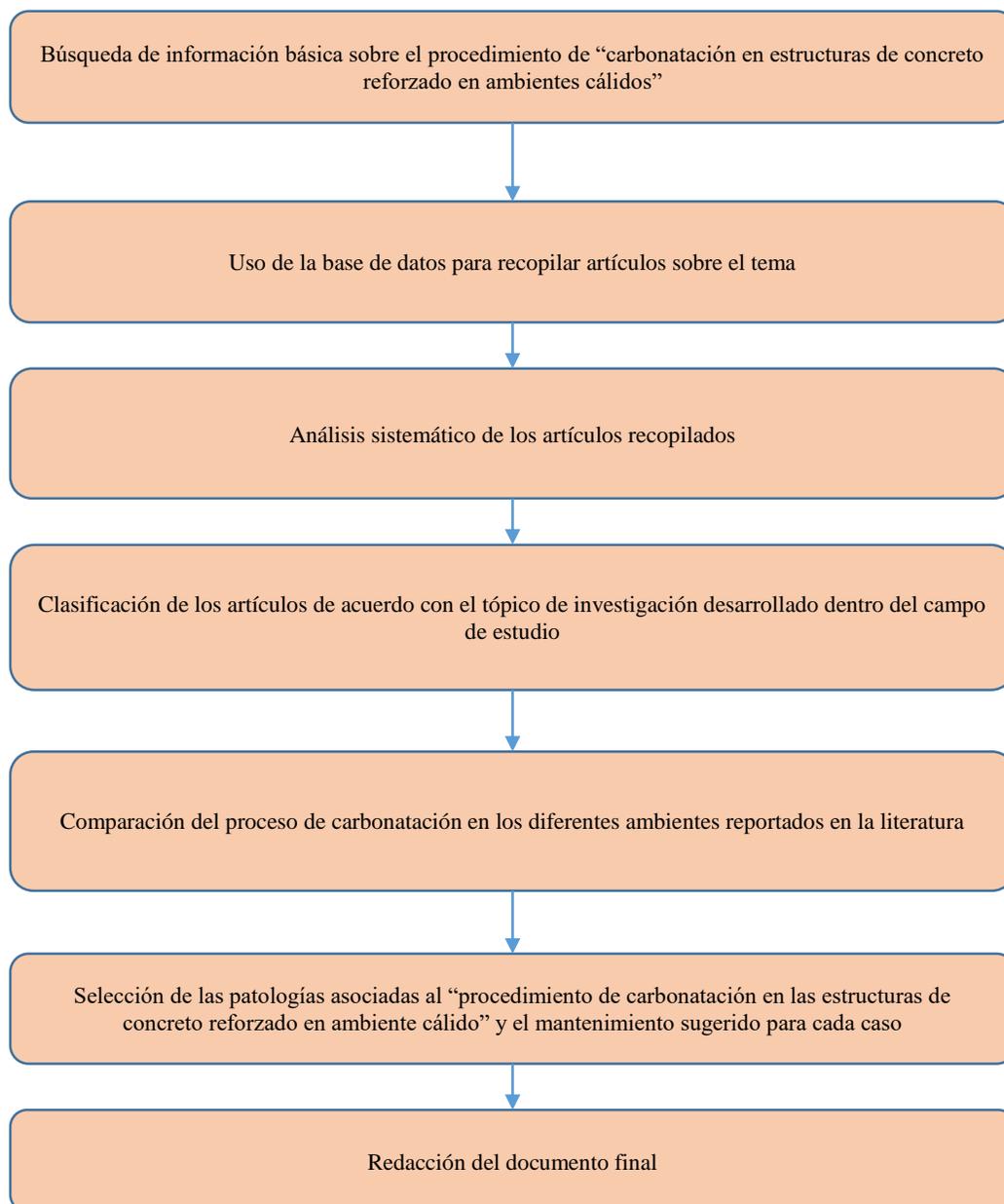


Figura 6. Las fases a desarrollar durante el proyecto

4. Monografía Efecto de la Carbonatación en Estructuras de Concreto en Ambientes de Clima Cálido

El estudio en cuestión se desarrolla con resúmenes que salen de la indagación de documentos, revistas, libros y proyectos de grado en donde realizaremos una síntesis e indagación crítica de cada uno de ellos para que al finalizar podamos tener una monografía que aporte conceptos claves, señale aquellas zonas e interrogantes que han quedado aún sin resolver con el fin de promover el desarrollo de más investigaciones sobre estos temas (Acuña, 2015).

4.1 El Efecto del Clima y su Influencia en los Concretos

Los climas cálidos son característicos por tener factores muy importantes en el comportamiento del concreto, los cuales están asociados desde el vaciado del concreto, el fraguado regular de 28 días en una mezcla sin acelerar, hasta el curado total. Dentro de estos factores podemos resaltar los siguientes como los más importantes: “temperatura ambiente, temperatura del concreto, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar” (Tinen, 2018). Estas situaciones suelen originar tasas de evaporación muy altas que hacen que el proceso de fraguado sea más rápido y se necesite una hidratación del material continua para evitar fisuraciones generadas por la contracción del concreto en el secado. Esto nos lleva a concluir que las elevadas temperaturas independientemente ocasionan un acrecentamiento de la solicitud de recurso hídrico (Orozco et al., 2018).

En la figura que se presenta a continuación, citada en base a lo realizado por Kosmatka, et al., (2004) en el libro “Diseño y control de mezclas de concreto”, donde se presenta que si la temperatura del concreto fresco incrementa de 10°C para 38°C (50°F para 100°F), se hace necesario cerca de “20 kg/m³ (33 lb/yarda³) de agua adicional para mantener el revenimiento de 75 mm (3pulg.) Esta agua adicional podría disminuir la resistencia en 12% a 15% y producir cilindros (probetas) con resistencia a compresión que no cumplen las especificaciones” (p. 274)

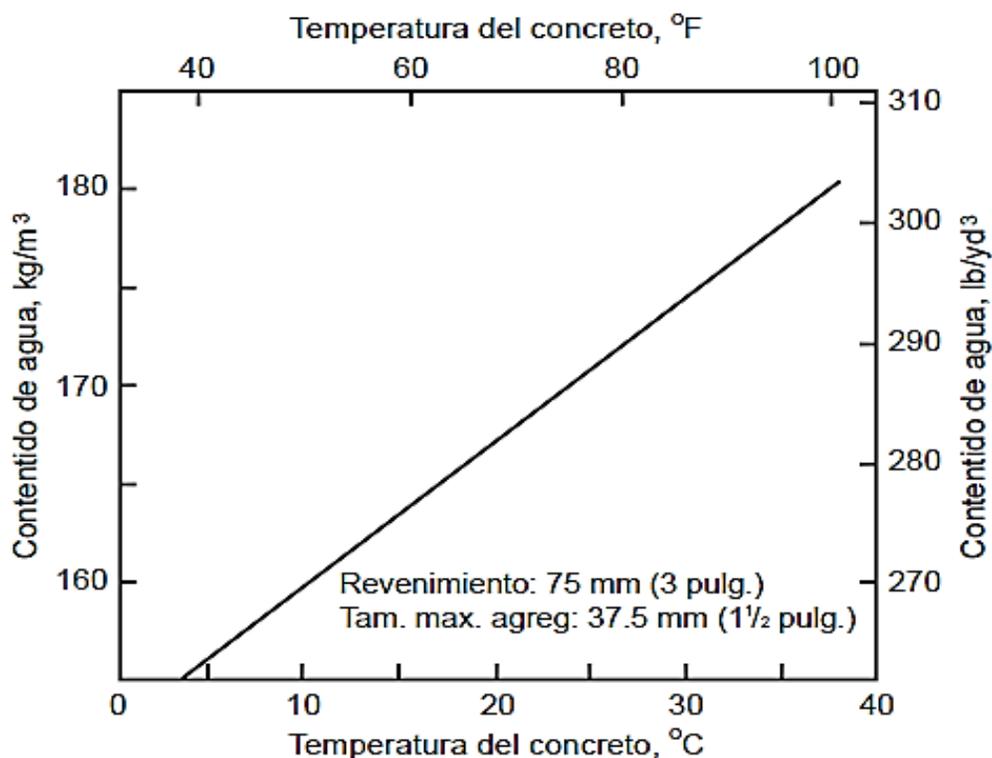


Figura 7. Demanda de agua de la mezcla de concreto aumenta con el aumento de la temperatura del concreto

Fuente: (Price & Ortolano, 1981), citada por Kosmatka, et al., (2004)

De esta forma se puede dar inicio a esta investigación y deducir que, los climas cálidos son más propensos a situaciones extremas de curado, que permiten que a futuro se puedan observar

muy comúnmente el inicio de patologías como en este caso que estará más enfocado en la carbonatación (Gutiérrez, 2021).

Es importante también hablar sobre el aumento en las concentraciones de CO₂ y el cambio climático, según Carbon Dioxide Information Analysis Center la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha aumentado en un promedio de 100 ppm (de 280 ppm a 380 ppm) (ONU; 2020), la figura a continuación, muestra el crecimiento estimado en las concentraciones de CO₂ atmosféricas (Mehta & Monteiro, 2008).

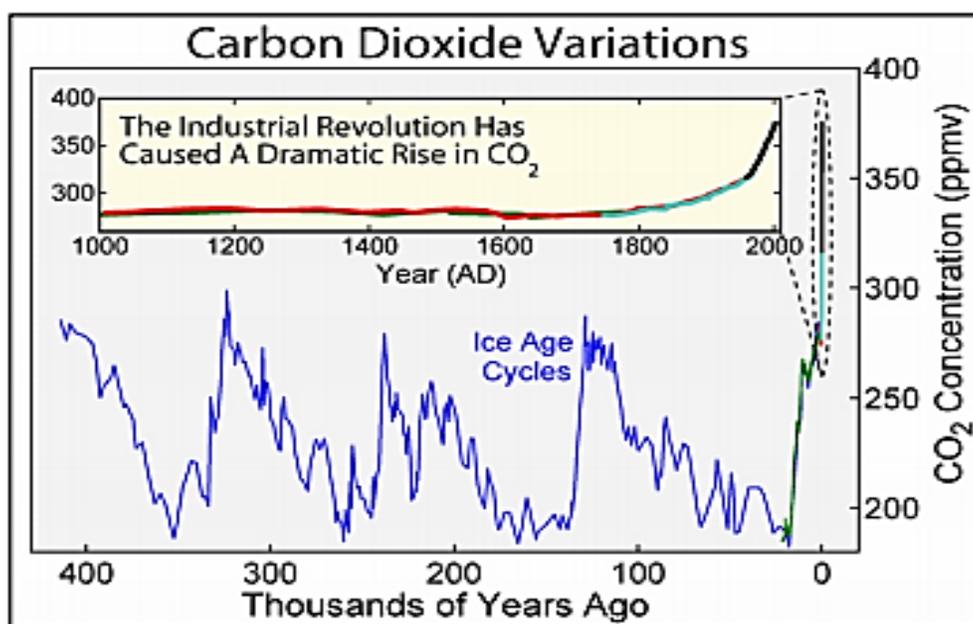


Figura 8. Estimado de la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre durante los últimos 400,000 años, Carbon Dioxide Information Analysis Center.

Fuente: Linares & Camero, 2010.

También es necesario mencionar que los altos niveles de CO₂ traen como consecuencia las altas temperaturas, estas variaciones se ven reflejadas en la siguiente figura.

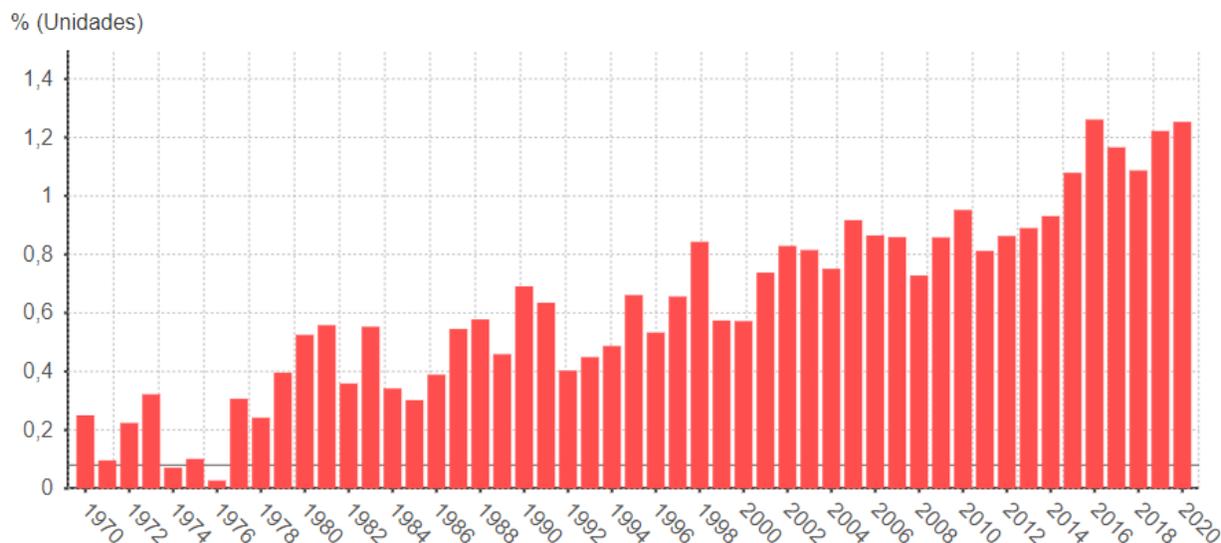


Figura 9. Aumento de la temperatura en el mundo 1970- 2020
Fuente: Copernicus Climate Change Service/ECMWF (2021)

Estos datos son importantes porque que no solo afectan al sector de la construcción dentro de la temática tratada, también afectan la producción agrícola, el en área de la salud, y otras áreas igual de importantes a día de hoy en el mundo.

En la investigación “Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect” de Kim et al., (2017), encontramos que los gases de efecto invernadero que intervienen en el calentamiento global incluyen varios tipos de componentes químicos, como el dióxido de carbono (CO₂), los perfluorocarbonos (PFC), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄). Además, el cambio climático está ampliando el período de construcción de estructuras de hormigón. Por lo que aumentan las pérdidas económicas relacionadas.

Impulsar los proyectos de construcción sin tener en cuenta el cambio climático está llevando al deterioro de la calidad del hormigón, provocando construcciones deficientes y, en consecuencia, provocando víctimas humanas y daños a la propiedad (Linares & Camero, 2010).

En la investigación desarrollada por Ortiz et al., (2009) llamada “Influencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de trabajabilidad y microestructurales de morteros y pastas de cemento” corrobora que las investigaciones en base a la microestructura demuestran que las circunstancias climáticas exageradas son de influencia en el progreso microestructural de pastas de cemento, particularmente en las edades más prematuras, si se analizara por etapas la influencia de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado para clima cálido este sería el inicio del proceso a investigar, ya que si el fin de todo esto es evaluar los daños, también podemos ir teniendo en cuenta unas variantes importantes a la hora de mejorar los procesos en diseños y elaboración de mezclas de cemento. Por ejemplo, en esta misma investigación para terminar se propone realizar una formulación metodológica para precisar la dosificación de cemento en el concreto, dando resultados satisfactorios para poder generar una disminución de consumo de cemento en tiempos de verano (Valencia, 2020).

4.1.1 Características de un Ambiente de Clima Cálido

Los diferentes climas cálidos localizados en las fajas ecuatoriales, tropicales y subtropicales del mundo, a causa principalmente de una mayor presencia del Sol sobre estas regiones, en donde los rayos del sol penetran de manera casi perpendicular sobre la atmósfera, lo que genera un aumento en el cambio climático (calentamiento global) (Uhling, 2020).

El proyecto busca enfocar el estudio de la carbonatación en climas cálidos, es por esto que tomamos como eje de referencia la ciudad de Cúcuta, nuestra ciudad, en donde el mayor porcentaje de sistema constructivo está en el uso del concreto reforzado y se dan las condiciones ideales para enfocar esta investigación. Según Ortiz et al. (2018) se establece:

“El clima de Cúcuta está clasificado como tropical y está determinado por los pisos térmicos que van del frío, pasando por el templado hasta llegar al cálido, en donde se ubica la zona urbana, en donde se mantiene una temperatura media de 27.6 °C. Las temperaturas más altas se precisan entre 35 y 38 °C y las más bajas entre 17 y 20 °C. La precipitación media anual es moderada y la temporada de vientos se presentan entre los meses de junio y septiembre, con estimaciones que superan los 70 km/h.106. el estado colombiano cuenta con gran porcentaje de su economía perteneciente al sector de la construcción y es por esto que creemos que esta investigación es de mucha utilidad para la región” (p. 43)

4.1.2 Antecedentes

El concreto se caracteriza por ser un material conglomerado de gran utilidad en el sector constructivo en Colombia, particularmente en las construcciones tales como viaductos, muelles, construcciones y carreteras, puesto que es una materia prima con características muy convenientes para el desarrollo de estas estructuras, dándole la posibilidad a estos que logren tener un desempeño más elevado en su capacidad para poder resistir los diversos medios de exposición extremas durante su proceso de vida , no obstante, pese a sus elevados grados de firmeza y estabilidad, el material de concreto constantemente se expone a una variedad de factores que producen su menoscabo, de las cuales se pueden mencionar afectaciones por ataques químicos, entre los que se tienen: la corrosión inducida por cloruros, carbonatación, y ataque por sulfatos, siendo estas sustancias que se encuentran presentes en los ambientes, ya sean estos urbano o marítimo costeros (Bernal, 2020).

En el país se han estado desarrollado algunos estudios en base al tema en cuestión, siendo uno de estos el “Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos” de Albear & Acosta, (2012), donde se presenta que el procedimiento en el servicio del concreto

varia en base a las condiciones atmosféricas (climáticas) a las que se mantiene expuesto. Esto nos confirma el escenario inicial que tenemos, que las condiciones climáticas juegan un factor importante de la vida útil del concreto y por ende de las estructuras.

A nivel mundial y tomando en consideración lo establecido por González et al. (2016) por medio de la revista Ingeniantes, se manifiesta que es de gran interés tener en cuenta el aumento de las cifras de infraestructura de concreto reforzados pres forzado o pos tensado que revelan signos de deterioro a causa de ambiente al que se mantiene expuesto, siendo esto un tema de interés para las jurisdicciones del Estado. En una decisión exclusiva y de la comunidad frecuentemente han trazado la insuficiencia de implementar materiales que generen en las “estructuras de concreto” una resistencia mecánica superior y reduzca posibilidad de falla vinculada a la degradación mecánica y la exposición a agentes agresores presentes en contextos de exposición marítimos, en las industrias y urbe, en los cuales se ven frecuentemente de manera activa los iones cloruro (Cl^-), ión sulfato (SO_4^{2-}), dióxido de carbono (CO_2), entre otros. La gran mayoría de las afectaciones o deterioros en las estructuras en servicio que han sido reportados en países industrializados como Estados Unidos, Japón y Europa, son a causa de la degradación de la resistencia de diseño de la estructura producida por agentes ambientales (Pacheco & Utria, 2019).

En la investigación “Efecto de las variaciones del microclima sobre la tasa de carbonatación del hormigón en el medio interior de Alhassan & Apeh”, (2019) se realizaron pruebas en tres muestras de hormigón en un periodo de 24 meses, todas fueron expuestas a condiciones diferentes, teniendo en cuenta la variabilidad climática de la zona y el contacto directo con gases y cloruros.

La primera muestra se dejó en la azotea de un edificio y se definió como expuesta al aire libre y sin protección del sol y del agua, la segunda muestra se dejó en un sótano parqueadero en

donde está cubierta del sol y de la lluvia, pero tiene un alto contacto con el CO₂ de los vehículos, y la tercera muestra se dejó debajo de un puente vehicular en una zona de alto tráfico (Alhassan & Apeh”, 2019).

Todas estas muestras se estudiaron con diferentes lectores y mediciones de temperatura, humedad, exposición al CO₂, corrosión, contacto directo cloruros entre otros. El resultado de este experimento revela que las muestras expuestas en la azotea son las menos golpeadas por índices de CO₂ y al estudiar su estructura no revela cambios muy significativos por la afectación con el clima, aunque si con los mayores niveles de corrosión en barras, esto debido al mayor contacto con el agua durante los periodos largos de lluvia (Alhassan & Apeh”, 2019).

Siguiendo un orden de incremento de magnitud de valores de CO₂ van las muestras que estuvieron debajo del puente por su contacto cotidiano con los gases de los vehículos con motores a combustión, pero sorpresivamente son las muestras con más altos niveles de carbonatación por clima, ya que al estar cubiertas del sol y de la lluvia tienden a tener más altos niveles de humedad y al estar en contacto con el CO₂ se conforma un ambiente ideal para que la estructura de concreto reforzado sufra mayor afectación por carbonatación. Y por último las muestras del sótano parqueadero, estas tienden a tener el mayor contacto con CO₂ de los vehículos debido a la poca ventilación que se tiene y la poca libertad de flujos de aire que permitan la circulación de gases de manera más natural, pero su estructura no se ve mayormente afectada por el clima, ya que mantiene la mayor parte del tiempo una humedad neutra y sin cambios drásticos que hagan mayores daños en la estructura del concreto (Alhassan & Apeh”, 2019).

Para complementar un poco lo que anteriormente se ha expuesto, se logró tomar en cuenta, por medio de proceso de recolección de datos informativos, se ubicó un artículo importante de Trocónis (2011) menciona:

“Para el caso específico de los puentes, el departamento de transporte de este mismo país reporta que el 25% de los mismos (uno de cada cuatro), han sido clasificados como deficientes, siendo la corrosión de la armadura uno de los factores principales que contribuyen a ese deterioro. Así, la mitad de los 575.000 puentes de Estados Unidos de Norteamérica están afectados por corrosión debido principalmente al uso de sales de deshielo y al menos un 40% de éstos han sido considerados como deficientes a nivel estructural” (p.3)

4.2. Factores Relevantes a la Hora de Estudiar la Carbonatación

4.2.1 Porosidad del Concreto, Humedad Relativa y Temperatura

La carbonatación es uno de los elementos que somete la estabilidad del hormigón, siendo la porosidad una de las medidas que más determinan la aceleración de la carbonatación (Acuña, 2019).

El proceso de carbonatación del hormigón va desde la superficie hacia el interior, avanzando por medio de la porosidad hasta que el “frente de carbonatación” llega al acero. En todos los muchos modelos descritos en la literatura para predecir la profundidad de carbonatación, la entrada de CO_2 varía en relación a la porosidad del material y su contenido de agua. Es por esto, que se ha de considerar que mientras más porosidad tenga el hormigón se puede inducir un avance más rápido del frente de carbonatación y una mayor pérdida de alcalinidad (los hormigones porosos se carbonizan muy rápidamente) (Moreno et al., 2011).

Según, Solís, et al, (2013) especifica que de acuerdo a ciertos criterios que se han estipulado por la “Cooperación con Iberoamérica – multilateral – CYTED”, para que el material de concreto sea estimado de una calidad óptima, su porosidad debe ser

“Menor de 10 %, y para lograr que sea estimado de calidad moderada, su porosidad debe estar entre 10 y 15 %. En este estudio se realizaron una serie de ensayos, independiente del tratamiento de curado que se le ha aplicado, a modo general los concretos presentaron porcentajes de porosidad muy por encima de esos valores” (p 21).

El autor Solís, et al, (2013) en base a la permeabilidad, menciona lo establecido por Frenzer et al., (2021) mencionan

“El rango de permeabilidad al aire para concretos normales es de 0.1 a 1.0. en el estudio se logra alcanzar el mejor valor medido de la permeabilidad siendo este de 1.42 42 (concreto húmedo por 180 días), aproximado a ese rango. Tomando en cuenta la figura que se presenta posteriormente, se presenta la relación entre las variables porosidad y permeabilidad, estando altamente relacionadas (r^2 de 0.96 y significancia de 0.004). se puede apreciar que cuando se implementan agregados altamente porosos (que a su vez producen concretos altamente porosos), la permeabilidad disminuyó hasta valores aceptables cuando el concreto se mantuvo húmedo por 180 días” (p. 21).

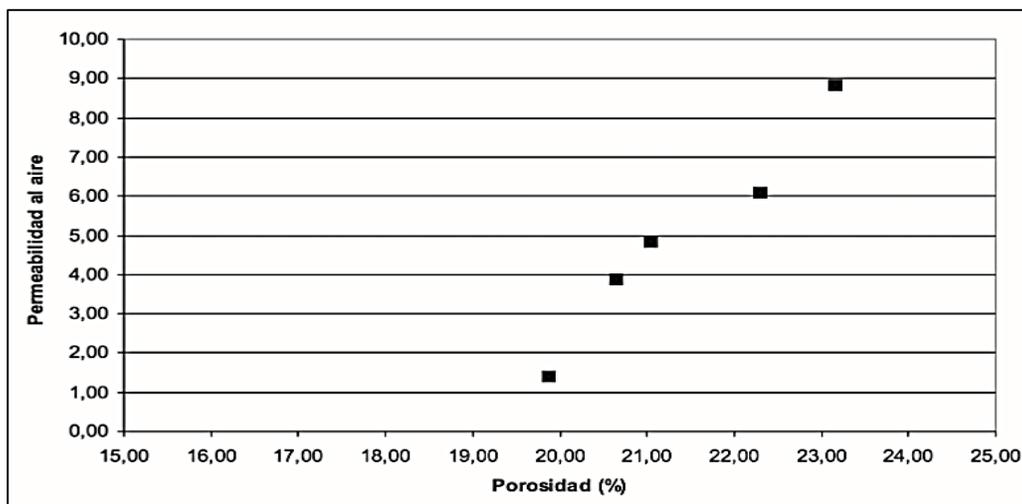


Figura 10. Relación entre la porosidad y la permeabilidad al aire, para concretos con A/C de 0.50 y agregados calizos de alta absorción.

Fuente: Frenzer et al., (2021)

Igualmente, Solís, et al, (2013) determina:

“De acuerdo con los criterios establecidos (CYTED 2000) para que el material de concreto pueda ser determinado como de alta resistencia a la carbonatación, este debe poseer los valores de k_t iguales o menores a $3 \text{ mm/año}^{1/2}$. En el estudio se precisan valores dentro de este intervalo para todos los concretos que tuvieron algún lapso de curado húmedo (desde 3 hasta 180 días), observándose la disminución de k_t conforme se incrementó el tiempo de curado” (p.21)

Profundidades y coeficientes de carbonatación (k_t) del concreto con A/C de 0.50 para diferentes tratamientos de curado.				
	Tratamientos de curado			
	1	2	3	4
Profundidad (mm)	2.2	1.8	1.4	0.9
Coefficiente ($\text{mm/año}^{1/2}$)	3.13	2.56	1.99	1.28

Figura 11. Profundidades y coeficientes de carbonatación

Fuente: Solís, et al, (2013)

En la anterior figura se revelan los datos obtenidos para 4 tratamientos de curado diferentes, explicados de la siguiente forma:

Tratamiento 1: Permanentemente expuesto al medio ambiente en el laboratorio.

Tratamiento 2: Tres días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.

Tratamiento 3: Siete días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.

Tratamiento 4: Veintiocho días húmedo y exposición posterior al medio ambiente en el laboratorio.

Se utilizó la colorimetría como método en el que la coloración del material indica los diferentes tipos de Ph que se pueden encontrar, normalmente con color morado para muestras de alcalinidad mayores a 9.5 y cuando los resultados son incoloros se argumentan valores de alcalinidad bajos Solís, et al, (2013)

En otro sentido, se evidenció en el estudio que la capacidad de carbonatación obtenida para el concreto, la cual permaneció durante “200 días en el medio, 3.13 mm/año^{1/2}, puede ser semejante con el valor de 3.19 mm/año^{1/2} reportado precedentemente” (Solís et al., 2007, p.13); por lo tanto, Solís, et al, (2013), considera que el concreto fabricado con la misma “A/C, agregados similares y exposición al mismo ambiente por 4 años, después de 7 días de curado húmedo” (p.42)

En definitiva, se establece que la porosidad es demostrada como un factor primordial en donde interviene en la solidez y estabilidad del concreto; mientras más absorbente sea el concreto menor es su resistencia mecánica y disminuye su resistencia ante las afectaciones del medioambiente. Igualmente, es muy importante las características de los agregados, ya que la porosidad interviene en varios factores del concreto, Solís & Moreno, (2006), indican que, como: “la resistencia a la abrasión, la estabilidad química, la gravedad específica, la adherencia de la pasta con los agregados, entre otros” (p.37).

Además, si se habla de humedad relativa y su correlación con la temperatura es de afirmar que cuando el acero se despasiva, la carbonatación se comienza a desplegar a una rapidez que parte primordialmente de la humedad incluida en los orificios del hormigón. En edificaciones exhibidas a factores climáticos agresivos (medio ambiente), este delta de humedad dependerá, no sólo de la humedad relativa del ambiente, sino también de las variaciones de temperatura que se producen con los ciclos día-noche (Sosa, et al, 2015)

Se presentan que para valores en el intervalo de 50 - 70% dicho fenómeno ocurre con rapidez acelerada; puesto que, a bajas humedades no hay suficientes niveles de agua en los orificios del concreto que permitan disolver el dióxido de carbono, y en humedades altas los poros se bloquean y bloqueando el ingreso del dióxido de carbono. La tabla que se muestra a continuación, presenta la consecuencia de la humedad relativa en el ingreso de CO₂ en el concreto (Catari, 2021).

Humedad Relativa %(HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO₂
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50%	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO₂

Figura 12. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.
Fuente: Catari, (2021).

En la investigación realizada por Andrade, et al. (1999), “Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón” Se ejecuta un experimento con tres situaciones distintas, el primer ensayo se hace en disolución que representan la fase acuosa de los poros del hormigón (FAP). El segundo ensayo en probetas de hormigón que

se mantiene en ambientes de humedad relativa (HR) y temperatura (T), vigiladas mostrándose en la siguiente tabla y el tercer ensayo en los mismos tubos de hormigón, pero expuestos al exterior.

Tª (°C)	Humedad Relativa % (<i>Relative Humidity %</i>)				
2-3	50	80		100	Tot. Imm
20	50	80	90	100	Tot. Imm
40	50		90	100	Tot. Imm

Figura 13. Condiciones en cámaras controladas de “temperatura y humedad relativa”.

Fuente: Andrade, et al. (1999).

Para el primer ensayo se trabaja con disoluciones de concentraciones de cloruros con el fin de obtener potencial de corrosión e intensificación de consunción. Y para los otros dos ensayos se trabaja con una cavidad dentro de la probeta, como se puede apreciar en la figura.



Figura 14. Probeta de hormigón de 7,5 X 15 cm

Fuente: Andrade, et al. (1999).

Esta imagen muestra el dispositivo que tiene la función de tapar la cavidad donde se calcula, habitualmente, la HR. Con el propósito de tomar datos para calcular la humedad relativa y temperatura; también, en ambos casos, se ha estimado el potencial e intensidad de consunción, en las barras inmersas en las disoluciones o impregnadas en el hormigón. Estas se han ejecutado por medio del método de la resistencia de polarización, sirviendo este para poder corroborar la velocidad de corrosión de un metal en contacto con un electrolito. Las disoluciones preparadas fueron: Agua destilada, solución saturada de “Ca (OH)₂+ 0,2M KOH + 0,1 MNaCl y solución saturada de Ca (OH)₂+ 0,2M KOH + 0,5M NaCl” (García & Mestanza, 2020).

Los cálculos se ejecutaron en un período de 60 días, los tubos de hormigón fueron alargados, de 7,5 cm de diámetro y 15 cm de altura, fabricadas con un cemento tipo 1. Las proporciones de cemento que se implementaron fueron de 250 y de 350 kg con una correlación a/c de 0,5 en las probetas que luego se carbonataron de forma acelerada. En los tubos a los cuales se le agregó 1 y 3% de NaCl correspondientemente, se manipularon 300 kg de cemento/m³ de hormigón con una analogía a/c de 0,6. De manera general, en todos los casos el volumen máximo de árido fue de 12 mm y el tiempo de curado de 3 días. De esta manera se prepararon 4 series de probetas: dos carbonatadas (dos proporciones de cemento diferentes) y dos con cloruros (dos proporciones de cloruro) (Sosa, et al., 2015)

Una serie de estas probetas fueron medidas en distintas cámaras con las combinaciones de humedad relativa y temperatura anteriormente señaladas por la tabla. Por su parte, otra serie fue puesta en la parcela externa en diferentes situaciones de labor directa o no (protegidas) de la lluvia y con solanas directa o no.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

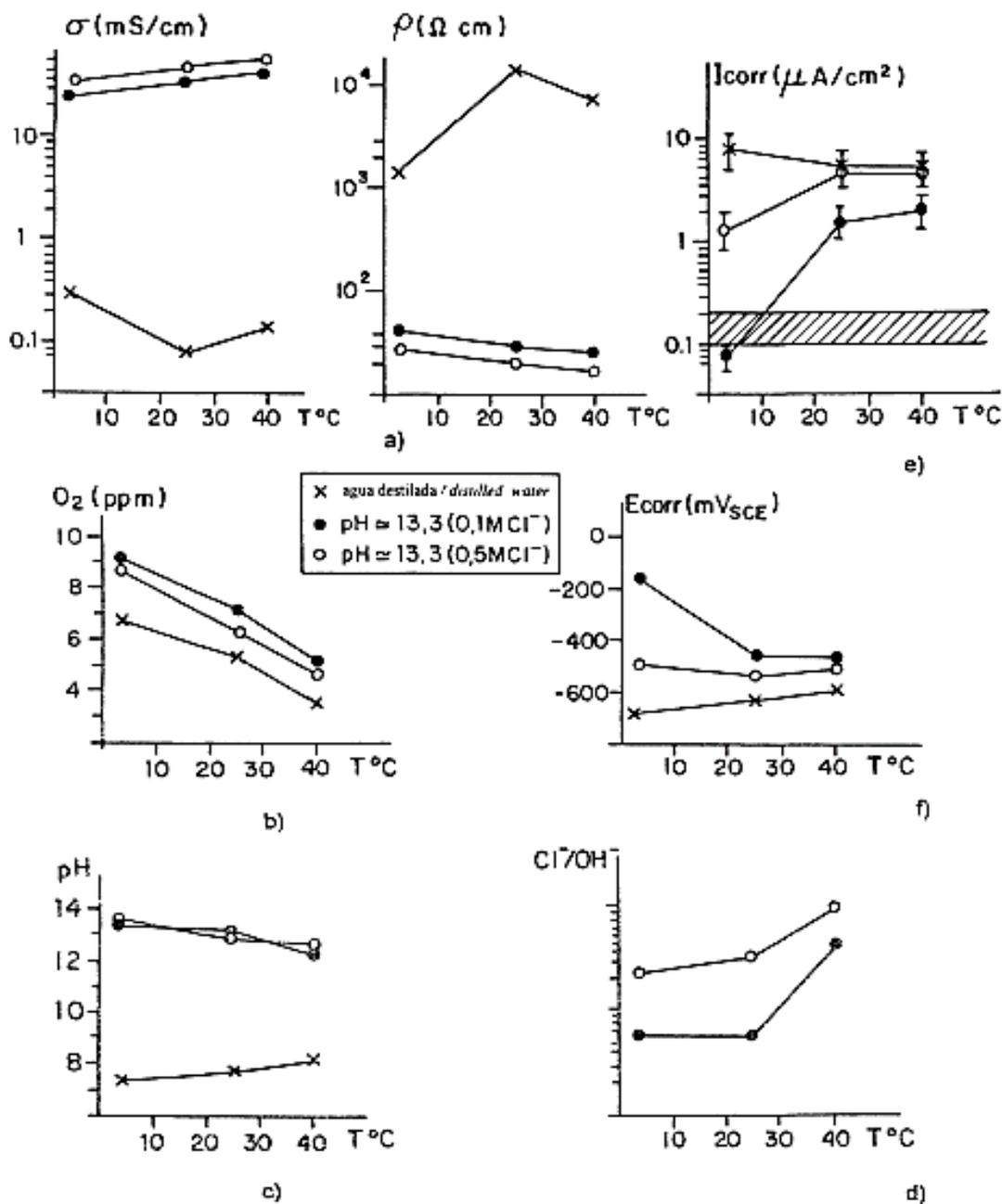


Figura 15. Pruebas de disolución: dominio de la temperatura en: “a) La conductividad y resistividad, b) El contenido de oxígeno, c) El valor del pH, d) La relación Cl⁻/OH⁻, e) Intensidad y potencial de consunción”

Fuente: Sosa, et al., (2015)

Se destaca el hecho que la intensidad de corrosión no se altera para el nivel de temperatura entre 25 y 40 °C, mientras que mengua visiblemente entre 25 y 3 °C en las soluciones ácidas, mientras que acrecienta tenuemente en el agua destilada que aparenta una FAP carbonatada (Sosa, et al., 2015).

Dicha consecuencia es justificada al poder estudiar el procedimiento de los otros parámetros, debido que al ascender la temperatura desde 3 a 40 °C se observa que (Sosa, et al., 2015):

El contenido en O₂ reduce evidentemente y la conductividad acrecienta a excepción en el agua destilada, donde se comprueba una disminución de 25 °C (se debe tener presente que, en este elemento, la conductividad se calcula al terminar el ensayo cuando ya se han derivado óxidos) (Vásquez & Guarniz, 2010).

El valor del pH acrecienta en el agua destilada y reduce en las alcalinas (este último suceso es atribuido a la disminución en disolución del Ca(OH)₂ cuando la temperatura acrecienta) (Saavedra, 2016).

El valor de la relación Cl/OH⁻ aumenta debido a la disminución de los OH⁻ y aumento de la solubilidad de los Cl⁻ (Esquivel, 2019).

Para continuar con los estudios realizados por Andrade et al., (1999), los resultados en el hormigón en atmosferas controladas se pueden estudiar con la siguiente grafica que traza la intensidad de corrosión a lo largo del tiempo para la “probeta con el 3% de NaCl”.

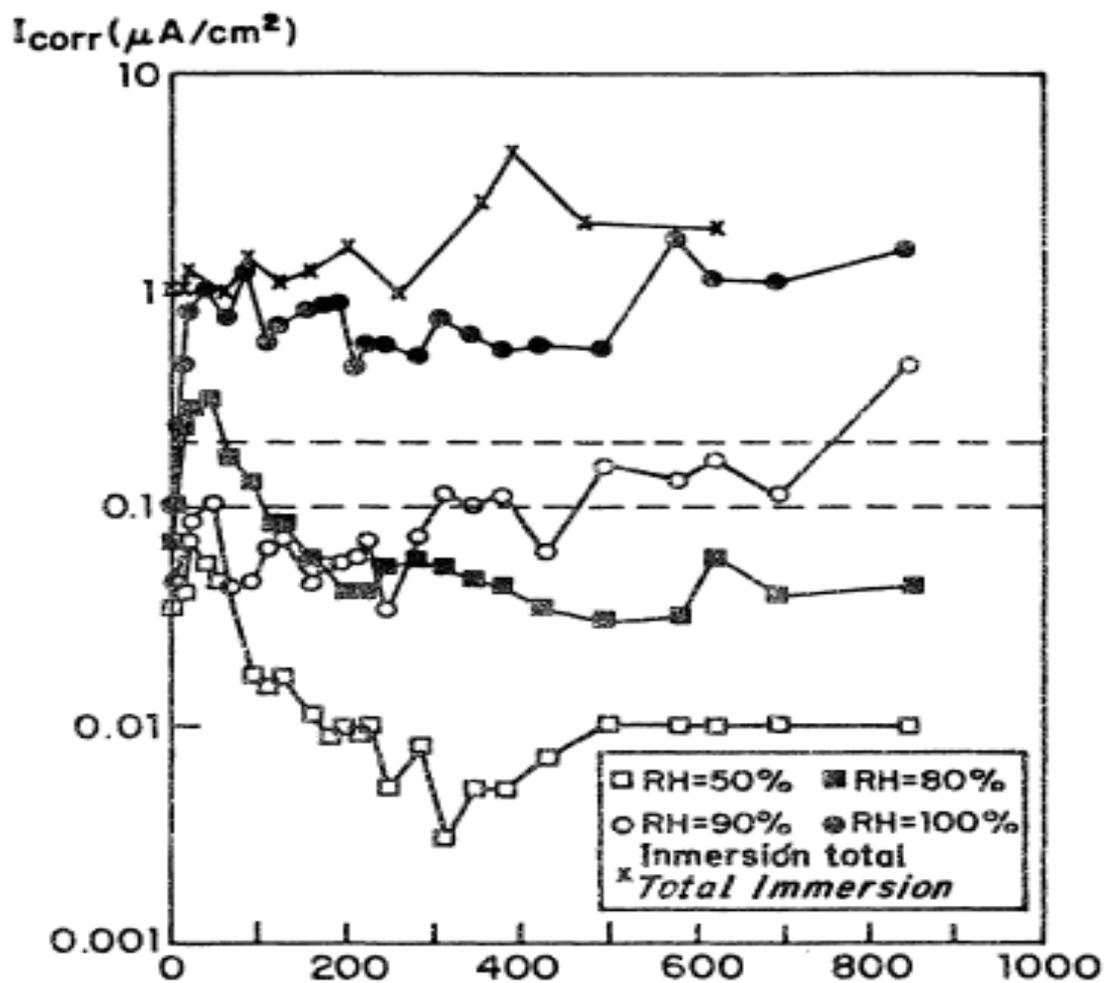


Figura 16. Ejemplo de evolución de intensidad de corrosión (I_{corr}) en el tiempo (hr de 0-1000) para cinco humedades ensayadas
Fuente: Andrade et al., (1999).

Mientras que la siguiente figura resume los valores de intensidad de corrosión al año de vida de las probetas para las cuatro series estudiadas en todas las condiciones ensayadas.

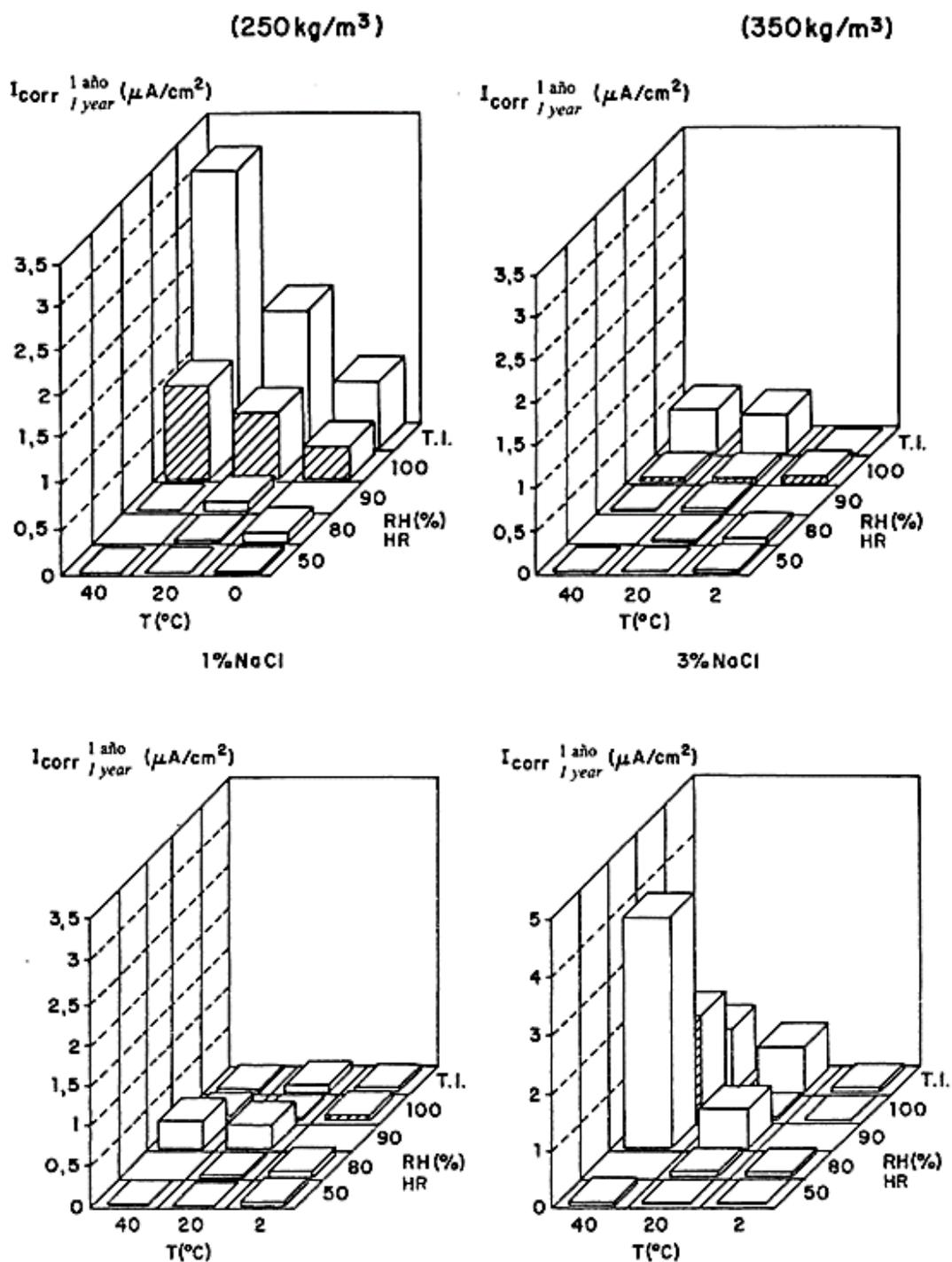


Figura 17. Valores de intensidad de corrosión (I_{corr}), después de un año de ensayo (TI, total inmersión), de las probetas sometidas a las condiciones controladas a diferentes temperaturas (T, en grados celsius).

Fuente: Andrade et al., (1999).

En los tubos carbonatados se puede observar que sólo presentan notables valores de intensidad de corrosión para Humedad relativa $> 90\%$ y que la intensidad de corrosión acrecienta cuando la temperatura asciende. No obstante, los valores máximos de intensidad de corrosión en las probetas descompuestas con cloruros, se consiguen para valores intermedios de humedad relativa, acrecentando además las intensidades de corrosión con la temperatura. Esto conlleva a concluir que en la figura 16, se presenta el proceso de carbonatación en correlación con la humedad relativa, la cual tiene veracidad demostrada en este experimento (Andrade et al., 1999).

Se desea distinguir en la figura que el declive de la temperatura a valores inferiores a 0°C se ejecutó de manera artificial a través de la inserción de las probetas en un refrigerador (Valenzuela & Rossani, 2019). Esta operación artificial consintió la identificación que este descenso brusco de la temperatura provoca cambios muy importantes de todos los parámetros. Así, acrecienta de modo dramático la humedad relativa y la resistividad y, reduce la intensidad de corrosión, desarrollando la potencialidad de corrosión hacia valores más negativos (Andrade et al., 1999).

4.2.2 Relación Agua / Cemento

En la investigación de Moreno et al., (2004) “Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración”, donde se realiza un estudio en probetas dentro de una cámara de carbonatación acelerada, en las cuales se emplean varios tipos de muestras con relación agua/cemento diferente variando entre 0.55 y 0.8. El primer registro interesante se exhibe en la siguiente imagen.

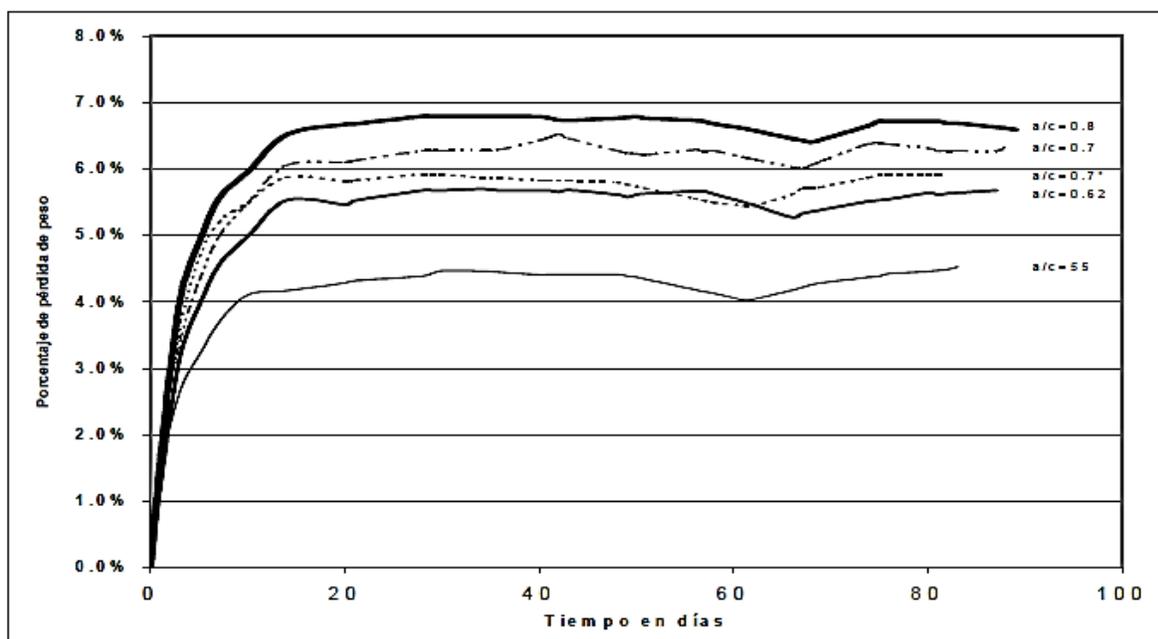


Figura 18. Disminución de peso de tubos con diferente analogía a/c
Fuente: Moreno et al., (2004)

Se puede ver que los tubos de las composiciones con analogía a/c de 0.8, 0.7, y 0.62 desaprovecharon entre 5% y 7% de su masa desde los iniciales 20 días y las probetas de la mezcla de a/c= 0.55 perdieron entre 4% y 5% de masa originaria. Para Moreno, et al, (2004),

“El mayor porcentaje de quebranto de masa que se registró, 6.8%, fue para las probetas de la mezcla de a/c=0.8 y la menor proporción de pérdida de masa, 4.5%, para las probetas de la mezcla de a/c=0.55, las cuales son las mezclas con mayor y menor analogía agua-cemento, correspondientemente” (p.124).

Esta conclusión es de gran importancia, debido que, ratifica lo que Chávez et al, (2013) expone: “La relación agua/cemento es determinante en el avance de la carbonatación. Es evidente que a mayor relación a/c, la carbonatación avanza con mayor rapidez, tanto en medio natural como en la cámara de carbonatación acelerada” (p.112)

4.2.3 El Tipo de Cemento

Dentro de la investigación desarrollada por De Rincón, (2011), realiza una caracterización físico-química de los diferentes concretos preparados en cada país participantes del proyecto, en ellas se nota que aun cuando se implementó el mismo tipo de cemento portland tipo 1 y el mismo tipo de agregado, las características finales de los concretos fueron diferentes en cada país, lo cual puede afectar la calidad del mismo y su durabilidad (Chanta & Zuta, 2020). Es importante resaltar que los países que estuvieron dentro de este proyecto fueron “Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, México, Portugal, España, Uruguay, y Venezuela”. En las siguientes figuras se relacionan los resúmenes de las propiedades del concreto para las mezclas con relación $a/c = 0,45$ y $a/c = 0,60$, donde f_{c_k} es resistencia del concreto, m es el coeficiente de difusión efectivo para cloruros, k es absorción capilar y ϵ es porosidad efectiva, (Rosas, 2014).

PAÍS	f_{c_k} (MPa)/ 28 días	m (s/m ²)	k (kg/m ² s ^{1/2})	ϵ (%)	Contenido de Cemento (kg/m ³)
BOLIVIA	26,63	$3,21 \times 10^7$	0,0054	3,05	400
CHILE	43,6	$2,50 \times 10^7$	0,0027	1,4	387
COLOMBIA	52,3/62,0	$15,26/10,70 \times 10^7$	0,0060/0,0066	7,4/6,8	400
COSTA RICA	39,1	$3,25 \times 10^7$	0,021	11,97	400
MÉXICO	51,5	$3,48 \times 10^7$	0,0147	8,7	411
PORTUGAL	63,9	-	0,0020	-	400
ESPAÑA	43,2	$10,5 \times 10^7$	0,0054	5,5	400
URUGUAY	44,3	$3,3 \times 10^7$	0,0196	11,2	400
VENEZUELA	33,8	$8,68 \times 10^7$	0,0082	7,6	414

Figura 19. Propiedades del Concreto para las mezclas con $a/c = 0,45$, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”

Fuente: Rosas, (2014).

PAÍS	f_{ck} (MPa)/ 28 días	m (s/m ²)	k (kg/m ² s ^{1/2})	ϵ (%)	Contenido de Cemento (kg/m ³)
BOLIVIA	16,81	$2,12 \times 10^7$	0,0202	9,3	320
CHILE	19,8	$2,25 \times 10^7$	0,0341	16,1	323
COLOMBIA	28,0/36,1	$7,28/4,50 \times 10^7$	0,0122/0,0085	10,4/5,7	306/335
COSTA RICA	20,1	$3,73 \times 10^7$	0,026	15,88	350
MÉXICO	40,0	$3,60 \times 10^7$	0,0199	11,9	285
PORTUGAL	35,4	-	0,0069	-	260
ESPAÑA	27,0	$6,1 \times 10^7$	0,0091	7,1	300
URUGUAY	28,4	$3,2 \times 10^7$	0,0267	15,0	323
VENEZUELA	26,8	$3,71 \times 10^7$	0,0250	15,2	355

Figura 20. Propiedades del Concreto para las mezclas con $a/c = 0,65$, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”

Fuente: Rosas, (2014).

Las figuras 19 y 20, demuestra, que para una relación a/c de 0,45 el concreto preparado en Venezuela es uno de los que tienen la más alta absorción capilar ($0,0082 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$), junto con Uruguay, México y Costa Rica, lo que indica una mayor potencialidad de ingreso de los agentes agresivos. Esto mismo ocurre para el concreto con una relación $a/c = 0,65$ (Tabla 2), donde el concreto preparado en Venezuela muestra una de las más altas absorciones capilares ($0,025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$), en conjunto con Uruguay, Costa Rica y Chile, entre todas las mezclas preparadas. Se observa que las mezclas que tienen la mayor resistencia a la compresión no son necesariamente las de mejor calidad. Se es de comparar por ejemplo Uruguay y España que tienen resistencias mecánicas similares, con el mismo contenido de cemento, sin embargo, el concreto de relación $a/c = 0,45$ (Tabla 1), preparado en España es de mejor calidad ($k = 0,0054 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$), que el de Uruguay ($k = 0,0196 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$) e igual ocurre para $a/c = 0,65$. Todos estos resultados, para ambas

relaciones a/c, ya indican la importancia de no diseñar sólo en base a solicitaciones mecánicas (Rosas, 2014).

A continuación, se relaciona en la siguiente figura la agresividad relativa esperada en los diferentes lugares donde se realizaron los estudios, esto considerando que el dióxido de carbono y los cloruros son los que afectan significativamente la corrosión en las barras de refuerzo (De Rincón, 2011).

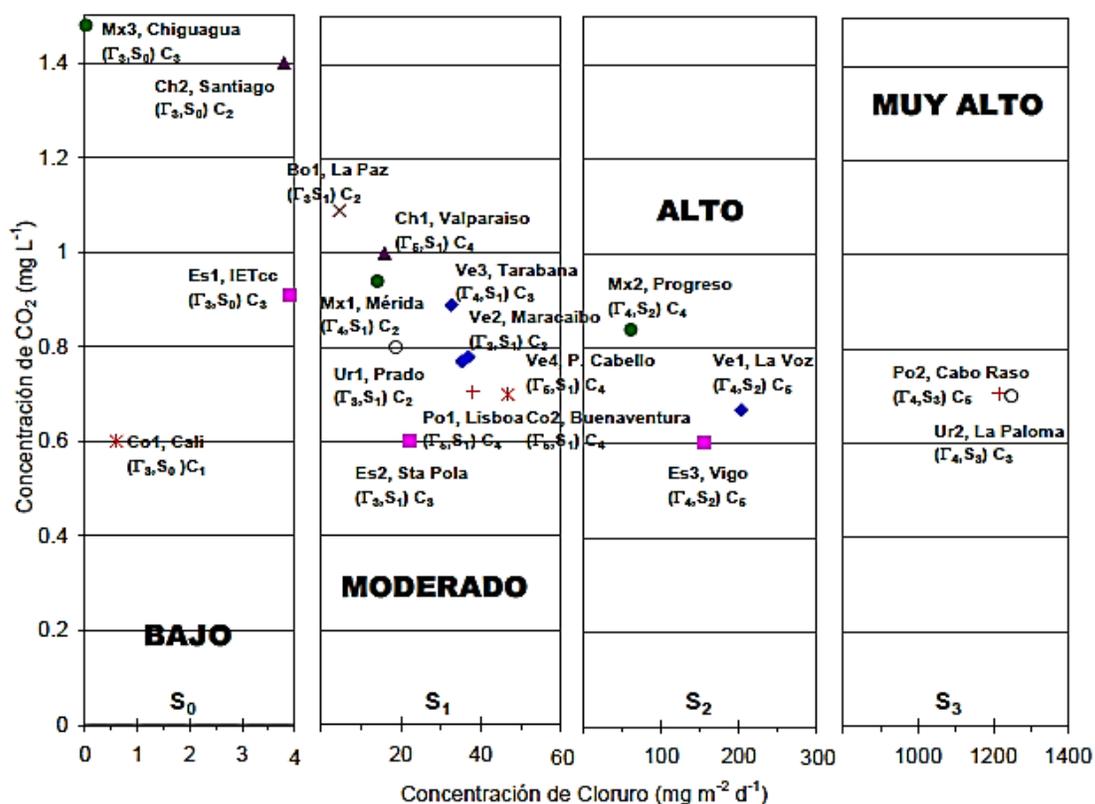


Figura 21. Corrosividad ambiental según la ISO9223, tomada de “Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado”

Fuente: ISO 9223, citado por Linares et al., (2006)

4.2.4 PH del Concreto y Aditivos

El pH es una variable química que permite determinar los niveles de acidez de una sustancia. Dentro de esta investigación Moreno (2006) “Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación” (p.39), esto hace mención al caso del dióxido de carbono y los cloruros, en uno de los parámetros para evaluar dicha capacidad está dado por el valor del pH del agua del poro del concreto. A mayor pH se requiere, en el caso de la carbonatación, mayor cantidad de CO₂ para carbonatar el concreto y, “en el caso de la corrosión por cloruros, mayor concentración de cloruros para iniciar la corrosión del acero de refuerzo” (p. 17). Lo que esto quiere decir es, que se requiere un pH elevado para mantener la pasividad el acero, y esto ira correlacionado con la cantidad de cemento que se use en la mezcla.

En la investigación de Campos et al., (2016), “Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado” finaliza estableciendo que existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento. La profundidad de carbonatación asciende conforme con el contenido de cemento disminuye (Moreno et al., 2004). Esto adquiere mayor importancia, debido a que el concreto se puede fabricar usando un rango amplio de contenidos de Cemento portland (CP), además del uso de materiales suplementarios en adición o sustitución del CP (Gallardo et al., 2018).

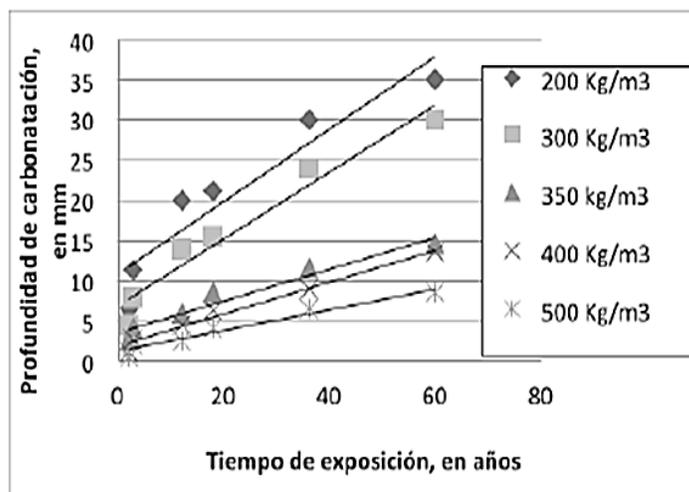


Figura 22. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición para diferentes contenidos de cemento

Fuente: Uller (1998), citado por Vera et al., (2009).

4.3 Tiempos de Observación

El proceso de análisis para una estructura afectada por la carbonatación, es un proceso lento, es por esto que la carbonatación es considerada una patología que se debe evaluar durante toda la vida útil de una estructura. Para calcular el potencial de absorción del CO₂, primeramente, se deben establecer las profundidades de carbonatación. Para el análisis de estas mediciones se requiere observar continuamente este fenómeno y las afectaciones que este produce en las estructuras en largos periodos de tiempo (Aguilar & Velásquez, 2015).

4.3.1 Resultados de Estudios en Tiempos de Observación

Según de los autores Rumi, et al., (2017) realiza un estudio para calcular la absorción de CO₂ en puentes de similares características, donde se consideran las siguientes variables

“x: profundidad de carbonatación; Enp: Elemento estructural en contacto con agua de lluvia (no protegido); Ep: Elemento estructural sin contacto con agua de lluvia (protegido); CO₂: Concentración de CO₂ atmosférico, determinado en campo con equipo de sonda infrarrojo. El estudio de profundidad de carbonatación se le realizo a 30 puentes, donde los elementos analizados de cada puente se clasifican en la tabla 2 por elementos protegidos y no protegidos del agua” (p. 4).

Puente	x (mm)		CO ₂ (ppm)
	Enp	Ep	
1	5	20	386
2	10	15	357
3	5	31	359
4	5	20	356
5	0	15	373
6	1	13	339
7	5	30	385
8	0	15	367
9	1	13	365
10	0	10	370
11	7	30	386
12	8	25	360
13	4	15	367
14	3	14	356
15	5	23	368
16	1	20	375
17	5	18	373
18	5	23	365
19	6	21	368
20	3	28	363
21	5	22	370
22	8	27	358
23	6	24	365
24	3	25	372
25	4	28	375
26	6	20	367
27	5	23	375
28	3	25	364
29	4	27	371
30	4	25	374
Promedio	4,2	21,5	368

Figura 23. Profundidades de carbonatación medidas en puentes de la prov. de Buenos Aires
Fuente: Rumi, et al., (2017)

A partir de los datos de la figura 22, se calcula la profundidad de carbonatación para ambos ambientes de exposición (protegido y no protegido de la lluvia). Considerando la vida de servicio, al momento de la toma de muestras de 50 años y con los datos promedio de profundidad de carbonatación (x) obtenidos de las mediciones de campo, se determinó la velocidad de carbonatación (w en m/años 0,5) y la tasa de carbonatación (k_c) del hormigón para ambos ambientes de exposición, a través de la ecuación desarrollada por Tutti (Rumi, et al., 2017).

$$w = k_c \frac{x}{\sqrt{t}}$$

Donde t es el tiempo transcurrido (años) desde la construcción hasta la medición. De esta manera, se estableció la relación entre la profundidad de carbonatación, en función del tiempo, para cada ambiente de exposición analizado.

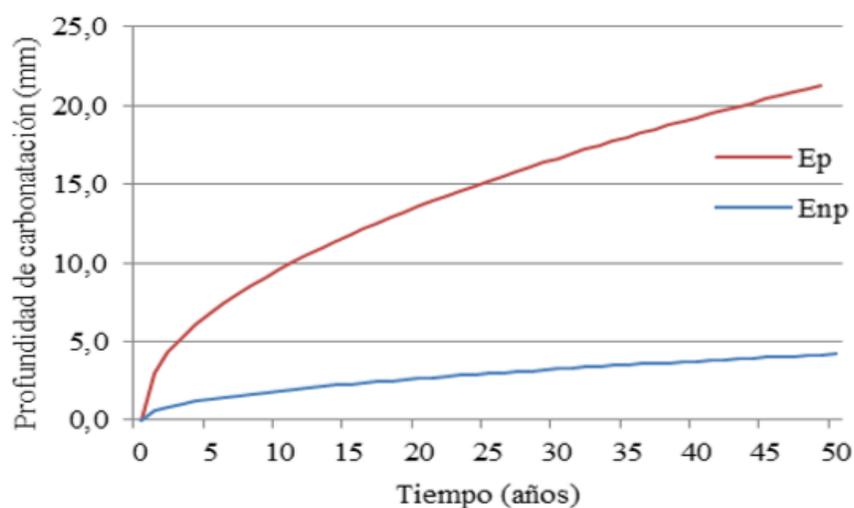


Figura 24. Profundidad de carbonatación, en función del tiempo para las estructuras relevadas.
Fuente: Rumi, et al., (2017)

Con el estudio anterior se evidencio que la estructuras cuyas muestras fueron tomadas en un ambiente protegido (no expuesto a la lluvia) se aumentó la profundidad de carbonatación con respecto al tiempo, debido a que bajo un puente se acumulan los gases CO₂ de los vehículos, los cuales son absorbidos por la estructura (Rumi, et al., 2017).

Por otro lado, y analizando igualmente el proceso de carbonatación en función del tiempo, el siguiente estudio realizado por los autores Chávez, et al, (2010) analizan que el efecto que tiene la carbonatación en vigas de concreto simple expuestas en ambientes marinos tropicales de la ciudad de “San Francisco de Campeche” y en una cámara de carbonatación acelerada, con el propósito de establecer el avance de la reacción de carbonatación en condiciones naturales y en condiciones aceleradas. Cabe resaltar que el ensayo en cámara de carbonatación acelerada se realiza en un depósito donde se ubican las muestras y su la finalidad es obtener información anticipada que aproximará los datos que se obtuviera en el sitio de exposición del medio ambiente natural, controlando en este caso las variables ambientales que mayor efecto puedan tener en este proceso como son la temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ y el porcentaje de CO₂ que se mantuvo en el interior de la cámara fue 100 veces mayor al existente en un ambiente natural (Chávez, et al, 2010).

Posteriormente, Chávez, et al, (2010) establece

“En los ensayos se realizaron cortes de sección transversal y mediante la aplicación de indicadores ácido-base (timolftaleína y fenolftaleína), se determinó la profundidad de carbonatación a los 3, 6, 9 y 12 meses de exposición. De los resultados, se deduce la notoria la influencia de la cantidad de cemento con respecto al agua en la fabricación de las mezclas sobre el fenómeno de carbonatación. Igualmente, el ensayo acelerado aporta información del deterioro del concreto por

exposición en CO₂ en menor tiempo. Se resalta la importancia de la fabricación correcta de estructuras de concreto para incrementar su durabilidad y hacerlas menos vulnerables al efecto de la carbonatación inducida por el CO₂ presente en la atmósfera” (p.2)

Se construyeron 12 vigas de concreto simple (15 x 15 x 60 cm), de las cuales se elaboraron 6 vigas de concreto con relación agua cemento (a/c) 0.49 y 6 vigas de concreto con relación a/c 0.69, donde el concreto se elaboró con las siguientes proporciones (Chávez, et al, 2010):

Contenido en Kg/cm ³	Mezcla con relación a/c = 0.49	Mezcla con relación a/c=0.69
Cemento	50 kg	50 kg
Arena	155.73 kg	150.74 kg
Grava	302.54 kg	318.53 kg
Agua	24.55 kg	34.75 kg

Figura 25. Propiedades del concreto con relación a/c 0.49 y 0.69 a 28 días.
Fuente: Chávez, et al, (2010).

Donde 6 vigas de concreto simple, de las cuales 3 vigas de concreto con relación a/c 0.49 y 3 vigas de concreto con relación a/c 0.69, se expusieron en un ambiente marino tropical y 6 vigas de concreto simple, de las cuales 3 vigas de concreto con relación a/c 0.49 y 3 vigas de concreto con relación a/c 0.69, con las dimensiones previamente descritas, se colocaron en una cámara de carbonatación acelerada (CCA) (Chávez, et al, 2010)

La figura 25 muestra las tasas de carbonatación mediante el cálculo del avance del frente de carbonatación medido en las muestras preparadas con diferentes relaciones a/c, durante los ensayos de carbonatación en condiciones de exposición natural y acelerada. Los resultados presentaron que la relación a/c 0.69 mostró mayores tasas de carbonatación después de un año de exposición con respecto a la relación a/c 0.49 (Chávez, et al, 2010).

ESTACION	TIEMPO DE EXPOSICION (año)	MEZCLA REL. A/C=0.69				MEZCLA REL. A/C= 0.49			
		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA	
		e _{CO2} (mm)	K (mm/año ^{0.5})	e _{CO2} (mm)	K (mm/año ^{0.5})	e _{CO2} (mm)	K (mm/año ^{0.5})	e _{CO2} (mm)	K (mm/año ^{0.5})
CRIP	0.25	10	20	4	8	5	10	3	6
	0.50	18	25.46	8	11.31	10	14.14	5	7.07
	0.75	30	34.64	20	23.09	18	20.79	15	17.32
	1.00	40	40	30	30	24	24	20	20
CCA	0.25	40	80	35	70	20	40	17	34
	0.50	60	84.85	56	79.20	35	49.50	32	45.25
	0.75	75	86.60	72	83.14	45	51.96	43	49.65
	1.00	75	75	75	75	60	60	58	58

Figura 26. Resultados del avance del “frente de carbonatación”

Fuente: Chávez, et al, (2010).

Del anterior estudio se estableció que los factores primordiales en el proceso de carbonatación son la porosidad del concreto y de la humedad relativa del medio ambiente (Rómel et al., 2006). Así mismo la correlación a/c repercutió en el proceso del avance del frente de carbonatación en el concreto elaborado con agregados calcáreos. El uso de ensayo acelerado mediante cámara de carbonatación es una herramienta importante que permite aproximar en periodos cortos las condiciones del avance de la neutralización del concreto originados por el CO₂, cuya medición ensayos naturales abarcaría tiempos prolongados (Schutz, 2019).

4.4 Tipos de Estructuras

En esta monografía se analizará la carbonatación de las estructuras en dos grandes ramas, con el fin de estimar el potencial de absorción de CO₂, en referencia de las estructuras de hormigón. En particular, se estudiarán dos tipologías de estructuras, las cuales se clasificarán como; estructuras en contacto con agua lluvia (no protegida) y estructuras sin contacto con agua lluvia (protegidas). Como ejemplo de estructura en contacto directo con el ambiente están las obras viales (puentes), las cuales reciben descargas directas de Co₂ del ambiente y contaminación de

vehículos, a diferencia por ejemplo de las estructuras como edificios, las cuales están revestidas por mampostería y/o revocadas, o pintadas, teniendo un porcentaje muy bajo de su superficie en contacto directo con el medio ambiente o agentes contaminantes, por lo que sus posibilidades de carbonatación son menores.

En base al estudio realizado por Guzmán, et al, (2019), se tomaron en cuenta tres casos evaluativos los cuales se presenta posteriormente:

Estructura de soporte de tanque elevado:

Bajo los parámetros dados en el estudio de Guzmán, et al, (2019), se ha podido denotar que la presente evaluación (Estructura de soporte de tanque elevado) es correspondiente de una estructura de concreto reforzado que funcione como un sustento a un tanque elevado que esté construido con el mismo material y empleado para realizar el almacenamiento de agua. El presente sistema estructural se encuentra formado por seis columnas ubicadas a determinadas alturas por vigas.



Figura 27. Estructura de soporte de tanque elevado
Fuente: Guzmán, et al, (2019)

Este sistema estructural se ubica de manera exterior, en donde la zona es representativa de un clima árido con temperaturas determinadas en los 15°C, con un registro máximo de 43°C y un mínimo de -8°C, se estima que en tiempos de verano la temperatura se ubica en 24°C y en el invierno en 6°C, con precipitaciones anuales de 192 mm.

Tenido en cuenta que el Reglamento CIRSOC 2016 se enfoca en la aplicación a las escrituras de concreto que se tengan por edificar, como referencia y fundamento en este, en base a las condiciones climáticas ya mencionadas y en acuerdo con las características de los elementos estructurales, se logra constituir una clase de exposición designada como A2, en donde el proceso de degradación por desarrollarse es correspondiente al de la corrosión de la armadura por carbonatación.

Seguidamente del proceso de relevamiento geométrico, se continua con el análisis del estado de conservación y descripción de las diferentes patologías que son destacadas. En términos generales, se logró percibir un avance de gran importancia en sentido de los procesos corrosivos en las armaduras vigas y en las columnas, siendo elementos que aceleran el proceso de degradación del concreto. Estos mecanismos del proceso de degradación han generado variados casos en base a las fisuras en el concreto, tales como el agrietamiento en determinadas zonas ocasionando el desprendimiento del concreto y del revoque, este tipo de problemas se presentaron como consecuencias a las exposiciones a las que estuvieron sometidos los elementos estructurales durante mucho tiempo; estas condiciones se encuentran asociadas con la despasivación de la armadura en altos niveles de humedad en el concreto y la propia penetración de oxígeno que existe en este, logrando así desarrollo del mecanismo ya mencionado. En base a esto, el medio ambiente ha generado aportaciones vinculadas a las diferentes condiciones que son necesarias para la despasivación de la armadura (carbonatación) y la propia penetración del oxígeno, puesto que las

propias filtraciones de agua del tanque han conformado un considerable aporte de humedad en el desarrollo del proceso electroquímico de corrosión.

En torno a la evaluación que ha sido llevada a cabo, se ha de plantear como diagnóstico, que en diferentes sectores de los elementos estructurales existe un acelerado proceso de corrosión en las armaduras, originado por la unión de diversos motivos, e donde se destacan las condiciones ambientales, la baja calidad del concreto, el humedecimiento de las superficies por filtraciones y la falta del mantenimiento o cuidado que es preventivo. Por otra parte, en los lugares en donde aún no se ve la presencia del proceso de degradación al no intervenir de manera rápida, estos estarán siendo afectados en un lapso de tiempo corto, ocasionando un grado de daño altamente significativo en el sistema estructural corresponde al nivel de afectación, es por ello que el sistema estructural evaluado necesita ser intervenido de manera rápida con la finalidad de restituir su capacidad estructural.

Puente vial: Atmósfera urbana

El caso que se presenta a continuación, es correspondiente a la edificación de un puente vial de tres vanos, los tableros de concreto reforzado se encuentran apoyados en un sistema estructural conformado por catorce columnas del mismo material. Se logró conocer en base a los antecedentes del presente estudio, el puente fue fabricado en 1960, presentando a la presente fecha de valoración un aproximado de edad de 57 años desde el momento en que fue construido.



Figura 28. Puente vial: Atmósfera urbana

Fuente: Guzmán, et al, (2019)

Esta construcción está ubicada en una zona de clima húmedo y templado, con humedad ambiental elevada y con temperaturas entre los 10°C y los 23°C, con valores anuales de precipitación superiores a 1000 mm, en base al Reglamento CIRSOC 2016, frente a las condiciones climáticas que se mencionan y de acuerdo con las características de los elementos estructurales, se presenta una clase de exposición como A3 en donde el proceso de degradación es correspondiente al de la armadura por carbonatación. En estas condiciones de agresividad, la durabilidad y la resistencia particular, la compresión del material de concreto debe de estar en base a niveles de 30 MPa, con el recubrimiento mínimo de las armaduras de 45 mm.

Como parte fundamental de este estudio evaluativo, se procedió en sectores seleccionados a la detección de las armaduras, por medio de la implementación del equipo extractor de nucleos. Luego de ya tener ubicadas las armaduras en columnas y los tableros, se realizaron sondeos mecánicos con el propósito de poder evaluar a modo visual las características y estado de las armaduras.

En base a la interpretación de los resultados que se lograron obtener de los diversos estudios de los casos que ya han sido ejecutados para el presente estudio, se logró diagnosticar que las columnas revelan un nivel óptimo de conservación el cual no fue establecido al momento de la evaluación de un mecanismo de degradación en donde la evolución o la velocidad se ubicará en

un compromiso del monolitismo primario, logrando estipular que los hormigones sitúan una resistencia de forma adecuada y una homogeneidad de forma estable. Por su parte, los diferentes ensayos de succión capilar realizados, revelaron una baja velocidad de penetración del agua, precisando con esto una baja permeabilidad del concreto. De los diferentes ensayos de resistencia eléctrica realizados se logró tener en cuenta que el concreto presenta características propicias para el desarrollo de un proceso corrosivo de la armadura, teniendo en cuenta que para esto se debe de dar las condiciones de penetración de humedad y oxígeno al concreto, destacando que del avance del frente de carbonatación calculado, al igual que el recubrimiento de las armaduras, son de manera pasivas generando un mecanismo de protección frente a la corrosión.

Estructuras protegidas (sin contacto con el agua lluvia)

Sistema de fundación y losa de entrepiso de nave: Atmósfera industrial

Por último, el caso que se presenta a continuación corresponde a las bases y pedestales, de una losa de concreto reforzado de una nave industrial, en esta se empaqueta un producto final derivado de un proceso industrial que logra dar lugar a una elevada concentración de cloruros, siendo estos propios del producto procesado.



Figura 29. Sistema de fundación y losa de entrepiso de nave: Atmósfera industrial
Fuente: Guzmán, et al, (2019)

En base a todos los datos recaudados de este estudio se estableció que la nave industrial fue construida en 1997, estimándosele una edad aproximada de 20 años desde el momento en que fue instaurada, en la parte interna de la construcción y a causa de las propias condiciones del proceso industrial, se establecen niveles elevados de humedad y temperatura, donde sus registros se estiman en humedad en un 56% y temperatura con 24°C. En acuerdo con el Reglamento CIRSOC 2016, frente las presentes condiciones ambientales establecidas y en base al modelo de proceso industrial con elevadas concentraciones de Cl, la clase de exposición corresponde a CL en donde el tipo de proceso de degradación a desarrollarse es el de corrosión de la armadura por penetración de cloruros. Frente a estas condiciones de agresividad, la durabilidad y la resistencia representativa, la compresión del concreto debiera ser de 35 MPa, con una correlación a/c inferior o igual a 0.45, con una aceleración de succión capilar inferior o igual a los 4 g/m² s^{1/2}, y con un recubrimiento mínimo de las armaduras de 45 mm.

Las estructuras estudiadas incumbieron a bases y pedestales de concreto reforzad que sostiene las a columnas metálicas, al igual, que una losa de entrepiso de concreto reforzado la cual mantiene una máquina centrífuga. De manera in-situ se procedió a dar establecimiento los espesores de recubrimiento de las armaduras de bases y pedestales, al igual que las armaduras de la losa de entrepiso, estos datos tomados al implementar el detector de armadura y sondeos mecánicos. De manera general, los recubrimientos de las armaduras de bases y pedestales estuvieron en base a los 70 mm, por su parte, las armaduras de la losa revelaron un recubrimiento en base a los 20 mm. En base a los estudiar que anteriormente fueron aplicados se logró conocer que la armadura de las bases no manifiesta signos de corrosión, por su parte, en relación a los pedestales, la armadura por encima del nivel de contrapiso no presento niveles de corrosión. Sin

embargo, presenta determinados niveles de corrosión la armadura ubicada por debajo de dicho contrapiso, y las armaduras de la losa presentaban un avanzado proceso de corrosión.

La losa de entrepiso se encontraba en un mal estado de conservación producto del avanzado estado de corrosión de sus armaduras, lo que genero fisuras y en determinados casos un desprendimiento por la pérdida material del concreto de recubrimiento. Por otra parte, este estado de corrosión ha generado la pérdida en la sección original de la armadura de refuerzo, donde la losa presenta un nivel de daño del tipo E y sus mejoras por medio de especificas técnica de intervención no resultan ser variables, presentando la posibilidad de demolición y posterior restitución. Estos tres estudios tomados del estudio realizado por Guzmán, et al, (2019) generan importantes aportes en un sentido investigativo, que sirven de base para el presente trabajo investigativo.

5. Métodos de Prevención y Rehabilitación en Estructuras de Concreto Reforzado

Propensas a la Corrosión por Carbonatación

En base a lo establecido por Silva, et al., (2018) se considera que, frente a los altos niveles de corrosión como consecuencia de la reacción química de carbonatación presentes en una estructura, se ha de tomar en cuenta diferentes estrategias, y para esta investigación se tomaron en cuenta tres:

“a) En primer lugar, esta se basa en dar restauración, la cual se basa en dar remoción a todas las partes deterioradas y que estas sean sustituidas por nuevos materiales, en donde tiene en cuenta que esto representa un alto costo y un trabajo extenso. b) En segundo lugar, se trata de poder conservar la estructura en su estado original, siendo esta la implementada, puesto que solamente implica realizar parches mínimos, para así poder evitar que el proceso de corrosión siga siendo esparcido. c) En último lugar, se implementan tratamientos que sean óptimos para poder mantener bajos los niveles en relación a la velocidad de la corrosión en el acero” (p.105).

En los últimos dos casos es en donde se presentan las técnicas electroquímicas, las cuales poseen un nivel de aceptación elevada, sin embargo, y tomando en consideración que los datos en base a su efectividad son reducidos, los tratamientos generaron controversias específicas (Silva, et al., 2018).

Estos métodos para la reparación han de ser catalogados como convencionales y no convencionales (Oyarzún et al., 2017), resaltando que lo convencional ha de ser ambiguo frente a

la creación de métodos y materiales que se presentan en una evolución consecutiva, y los métodos electroquímicos de rehabilitación, son determinados en una categoría pertenecientes a los no convencionales, gracias a que su aplicación necesita de conocimientos teóricos de variadas disciplinas, en donde resaltan la química, física y la electroquímica (Castrillón & Ospina, 2021)

5.1 Métodos Convencionales de Reparación

Según lo establecido por Montani (2021), los métodos que son habituales para dar protección y reparación de las estructuras de concreto, son extensamente implementados durante varias décadas, cabe destacar que esta implementación posee vigencia por parte de los mínimos costos que son representados. Las diversas técnicas son variadas al nivel que unas son implementadas en base al el acero y otras en el concreto (Solti & Zegarra, 2015). Su manejo en relación a las del agua/cemento son mínimas, siendo una forma básica de generar protección en el material de concreto, este se basa en reducir la porosidad y la permeabilidad, este ha de ser generado por medio del uso de las adiciones minerales, siendo estas capaces de densificar la estructura impidiendo la entrada de los agentes agresivos externos. Sin embargo, las erróneas prácticas contractivas y de diseño, han de generar la existencia de grietas eliminan completamente el efecto benéfico de las adiciones (Jiménez, 2016).

Para Álvarez (2014), las barras de acero inoxidable “han surgido como una alternativa para incrementar la resistencia a corrosión del refuerzo” (p.23); no obstante, el uso de estos aceros suele tener aplicaciones muy limitadas debido a su alto valor económico de producción (Ashby, 2018), es por esto que algunos fabricantes se han dado a la tarea de seguir estudiando en base a este tema.

Recientemente se han fabricado barras de refuerzo más económicas que muestran una resistencia al ataque por cloruros de hasta 20 veces más que una barra de acero convencional (Martínez, 2016). A este respecto, Ruello, et al., (2019) “detectan que en concretos agrietados con refuerzo de acero inoxidable la corrosión es menor comparado con concretos recubiertos de materiales innovadores tales como compuestos hidrófobos y recubrimientos base epóxico-cementante” (p. 17).

5.2 Métodos No Convencionales de Reparación

Según el estudio de González (2010) se determina:

“La aplicación de las técnicas electroquímicas (TE) como métodos no convencionales de intervención y mantenimiento han generado un interés amplio en el campo de la Ingeniería Civil. En algunos de los países industrializados se tienen experiencias de implementación de las técnicas. Actualmente existe un claro consenso de que solo hay dos y en algunos casos tres técnicas (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y realcalinización) capaces de controlar o disminuir hasta un nivel despreciable la corrosión del acero de refuerzo” (p.37)

Seguidamente, el presente autor establece que particularmente en las de estructuras de concreto reforzado dañadas por la carbonatación

“En el caso particular de estructuras de concreto reforzado dañadas por la carbonatación, la realcalinización es la técnica recomendada para recuperar la alcalinidad del concreto y con ello prevenir y/o contrarrestar la corrosión del acero. Una de las ventajas de esta técnica procede en su mecanismo de acción,

puesto que ésta considera y elimina alguno de los componentes de la celda de corrosión. Actualmente son reconocidas al menos dos variantes de la técnica ya que la recuperación de la alcalinidad puede ser alcanzada, en primer lugar, por medio de la aplicación (sobre la superficie del concreto) de emulsiones cementantes o soluciones alcalinas que penetran por la red de poros mediante mecanismos de difusión y absorción. La segunda variante, considerada de mayor efectividad, consiste en suministrar un flujo de corriente eléctrica, el cual propicia la reacción de hidrólisis en la zona del acero, dando lugar a la formación de iones OH-.” (p.39)

5.3 Realcalinización del Concreto y Criterios de Eficiencia

Dando continuidad a lo establecido anteriormente por González (2010), se determina que la realcalinización

“Es un método que tiene por objetivo prevenir o detener la corrosión del acero inducida por la carbonatación del concreto. Particularmente en el caso de la realcalinización electroquímica, El principal beneficio es la repasivación del acero por la recuperación del pH en las inmediaciones del acero. A pesar de que la técnica ha sido utilizada por más de veinte años, actualmente no hay un consenso claro en relación a los criterios de eficiencia de la técnica. Algunas de las variables utilizadas para evaluar la CP y EEC han sido aplicadas también en la realcalinización electroquímica, no obstante, y de acuerdo con las experiencias adquiridas, existen pocos reportes que presenten explícitamente las condiciones de operación y medición de dichas variables” (p. 43)

5.3.1 Principio de la Técnica de Realcalinización Electroquímica (RAE)

Con base a este tema la técnica de realcalinización se encuentra establecida en la aplicación de un campo eléctrico al sistema aceroconcreto con el propósito de provocar procesos específicos a nivel de la matriz de concreto (Manrique, 2011), al igual que la interface; en un nivel local en los alrededores de la interfase acero - concreto, el pH incrementa y las condiciones que incitan a que la pasivación del acero ha de ser regenerada (Sunyer et al.,2020). Se considera altamente importante tomar en cuenta que algunos de los fenómenos que suceden comprobablemente contribuyan en la realcalinización sin encontrarse asociada de manera directa con el campo eléctrico. La aplicación de la presente técnica presume el paso de una corriente directa por medio del concreto entre el acero de refuerzo y un ánodo situado sobre la superficie del concreto inmerso en un electrolito, se encarga que el material metálico sea de un material inerte para poder impedir la disolución dentro del electrolito; en función a esto Gonzales, (2010), determina

“La corriente eléctrica suministrada es generalmente de 1 A/m² aplicada durante periodos que van de 7 a 21 días. En una aplicación tradicional de campo se utiliza una pasta a base de papel de celulosa saturada en una solución 1 M de carbonato de sodio. Otras variantes de esta técnica han sido desarrolladas comercialmente por las compañías Ciment d'Obourg y Freyssinet, cuya diferencia principal es que la corriente eléctrica es obtenida mediante el uso de ánodos de sacrificio” (p. 49)

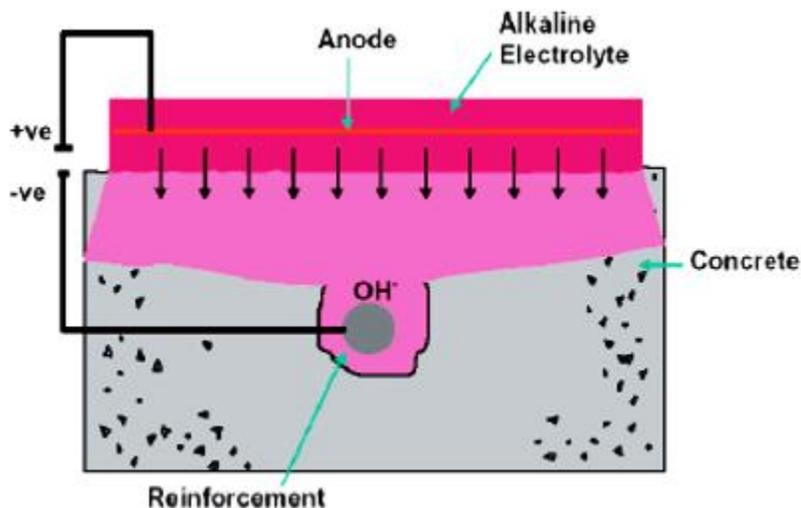


Figura 30. Esquema de la “Realcalinización Electroquímica”.
Fuente: Aguilar, (2013)

Los mecanismos teóricos que se realizan por medio de la realcalinización electroquímica se han descrito en variadas ocasiones. Sin embargo, cuando algunos estos tipos de mecanismos se hallen asociados de manera directa con el campo eléctrico, se requiere necesario dar profundidad en la naturaleza de cada uno de ellos con el objetivo de poder identificar la contribución individual en los cambios del sistema acero-concreto (Gonzales, 2010).

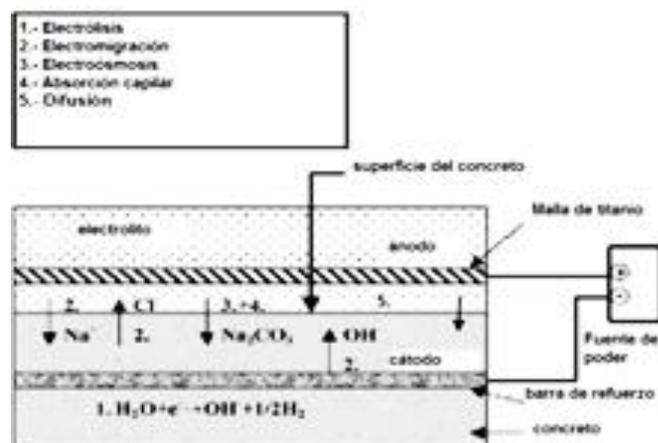


Figura 31. “Mecanismos actuantes durante la RAE”
Fuente: Gonzales, (2010).

Principalmente, la realcalinización es causada por medio de la reproducción de iones OH⁻ en la zona procedente al acero que interactúan como cátodo (Rivera, 2016). Hipotéticamente, se reconoce la existencia de dos reacciones catódicas que han de favorecer en la producción de OH⁻ (Espin et al., 2021): “Primeramente, la reacción de reducción del oxígeno lo que es un potencial negativo, seguidamente si este persiste consecutivamente de manera muy negativa, entonces la reacción catódica se convierte en la reducción del agua” (p.48).

Finalmente, se considera que entre los materiales más novedosos implementados con el fin de proporcionar una mayor durabilidad al concreto son los recubrimientos hidrófobos (Vaca, 2020), estos componentes capaces de minimizar enormemente la absorción de agua del concreto. No obstante, las durabilidades de los presentes materiales son generados a partir de la profundidad de penetración (Torres, 2014), al igual pueden llegar a estar afectados por los álcalis del concreto y agentes atmosféricos. Es por esto que, pese al objetivo de perfeccionar la utilidad de estos agentes hidrófobos, actualmente se ha considerado agregarlos de manera directa a la mezcla de concreto, engrandeciendo de esta manera su efecto en todo el volumen del elemento estructural (Botto & Santacruz, 2017).

6. Referencias Bibliográficas

- Acuña, B. (2015). La observación como herramienta científica. (En línea) ACCI (Asociación Cultural y Científica Iberoamericana). Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yDt2CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=El+estudio+en+cuesti%C3%B3n+se+desarrolla+con+res%C3%BAmenes+que+salen+de+la+exploraci%C3%B3n+de+documentos,+revistas,+libros+y+proyectos+de+grado+en+donde+realizaremos+una+s%C3%ADntesis+e+indagaci%C3%B3n+cr%C3%ADtica+de+cada+uno+de+ellos+para+que+al+finalizar+podamos+tener+una+m&ots=OcKSvyrY8l&sig=lxE3zUQBM_Rr73_k5a6C7wf0oPA
- Acuña Olórtégui, M. (2019). Influencia del encamisado en columnas de concreto usando cemento IP con superplastificantes y varillas de basalto para incrementar número de pisos en edificaciones. (En línea) Lima-2019. Disponible en: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2926345>
- Aguilar Villarreal, J. (2013). Influencia del Deterioro por corrosión del acero sobre la realcalinización del concreto reforzado carbonatado (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3195/>
- Aguilar Carrillo, C., & Velásquez Burgos, J. (2015). Evaluación de presencia de carbonatación en los puentes vehiculares de la zona Puente Aranda, Kennedy y Engativá. (En línea) Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2419>
- Aite Cochachi, L. (2017). Estudio de las propiedades del concreto con aditivo reductor de permeabilidad y cemento Portland tipo V. (En línea) CONCYTEC. Disponible en:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_f61b3d576622c4797cf7ae04b3917cb1/Description

Albear, J., & Acosta, A. (2012). Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos. (En línea) *Revista Cubana de Ingeniería*, 3(2), 17-24. Disponible en: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/71>

Alhassan, Y., & Apeh, S. (2019). Effect of micro-climate variations on carbonation rate of concrete in the inland environment. (En línea) In *MATEC Web of Conferences* 1(289), p. 02001. EDP Sciences. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928902001>

Álvarez Arboleda, S. (2014). Influencia de la composición y el conformado en el comportamiento frente a la corrosión de los corrugados de acero inoxidable. (En línea) Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/19274>

Andrade, C., Sarría, J. & Alonso, C. (1999). Humedad relativa en el interior del hormigón expuesto a la intemperie natural y artificial. (En línea) *Investigación de cemento y hormigón*, 29 (8), 1249-1259. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884699001234>

Ashby, M. (2018). *Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. (En línea) Reverté, 1(1). Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=G93eDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Las+barras+de+acero+el+uso+de+estos+aceros+suele+tener+aplicaciones+muy+limitadas+debido+a+su+alto+valor+econ%C3%B3mico+de+producci%C3%B3n&ots=9-CzNKotPL&sig=t-iUYwcWJIPZECW8EEE_NTcxY04

ASOCEM (2019). *Reporte de Indicadores internacionales de cemento*. (En línea) Asociación de productores de cemento. Lima. Disponible en:

<http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Reporte%20ASOCEM%20-%20Estad%20C3%20Adstic%20Internacionales%202019.pdf>

- Bernal Cantor, H. (2020). Asistencia técnica a la construcción de vías en concreto rígido y obras complementarias barrio Bachué del municipio de Acacias–Meta (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil, Villavicencio). Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/18167>
- Bolognini, H., Martínez, N., & Troconis de Rincón, O. (2015). Caracterización química y físico-mecánica de cementos adicionados de filer calizo en Venezuela. (En línea) Revista ALCONPAT, 5(3), 190-202. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352015000300190&script=sci_arttext
- Botto Lugo, R., & Santacruz Pachón, P. (2017). Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido de un concreto para uso en pavimento rígido, adicionado con nanocompuestos de carbono. (En línea) Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21742>
- Cabana Llanos, B., & Yupanqui Urquiza, H. (2020). Análisis de sustitución óptima de cemento por ceniza volcánica de Ubinas evaluado en un concreto autocompactante. (En línea) SUNEDU. Disponible en: <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/1808684>
- Campos Silva, A., Fajardo, G., & Mendoza Rangel, J. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. (En línea) Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 8(1), 14-34. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112016000200014

- Castrillón, R., & Ospina, E. (2021). Alternativas de mejoramiento para reparaciones y reforzamientos de estructuras en concreto reforzado. Una revisión de literatura. (En línea) Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10495/21562>
- Catari Falcón, N. (2021). Evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el Canal del túnel-Río Asana, 2018. (En línea) Universidad José Carlos Mariátegui. Disponible en: <http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/1022>
- Chávez, E., Pérez, T., Reyes, J., Corvo, F., & Osorno, J. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada. (En línea) Revista CENIC. Ciencias Químicas, 41. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181620500029.pdf>
- Chanta Muñoz, D., & Zuta Quirohuayo, C. (2020). Influencia de aditivos basados en policarboxilato en las propiedades del concreto autocompactante. (En línea) Repositorio URP. Disponible en: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3824>
- Chávez, E., Pérez, T., Reyes, J., & Corvo, F. (2013). Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada. (En línea) Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 36(2), 104-113. Disponible en: <http://ve.scielo.org/pdf/rtfiuz/v36n2/art02.pdf>
- Chinè Polito, B., Cuevas Kauffmann, R., Jiménez Salas, R., & Ortiz Quesada, G. (2019). Estudio experimental de la carbonatación del concreto. (En línea) Revista Tecnología en Marcha, 32(2), 68-81. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822019000200068&script=sci_arttext

- Correa, E., Peñaranda, S., Castaño, J., y Echeverría, F. (2008). Deterioro del concreto en ambientes urbanos de Colombia. (En línea) Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 52, 41-46. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612008000100002
- Corral, R., Arredondo, S., Almaral, J., & Gómez, J. (2013). Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios. (En línea) Revista ingeniería de construcción, 28(1), 21-35. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50732013000100002&script=sci_arttext
- Copernicus Climate Change Service/ECMWF (2021) Aumento de la temperatura en el mundo 1970- 2020 (En línea) epdata. Disponible en: <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- Czarnecki, L. & Woyciechowski, P. (2015). Modelado de carbonatación de hormigón; ¿Es un proceso ilimitado en el tiempo y restringido en el espacio? (En línea) Boletín de la Academia de Ciencias de Polonia. Ciencias técnicas, 63 (1). Disponible en: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-dae752cd-97ad-4092-9ca8-ab6d6007790a>
- De Guzmán, D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. (En línea) Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=EWq-QPJhsRAC&oi=fnd&pg=PA5&dq=C%C3%BAcuta+es+un+ambiente+propicio+para+el+proceso+carbonataci%C3%B3n+dadas+sus+condiciones+naturales,+teniendo+la+mayor+parte+del+tiempo+temperaturas+altas+durante+el+d%C3%ADa+y+cambios+bastante+bruscos+durante+horas+de+la+noche+\(24%E2%84%83+a+34%E2%84%83\),+&ots=gZFZDgw1Gr&sig=qyhVxtyl5Tk4w7n1BcdHI9xZFdo](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=EWq-QPJhsRAC&oi=fnd&pg=PA5&dq=C%C3%BAcuta+es+un+ambiente+propicio+para+el+proceso+carbonataci%C3%B3n+dadas+sus+condiciones+naturales,+teniendo+la+mayor+parte+del+tiempo+temperaturas+altas+durante+el+d%C3%ADa+y+cambios+bastante+bruscos+durante+horas+de+la+noche+(24%E2%84%83+a+34%E2%84%83),+&ots=gZFZDgw1Gr&sig=qyhVxtyl5Tk4w7n1BcdHI9xZFdo)

De Rincón, O. (2011). Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado. (En línea) Revista de la Universidad del Zulia, 2(2), 100-154. Disponible en:

http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS_INCORPORACION/TI_OLADIS_TROCONIS.pdf

Díaz González, N. (2014). Inspección y análisis por condiciones de durabilidad; propuesta de rehabilitación del puente El Teolán, localizado en el Km. 47+ 900 en la carretera Playa Azul-Manzanillo, (En línea) Michoacán, México. Disponible en: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/3094

Enciso Rius, A. (2017). Caracterización del hormigón estructural con propiedades de captación de CO₂ (En línea) (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/117165>

Elsener, B. y Angst, U. (2017). Corrosión del acero en el hormigón: nuevos retos. (En línea) Catalogo Ricerca Università di Cagliari. Disponible en: <https://iris.unica.it/handle/11584/234489#.YYR4T1VBwdU>

Esquivel Gómez, A. (2019). Evaluación electroquímica de la interacción acero-concreto debido a la introducción de nanopartículas base silicio a través de un tratamiento superficial (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/19777/1/1080314342.pdf>

Espín, M., González, H., Ochoa, P., Díaz, M., Jiménez, E., Castillo, C., & Stahl, U. (2021). Producción de oxihidrógeno como alternativa energética. (En línea) Revista Perspectivas, 3(2), 62-67. Disponible en: http://45.184.102.148:8081/index.php/RCP_ESPOCH/article/view/141

- Flores, M., Franco, M., Ricalde, D., Garduño, A., & Apáez, M. (2013). Metodología de la investigación. (En línea) Editorial Trillas, SA de CV. Disponible en: <https://enfermeria-uaz.org/uploaded/files/udisLEnfermeria/6Semestre/MetodologiaInvestigacion.pdf>
- Flores Jarquín, J. (2014). Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial ya condiciones controladas de laboratorio (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/4394/1/1080259428.pdf>
- Flórez, C., Cárdenas Pulido, J., & Rodríguez, S. (2020). Evaluación del comportamiento a compresión y propiedades físicas de morteros de cemento reforzados con fibras recicladas PET. (En línea) *Scientia et Technica*, 25(2), 269-279. Disponible en: <https://201.131.90.33/index.php/revistaciencia/article/view/23771>
- Frenzer, G., Jacobs, F. & Torrent, R. (2021). Características de durabilidad in situ de estructuras de hormigón nuevas y antiguas. (En línea) *Revista de tecnología avanzada del hormigón*, 19 (1), 53-66. Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/19/1/19_53/_article/-char/ja/
- Galán, I. (2012). Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. (En línea) *Repositorio Digital de la Universidad Complutense de Madrid*. Ene, 11, 09. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/14424/1/T33374.pdf>
- García Ramírez, A., & Mestanza Rojas, Y. (2020). Mejoramiento del suelo con el diseño de hincado de rocas en la desmontera de mina Excélsior-Cerro de Pasco. (En línea) *Repositorio URP*. Disponible en: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3566>

- Gallardo, J., Aparicio, L., Campos, M., De León, J., & Guerra, T. (2018). Suelo-cemento-caliche como una solución sustentable a problemas geotécnicos. (En línea) Revista de Iniciación Científica, 4(2), 31-35. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/2148>
- Giordani, C. & Leone, D. (2017) Cementos (En línea) Repositorio Digital de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario. Disponible en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos\(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Cementos(1).pdf)
- González, F. (2010). Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión (En línea) Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/2142/1/1080177800.pdf>
- González, H., Ojeda, O., Baltazar, M., Arroyo, O., Barranco, & W, García. (2016) Evaluación de la carbonatación en estructuras de concreto ubicadas en la región Centro-Norte de Veracruz (En línea) Revista Ingeniantes Año 2 No. 2 Vol. 1. Disponible en: <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes2no2vol1/11.%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20carbonataci%C3%B3n%20en%20estructuras%20de%20concreto%20ubicadas%20en%20la%20regi%C3%B3n%20Centro-Norte%20de%20Veracruz..pdf>
- Gutiérrez Martínez, A. (2021). Resistencia a la compresión f'_c de los concretos fluidos con aditivos estabilizadores de temperatura para climas cálidos (En línea) (Doctoral dissertation). Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10085>
- Guzmán, M., Palazzo, G., Roldan, V., & Calderón, F (2019) Estructuras de Concreto Reforzado Afectadas por Mecanismos de Corrosión: Casos de Estudio (En línea) Revista Ingeniería y Tecnología UAS Facultad de Ingeniería Culiacán, UAS. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/339768635_Estructuras_de_Concreto_Reforzado_Afectadas_por_Mecanismos_de_Corrosion_Casos_de_Estudio

Hernández Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. México. (En línea) McGrawHill. Disponible en: <https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/166/1/1646.pdf>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1999) Normas Técnicas Colombianas NTC 4595 y NTC 4596 (En línea) Ministerio de Educación Nacional. Disponible en: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-96894_Archivo_pdf.pdf

Jedidi, M. & Belhassen, A. (2020). Carbonation of Reinforced Concrete Structures. (En línea) Current Trends in Civil & Structural Engineering. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/902c/eb534a6b93099a18e1cc3bf390681612c2ca.pdf>

Jiménez Guayanay, L. (2016). Diseño arquitectónico del mercado municipal del cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe (En línea) (Bachelor's thesis, LOJA/UIDE/2016). Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/1022>

Kim, T., Choi, S., Kim, J., Chu, Y. & Yu, E. (2017). Evaluación basada en el rendimiento de la resistencia a la carbonatación del hormigón de acuerdo con diversas condiciones de curado por efecto del cambio climático. (En línea) Revista Internacional de Estructuras y Materiales de Concreto , 11 (4), 687-700. Disponible en: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1007/s40069-017-0206-7>

Kosmatka, S., Panarese, C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (En línea) Boletín de Ingeniería EB201. Disponible en: https://www.academia.edu/33383752/Dise%C3%B1o_Y_Control_De_Mezclas_De_Con

creto_Steven_H_Kosmatka_Beatriz_Kerkhoff_and_William_C_Panarese_1ra_Edici%C3%B3n_

Laguna Chite, M., & Mamani Antipueras, A. (2019). Evaluación, diagnóstico y reparación de los elementos de concreto en el Complejo Recreacional Municipal Los Humedales de Ite, provincia Jorge Basadre Grohmann (En línea) Tacna-2019. Disponible en: <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1435>

Larrard, T., Bastidas, E., Duprat, F., y Schoefs, F. (2014). Effects of climate variations and global warming on the durability of RC structures subjected to carbonation. (En línea) Civil Engineering and Environmental Systems, 31 (2), 153-164, Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10286608.2014.913033>

Lee, H., Lee, H., Min, S., Lim, S., & Singh, J. (2018). Carbonation-Induced Corrosion Initiation Probability of Rebars in Concrete With/Without Finishing Materials. (En línea) Sustainability 2018, 10(10), 3814 Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/10/3814>

León, L. (2020). Propuesta de inclusión de ensayos novedosos al hormigón armado para estructuras patrimoniales ubicadas en el litoral norte de Matanzas (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad de Matanzas). Disponible en: [http://cict.umcc.cu/repositorio/tesis/Trabajos%20de%20Diploma/Ingenier%C3%ADa%20Civil/2020/Propuesta%20de%20inclusi%C3%B3n%20de%20ensayos%20novedosos%20al%20hormig%C3%B3n%20armado%20para%20estructuras%20patrimoniales%20ubicadas%20en%20el%20litoral%20norte%20de%20Matanzas%20\(Laura%20Perez%20León\).pdf](http://cict.umcc.cu/repositorio/tesis/Trabajos%20de%20Diploma/Ingenier%C3%ADa%20Civil/2020/Propuesta%20de%20inclusi%C3%B3n%20de%20ensayos%20novedosos%20al%20hormig%C3%B3n%20armado%20para%20estructuras%20patrimoniales%20ubicadas%20en%20el%20litoral%20norte%20de%20Matanzas%20(Laura%20Perez%20León).pdf)

- Linares, L., Taborda, N., Zambrano, L., & Perez, O. (2006, August). Failures analysis by corrosion in power conductors of aluminum alloys in coastal-lacustrian environments. (En línea) In 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America (pp. 1-6). IEEE. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4104517/>
- Linares Calderón, J., & Camarero Martínez, J. (2010). Evaluando los efectos del cambio global sobre el funcionamiento de los abetos ibéricos mediante análisis de isótopos de carbono en los anillos de crecimiento. (En línea) *Revistas - Ecosistemas* - 2010, 19(3). Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/15848>
- López Ayllón, S. & Arellano Gault, D. (2008). Estudio en materia de transparencia de otros sujetos obligados por la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental. (En línea) Centro de Investigación y Docencia Económicas: Instituto Federal de Acceso a la Información: UNAM. Instituto de Investigaciones Jurídicas. Disponible en: <http://datos.cide.edu/handle/10089/16074>
- Marcondes, C., Medeiros, M., Marques Filho, J., & Helene, P. (2015). Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. (En línea) *Revista ALCONPAT*, 5(2), 97-114. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000200097
- Martínez García, R. (2016). Determinación de la concentración crítica de cloruros para varillas de diferente manufactura embebidas en concreto expuesto en ambientes marinos (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/15842/>
- Manrique Márquez, B. (2011). Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado: descripción del comportamiento postratamiento (En línea)

- (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en:
<http://eprints.uanl.mx/2554/1/1080223862.pdf>
- Mejía Duran, C. (2017). Guía de procedimiento para la determinación y evaluación de patologías en la construcción en edificaciones de concreto armado en Huaraz–Ancash-2017. (En línea) Repositorio ULADECH. Disponible en:
<http://repositorio.uladech.edu.pe/handle/123456789/2714>
- Mehta, P. & Monteiro, P. (2008). Concreto. Microestructura, propiedades e materiais, (En línea) IMCYC, 1(3). Disponible en:
https://www.academia.edu/download/68701923/CONCRETO_ESTRUCTURA_PROPIEDADES_Y_MATERIALES.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10. (En línea) Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Disponible en:
<https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- Montani, R. (2021) La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. (En línea) Construcción y Tecnología. Disponible en:
<https://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>
- Moreno, E., Lara, G., Sarabia, E., & Gómez, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. (En línea) Ingeniería, 8(2), 117-130. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46780210.pdf>
- Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. (En línea) Ingeniería, 10(3), 5-12. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46710301.pdf>

- Moreno, E., Solís Carcaño, R., & Torres López, M. (2011). Efecto de la reparación en concreto carbonatado de alta relación agua/cemento y bajo espesor de recubrimiento. (En línea) Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 34(3), 224-227. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0254-07702011000300005&script=sci_arttext
- Muñoz, E., & Gómez, D. (2013). Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. (En línea) Revista ingeniería de construcción, 28(1), 37-62. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50732013000100003&script=sci_arttext&tlng=p
- Neville, A. (2011). Properties of concrete. (En línea) New York: Pearson, 1(5). Disponible en: <https://pdfcoffee.com/properties-of-concrete-fifth-edition-a-m-neville-pdf-pdf-free.html>
- Normalización Española - UNE (2011). UNE-EN 197-1 (En línea) Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048623>
- Organización de Naciones Unidas (2020) El mundo registra concentración récord de dióxido de carbono a pesar de la COVID-19 (En línea) Tendencia en la concentración de CO2 atmosférico. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-mundo-registra-concentracion-record-de-dioxido-de-carbono-pesar>
- Orta, D. (2019). Diseño de estructuras de concreto reforzado. (En línea) Diseño de estructuras de concreto, 1(9). Disponible en: http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/8._clases_de_concreto.pdf.

- Ortiz, J., Aguado, A., Roncero, J., & Zermeño, M. (2009). Influencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de trabajabilidad y microestructurales de morteros y pastas de cemento. (En línea) *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 1(1), 2-24. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112009000100001&script=sci_arttext
- Ortiz, H., Escobar, C., & Sepulveda, S. (2018). Análisis estadístico de variables climatológicas en la ciudad de Cúcuta. (En línea) *Respuestas*, 23(1), 39-44. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6557384>
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. (En línea) *Revista ingeniería de construcción*, 33(2), 161-172. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50732018000200161&script=sci_arttext&tlng=p
- Oyarzún, D., Poblete, L., Nieto, F., Huerta, C., Lange, C., & Cifuentes, A. (2017). Efectividad de ejercicios submaximales versus protocolo convencional en el rango de movimiento glenohumeral tras reparación artroscópica del supraespinoso. (En línea) *Revista Chilena de Ortopedia y Traumatología*, 58(01), 013-020. Disponible en: <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/html/10.1055/s-0037-1600125>
- Pacheco Tuesca, M., & Utria Lafaurie, M. (2019). Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10% de cenizas de lodos (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad de la Costa). Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/5298>

- Passos, P., De Albuquerque, K., & Neto, T. (2019). Carbonatação de estruturas de concreto: estudo comparativo entre os modelos de Tuutti e Ceb Model Code. *GTS-Gestão, (En línea) Tecnologia e Sustentabilidade*, 2(2). Disponible en: <http://www.faengrv.com.br/gts/index.php/revistagts/article/view/162>
- Priano, C. (2011). Estado de conservación de hormigones estructurales en ambientes urbanos, rurales y marinos de la ciudad de Bahía Blanca y su zona de influencia. (En línea) Repositorio Digital Institucional de la Biblioteca Central "Profesor Nicolás Matijevic" de la Universidad Nacional del Sur. Disponible en: <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2172>
- Price, J., & Ortolano, L. (1981). Bureau of Reclamation planning: environmental factors. (En línea) *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, 107(1), 27-43. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JWRDDC.0000195>
- Quintero, L. (2003). Metodología. Editorial. (En línea) Dirección Regional Gobierno de Canarias. Disponible en: https://200.62.146.19/bibvirtualdata/Tesis/Salud/delgado_qe/cap5.pdf
- Quimbay Herrera, R. (2013). Aspectos de la evaluación del desempeño del concreto. (En línea) Colección Egresados. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9740>
- Rimshin, W. & Truntov, P. (2019). Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration. (En línea) *E3S Web of Conferences* 135, 03015. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503015>
- Rivera Corral, J. (2016). Evaluación del estado de degradación de diversos tipos de varilla de acero utilizadas como refuerzo en concretos carbonatados y contaminados con cloruros (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/15721/>

- Roa Rodriguez, G., Aperador, W., & Vera, R. (2014). Software para el cálculo de la velocidad de deterioro de los hormigones sometidos a carbonatación. (En línea) Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 34(1), 45-54. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0255-69522014000100005&script=sci_arttext
- Rojas, V. (2011). Metodología de la investigación. (En línea) Bogotá: Ediciones de la U, 2011. Disponible en: https://www.academia.edu/download/55118936/METODOLOGIA_DE_LA_INVESTIGACION_DISENO_Y_EJECUCION.pdf
- Rosas Chaves, J. (2014). Mobiliario urbano prefabricado en concreto con agregado grueso reciclado. (En línea) Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52709>
- Romero Hermida, I. (2020). Mineralización del CO₂ con residuos industriales para la fabricación de nuevos materiales de construcción: estructura y propiedades. (En línea) Repositorio IDUS.US. Disponible en: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/93266/Tesis_Isa_Registro.pdf?sequence=1
- Rómel Solís, Carcaño, O., & Moreno, E. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. (En línea) Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 21(3), 57-68. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000300004
- Ruello, M, Bellezze, T., Corinaldesi, V., Donnini, J., Eusebi, A, Fatone, F., Fava, G., Favoni, O., Fratesi, R., Giosué, C., Marcellini, M., Mazzoli, A., Mobili, A, Roventi, G, & Tittarelli, F. (2019) Sostenibilidad en materiales de construcción: de la valorización de residuos a la economía circular. (En línea) Università Politecnica delle Marche” (págs. 279-296).

- Springer, Cham. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32762-0_16
- Ruiz Valencia, D., Rodríguez, F., & León Neira, M. (2017). Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzada con fibras metálicas. (En línea) Revista ingeniería de construcción, 32(2), 45-58. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50732017000200004&script=sci_arttext&tlng=p
- Rumi, L., Montero, C., Iloro, F., & Ortega, N (2017) Absorción de CO2 por Carbonatación durante el Ciclo de Vida de Puentes de Hormigón ubicados en la Prov. de Buenos Aires (En línea) PROIMCA – PRODECA. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/prodeca-proimca/actas-proimca-2017/MCA22_Absorcion-de-C02-por-Car.pdf
- Saavedra Gonzaga, J. (2016). Interacción de la concha de abanico triturada con los agregados triturados y redondeados en mezclas de concreto. (En línea) Pirhua - Universidad de Piura. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2582>
- Sánchez, M., Klutke, G., y Rosowsky, D. (2011). Life-cycle performance of structures subject to multiple deterioration mechanisms / Rendimiento del ciclo de vida de estructuras sujetas a múltiples mecanismos de deterioro. (En línea) Structural Safety, 33, 206–217. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.03.003>
- Sánchez, N. L. (08 de mayo de 2013). Durabilidad del Hormigón (Proceso Carbonatación) – Universidad Politécnica de Valencia España. (En línea) CivilGeeks.com, Ingeniería y Construcción [Blog]. Disponible en: <https://civilgeeks.com/2013/05/08/durabilidad-del-hormigon-proceso-carbonatacion-universidad-politecnica-de-valencia/>

- Schutz, B., Rodriguez, T., Segura, A., Sánchez, C., & Raggiotti, B. (2018) Desarrollo, construcción y puesta en funcionamiento de cámara de carbonatación acelerada. (En línea) 8ª Jornadas de Ciencia y Tecnología CyTAL 2018, 509. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12272/5344/Libro2018.pdf?sequence=1#page=510>
- Silva, D., Da McCartney, J., Adegilson, J., Aquino, J., & Barreto, E. (2018) Corrosión en estructuras de hormigón armado: métodos de prevención y recuperación (En línea) Vicerrector Académico, 6. Disponible en: <http://www.univalle.edu/cochabamba/storage/app/media/investigacion/journal/journal42.pdf#page=8>
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales - ASTM (2021) Norma ASTM (En línea) Normas adhesivas, normas de construcción, normas de cemento, normas de albañilería, normas para techos y madera. Disponible en: <http://aceropedia.com/definicion/norma-astm/#:~:text=La%20norma%20ASTM%20conocida%20como,para%20una%20variedad%20de%20materiales%2C>
- Solís, R., & Moreno, E. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. (En línea) Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 21(3), 57-68. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000300004
- Solís, R., Moreno, E., & Serrano, C. (2013). Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. Concreto y cemento. (En línea) Investigación y desarrollo, 4(2), 15-25. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112013000100002

- Sotil Levy, A., & Zegarra Riveros, J. (2015). Análisis comparativo del comportamiento del concreto sin refuerzo, concreto reforzado con fibras de acero Wirand® FF3 y concreto reforzado con fibras de acero wirand® FF4 aplicado a losas industriales de pavimento rígido. . (En línea) Repositorio académico UPC. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/581616>
- Sosa, M., Pérez, T., Corvo, F., Torres, A., & Troconis, O. (2015). Estudio del deterioro de especímenes de concreto armado expuestas a 300 m de la costa de campeche, méxico. (En línea) Revista CENIC. Ciencias Químicas, 46, 81-89. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181643224013.pdf>
- Stefanoni, M., Angst, U. & Elsener, B. (2018). Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete. (En línea) Cement and Concrete Research, 103, 35-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>
- Soto Fuster, J. (2014). Alternativas de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos (En línea) (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/39869/PANEL.pdf?sequence=2>
- Sunyer, V., Bohigas, A., & Figuerola, C. (2020) Capítulo 5. El Cambio Climático. (En línea) Laboratorio Interdisciplinario sobre Cambio Climático de la UIB (LINCC UIB). Disponible en: http://lincc.uib.eu/wp-content/uploads/Cap%C3%ADtulo-5_Cambio-Clim%C3%A1tico_Estudio-sobre-la-prospectiva-econ%C3%B3mica.pdf
- Tae, K., Seung, J., Jang, J., Yong, Y., & Eunjong, E. (2017). Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect (En línea) International Journal of Concrete Structures and Materials, 11,

- (4), 687–700. Disponible en: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1007/s40069-017-0206-7>
- Talakokula, V., Bhalla, S., Ball, J., Bowen, C., Pesce, G., Kurchania, R., Bhattacharjee, B., Gupta, A., y Paine, K. (2016). Diagnosis of carbonation induced corrosion initiation and progression in reinforced concrete structures using piezo-impedance transducers. (En línea) *Sensors and Actuators: A Physical*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.033>
- Tinen Ruiz, S. (2018). Resistencia A La Compresión De Un Concreto, Elaborado Con Cemento Portland Tipo IY Aditivo Sikacem-1 Acelerante En Polvo. (En línea) SUNEDU. Disponible en: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2948810>
- Torres Ospina, H. (2014). Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho (En línea) (Doctoral dissertation, Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito). Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/169?locale-attribute=en>
- Trocónis, O. (2011). Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado. (En línea) *Revista de la Universidad del Zulia*, 2(2), 100-154. Disponible en: http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS_INCORPORACION/TI_OLADIS_TROCONIS.pdf
- Uhlig, S. (2020). ¡ CO₂= calentamiento global= cambio climático!¿ Y qué pasaría si todo fuera más complejo? Los continuos cambios climáticos: aspectos geológicos, arqueológicos y astrofísicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. (En línea) *Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular*, 42, 95-168. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/27852>

- Vaca Arciga, L. (2020). Evaluación del grado de envejecimiento del concreto en el desempeño de tratamientos superficiales con nanopartículas base silicio (En línea) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/19958/>
- Valencia, L. (2020). El desarrollo de la industria del cemento y del concreto en Guatemala. (En línea) *Cemento Hormigón*, (996), 15. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7256435>
- Valenzuela, C., & Rossani, H. (2019). Resistencia de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con cemento sustituido en 5%, 10% y 15% por relave de la mina Antamina. (En línea) *Publicaciones UsanPedro*. Disponible en: <http://publicaciones.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8043>
- Vásquez, M., & Guarniz, W. (2010). Vida Útil es Estructuras de Concreto Armado desde el Punto de Vista del Comportamiento del Material. (En línea) *Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego*. Disponible en: https://www.academia.edu/download/38428198/20101211-Corrosion-UPAO.pdf_VIDA_UTILsubrayado.pdf
- Vera, R., Villarroel, M., Delgado, D., Carvajal, A., De Barbieri, F., & Troconis, O. (2009). Duracon: influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. Parte 2. Resultados de Chile después de 5 años de exposición. (En línea) *Revista de la Construcción*, 8(1), 13-23. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127612575002.pdf>
- Ware, T. (2013). Diagnosing and repairing carbonation in concrete structures. (En línea) *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*, 1 (4), 338–344. Disponible en: <https://www.ingentaconnect.com/content/hsp/jbsav/2012/00000001/00000004/art00007>

Zhou, Y., Gencturk, B., Willam, K., y Attar, A. (2014). Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures. (En línea) Journal of Materials in Civil Engineering. Disponible en: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001209](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001209)