

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE SULFATOS Y CLORUROS EN EL
DETERIORO DE ESTRUCTURAS EN CONCRETO EN ZONAS COSTERAS DEL
ATLÁNTICO COLOMBIANO**

**KEVIN ERNIT JIMÉNEZ VÁZQUEZ
CÓDIGO: 504147
HERNÁN LOZANO OVALLE
CÓDIGO: 505049**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2018**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE SULFATOS Y CLORUROS EN EL
DETERIORO DE ESTRUCTURAS EN CONCRETO EN ZONAS COSTERAS DEL
ATLÁNTICO COLOMBIANO**

**KEVIN ERNIT JIMÉNEZ VÁZQUEZ
CÓDIGO: 504147
HERNÁN LOZANO OVALLE
CÓDIGO: 505049**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Asesor:
Ingrid Marylin Silva Rojas
Ingeniera**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2018**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá, noviembre, 2018

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1 Descripción del problema	16
1.2.2 Formulación del problema	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.2 Objetivos específicos.	18
1.4 JUSTIFICACIÓN	18
1.5 ALCANCE Y LIMITACIÓN	19
1.5.1 Alcance	19
1.5.2 Limitación	19
1.6 MARCO REFERENCIAL	20
1.6.1 Marco teórico	20
1.6.1.1 Concreto	20
1.6.1.2 Componentes del Concreto	20
1.6.1.3 Características y Funciones de los Componentes del Concreto	21
1.6.1.4 Propiedades del Concreto	21
1.6.1.5 Deterioro del concreto por sustancias químicas	22
1.6.2 Marco conceptual.	25
1.6.3 Estado del arte	26
1.6.4 Marco Legal	28
1.7 METODOLOGÍA	29
1.7.1 Tipo de investigación.	29
1.7.2 Fuentes de información	29
1.7.2.1 Fuentes Primarias	29
1.7.2.1 Fuentes Secundarias	29
1.8 DISEÑO METODOLÓGICO	29
1.8.1 Primera Etapa Revisión literaria	29
1.8.2 Segunda Etapa Realización de ensayos de caracterización de material	29
1.8.3 Tercera Etapa Realización de pruebas de laboratorio del concreto sometido a ataques de cloruros y sulfatos	30
1.8.4 Cuarta Etapa Análisis de resultados y conclusiones finales	30
2. ESTIMACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS Y ANÁLISIS DE TEMPERATURAS DE ZONAS A ESTUDIAR	32
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS OBJETO DE ESTUDIO	32
2.1.1 Golfo de Morrosquillo	32
2.1.2 Playa Blanca	32
2.1.3 Bahía Concha	32

2.2 PRESENCIA DE CLORUROS Y SULFATOS EN EL MAR DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	33
2.2.1 Cloruros y sulfatos en el mar costero	33
2.2.2 Cloruros y sulfatos presentes en el mar de las zonas de estudio	34
2.3 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO	35
3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA PRUEBAS DE ESTUDIO	37
3.1 CARACTERIZACIÓN AGREGADOS PÉTREOS	37
3.1.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino NTC 77	37
3.1.2 Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados NTC 92	40
3.1.3 Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso NTC 176	41
3.1.4 Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino NTC 237.	41
4. DISEÑO DE MEZCLA MÉTODO ACI 211	44
4.1 CONSIDERACIÓN DE CONTENIDO DE AIRE DE ACUERDO A MÁXIMO TAMAÑO NOMINAL DEL AGREGADO Y DETERMINACIÓN DE AGUA DE DISEÑO	44
4.1.1 Estimación de relación agua material cementante y resistencia a la compresión	45
4.1.2 Estimación de peso de agregado grueso por unidad de volumen de concreto	45
4.2 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DE DISEÑO	46
4.2.1 Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados NTC-1776	46
4.2.2 Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto NTC 396	47
4.2.3 Elaboración de especímenes de concreto y curado NTC-550	48
5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA MUESTRAS REALIZADAS EN LABORATORIO	50
5.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALES DE CONCRETO NTC-673	50
5.2 RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN	51
5.3 COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS	54
5.3.1 Análisis de Resistencias a 7 Días	54
5.3.2 Análisis de resistencias a 14 días	55
5.3.3 Análisis de Resistencias a 28 días	56
5.3.4 Análisis de resistencias a 71 días	56
5.4 ANÁLISIS DEL PH DEL CONCRETO ENDURECIDO	57
5.4.1 Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces1 ASTM C-4262	58
6. CONCLUSIONES	60

7. RECOMENDACIONES

62

BIBLIOGRAFÍA

63

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Tabla 1. Características y Funciones de los Componentes	21
Tabla 2. Características de las Propiedades del Concreto	22
Tabla 3. Niveles de exposición relacionados a un $f'c$ mínimo	23
Tabla 4. Componentes de agua de mar	33
Tabla 5. Concentraciones de Componentes de Zonas de Estudio	35
Tabla 6. Cantidades de Sulfatos y Cloruros a Utilizar en Modelo de Simulación	35
Tabla 7. Temperaturas Promedio	36
Tabla 8. Requisitos de gradación	37
Tabla 9. Registro de pesos y cálculo de arena tamizada	38
Tabla 10. Registro de pesos y cálculo de grava 1" tamizada	39
Tabla 11. Registro de pesos y cálculo peso unitario suelto y apisonado grava 1" y arena	40
Tabla 12. Registro de pesos y cálculo de densidades y absorción, para agregado grueso	41
Tabla 13. Registro de pesos y cálculo de densidades y absorción, para agregado fino	43
Tabla 14. Determinación de Agua y Contenido de Aire	44
Tabla 15. Contenido de Aire y Agua de Diseño	44
Tabla 16. Relación Agua Material Cementante	45
Tabla 17. Factores para determinación de peso de agregado grueso por unidad de volumen de concreto	45
Tabla 18. Pesos de materiales para mezcla por m^3	46
Tabla 19. Volumen de materiales de mezcla por m^3	46
Tabla 20. Proporciones de materiales para mezcla de diseño	47
Tabla 21. Tipificación de Muestras de Concreto	50
Tabla 22. Porcentajes de evolución Golfo de Morrosquillo	52
Tabla 23. Porcentajes de evolución Playa Blanca	53
Tabla 24. Porcentajes de evolución Bahía Concha	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes del concreto	20
Figura 2. Corrosión electrolítica del refuerzo en concreto expuesto a cloruros y humedad	24
Figura 3. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino NTC 77	38
Figura 4. Grafica granulométrica de arena gruesa	39
Figura 5. Grafica granulométrica de Grava 1".	40
Figura 6. Ensayo de Cono para Determinar Condición Superficialmente Seca	42
Figura 7. Extracción de aire y peso de picnómetro más muestra.	42
Figura 8. Contenido de humedad de agregados	47
Figura 9. Ensayo de asentamiento del concreto	48
Figura 10. Elaboración de muestras de concreto	48
Figura 11. Curado de muestras de Concreto	49
Figura 12. Medidas de muestras de concreto	51
Figura 13. Compresión de muestras de concreto	51
Figura 14. Curva de evolución de concreto, comparativa Golfo de Morrosquillo	52
Figura 15. Curva de evolución de concreto, comparativa Playa Blanca	53
Figura 16. Curva de evolución de concreto, comparativa Bahía Concha	54
Figura 17. Figura comparativa general a 7 días	55
Figura 18. Figura comparativa general a 14 días	55
Figura 19. Figura comparativa general a 28 días.	56
Figura 20. Figura comparativa general a 71 días	57
Figura 21. Determinación de pH.	58
Figura 22. Determinación de pH.	59

ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultados Ensayos Caracterización de Materiales	67
Anexo B. Resultados Pruebas de Resistencia a la Compresión	68

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de la investigación teórico experimental desarrollada, en la cual se realizó una revisión documental y se aplicaron pruebas de laboratorio, con fin de analizar el comportamiento del concreto estructural sometido a ataques de cloruros y sulfatos, presentes en la composición del agua marítima en los ambientes de tres ciudades de la región caribe colombiana, a una temperatura promedio característica de esta zona, haciendo un análisis comparativo con el cual se determinó en qué ciudad se pueden presentar mayores niveles de deterioro del concreto utilizado para estructuras, por la incidencia sulfatos y cloruros.

Palabras claves: cloruros, sulfatos, resistencia a la comprensión, concreto estructural, temperatura.

INTRODUCCIÓN

La baja durabilidad de las estructuras de concreto armado es de gran preocupación para la industria de la construcción alrededor del mundo, en Colombia, la mayor preocupación se da en zonas costeras, puesto que al deterioro del concreto estructural, se atribuye a las condiciones climáticas cálidas y los componentes químicos presentes en su ambiente; tal es el caso de la costa Atlántica Colombiana, en donde la corrosión del refuerzo se atribuye principalmente a la entrada de sales de degradación o carbonatación, lo cual se da por la concentración de éstas en las aguas marinas que, por la acción de las brisas marinas, llegan a las estructuras de concreto deteriorándolo.

Así mismo, la disminución de la vida útil en el servicio de las estructuras de concreto en zonas costeras, se atribuye a las condiciones del medio ambiente y geomorfología presente en ambientes marinos, especialmente a aquellos con elevada humedad relativa, variaciones de temperatura, acciones constantes del viento y contaminación del suelo y agua subterránea con cloruro y sales de sulfato, las cuales aceleran el ritmo del deterioro en la resistencia a compresión del concreto usada regularmente como indicador de la durabilidad del mismo. Por lo anterior, se desarrolló la presente investigación de carácter teórico – experimental, la cual se divide en 5 capítulos; en el primero se expondrán las generalidades del trabajo incluyéndose la descripción de antecedentes investigativos, la problemática y los objetivos de investigación, así como los referente teóricos concernientes al tema analizado.

En el segundo capítulo se da inicio al desarrollo del estudio, identificado y determinando mediante la revisión documental, la estimación de la cantidad de sulfatos y cloruros presentes en los mares de las ciudades de la costa caribe colombiana, así como el análisis de la temperatura de las tres zonas seleccionadas para el estudio de caso y la caracterización de los agregados, esto con el fin de establecer el diseño del curado para la realización de los ensayos de laboratorio.

En el capítulo tres se podrá encontrar el diseño de la mezcla de diseño con los respectivos ensayos de laboratorio aplicados a la misma para comprobar la calidad de los materiales y el cumplimiento de la normatividad establecida para el uso de este tipo de concreto, con lo que se garantiza que los resultados de las pruebas a las que se someterá el mismo mostraran resultados confiables.

Por otro lado, en el capítulo cuatro, se realizarán las pruebas de laboratorio a las muestras, para analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto sometido al ataque de sulfatos y cloruros en temperatura promedio de las zonas seleccionadas, según índices establecidos en el capítulo 2, comparando los resultados para cada una de las zonas con la muestra convencional, simulando ataque de sulfatos y cloruros de forma individual y combinados. Para finalmente, presentar las conclusiones y recomendaciones finales de la investigación.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El concreto es un material conglomerado muy utilizado en el sector de la construcción en Colombia, especialmente en estructuras como puentes, muelles, edificaciones y vías, ya que es un material que presenta propiedades como “trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad”¹, permitiéndole tener un alto desempeño en la capacidad de resistir una gran variedad de condiciones de exposición extremas durante su vida útil; sin embargo, y a pesar de sus altos niveles de resistencia y durabilidad, el concreto se ve expuesto a una serie de factores de deterioro, como son las afectaciones por ataques químicos, entre los que se tienen corrosión inducida por cloruros, carbonatación, ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice, sustancias presentes en ambientes bien sea de carácter urbano o marítimo costero.

Al respecto, en Colombia se han realizado investigaciones relacionadas con el tema, una de ellas es el estudio titulado “Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad” realizado por docentes y estudiantes de la Universidad de Antioquia en 2008, en donde se manifiesta que “el comportamiento en servicio del concreto depende de las condiciones atmosféricas en las que se encuentra expuesto, igualmente, la determinación del efecto de la atmósfera en la estabilidad de un material dado, depende de varios factores relacionados con el tiempo de humectación de la superficie y la contaminación atmosférica”², por lo cual el trabajo consistió en la realizaron pruebas de electroquímicos y pruebas de carbonatación en muestras de concreto reforzado y sin reforzar, expuestas a los ambientes de ciudades como Bogotá, Medellín y Barranquilla, las cuales presentan diferentes condiciones atmosféricas, para de este modo, poder determinar el grado de deterioro del concreto y de la varilla de refuerzo; una vez terminados los ensayos se encontró que en todas las probetas se presentó un perfil de carbonatación relacionada con altas temperaturas y bajas humedades causando que los poros de las probetas de mortero estuvieran secos y permitieran el ingreso con mayor facilidad del CO₂ atmosférico.

Así mismo, ingenieros de la Universidad del Valle, realizaron en 2013 una investigación titulada “Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas” en la que el autor expresa que “La combinación de las altas prestaciones a resistencia a la compresión que ofrece el hormigón y las excelentes propiedades mecánicas del acero lo hacen el material compuesto ideal para aplicaciones

¹ MARTÍNEZ, Ramón. ¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón? [en línea]. Bogotá: Interempresas [citado 24 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37070-Estructuras-de-hormigon.html>>

² CORREA, Esteban; MONTOYA, Rubiela; PEÑARANDA, Sergio; ECHEVERRÍA, Félix y CASTAÑO, Juan. Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad. En: Revista Científica Ingeniería y Desarrollo. Enero – febrero, 2008. no 23, p. 1

estructurales”³, pero que, sin embargo, éste al estar expuesto a ambientes agresivos como la exposición a iones cloruros y/o dióxido de carbono, genera efectos de corrosión del acero de refuerzo, y por consiguiente afecta la vida útil del concreto; por tanto la investigación se centró en la revisión del estado del conocimiento con respecto a la durabilidad del hormigón, haciendo énfasis en el análisis de los fenómenos que afectan la durabilidad del mismo y que generan corrosión al acero de refuerzo, incluyendo métodos de prevención y control que se han desarrollado.

Por otro lado, en el trabajo de grado realizado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, en 2010, “Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto en un ambiente acuoso con cloruro y sulfato”, cuyo objetivo fue evaluar la densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo, en hormigón expuesto a un ambiente agresivo de cloruro sulfato, para lo cual se sumergieron en soluciones con concentraciones de sulfato y cloruro, especímenes de mezcla agua –cemento con dos varillas de acero y una varilla de acero inoxidable, sometidos a pruebas utilizando técnicas electroquímicas y pulso galvanostático, obteniéndose como resultado que el grado de corrosión del acero de refuerzo del concreto es más severo en soluciones de 6000 ppm de Na_2SO_4 .

Finalmente, en 2015 docentes e investigadores de la Universidad Militar Nueva Granada realizaron la investigación titulada “Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero”⁵, en donde se evaluaron las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) RC-65/35- BN, influenciadas por dos ambientes corrosivos a corto plazo y la dosificación de fibras, realizando ensayos a especímenes de CRFA en forma de cilindros con fibras de acero, de la siguiente manera: “18 cilindros fueron sumergidos y sometidos a la acción de un medio acuoso, 18 en un medio de solución NaCl al 3.5 % (ion cloruro) y 18 permanecieron en condiciones inalteradas durante 60 días. Para esta fase de iniciación de la corrosión se observó una pérdida aproximada del 2 % en la resistencia a compresión, una disminución del 6 % del módulo de elasticidad y un aumento del 13 % en la relación de Poisson del CRFA. Estos resultados demostraron que a corto plazo los ambientes corrosivos no afectan significativamente las propiedades mecánicas en compresión del CRFA utilizado en este estudio”⁶.

³ AGUIRRE, A. M. y MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. En: Materiales de Construcción. Enero-marzo, 2013. vol. 63, no, 309, p. 7

⁴ CASAS ARCHILA, Jhon Milton. Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto en un ambiente acuoso con cloruro y sulfato. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Modalidad trabajo de grado, 2010. p. 10

⁵ CARRILLO, Julián; CÁRDENAS PULIDO, Jhon y APERADOR CHAPARRO, William. Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería y Desarrollo. Julio - diciembre, 2015. vol. 33, no. 2, p. 150

⁶ *Ibíd.*, p. 150

A nivel internacional, se tienen estudios como el titulado “Resistance of concrete against combined attack of chlorides and sulphates” (Resistencia del concreto contra el ataque combinado de cloruros y sulfatos), realizado por el Laboratorio de Investigación de Concreto de la Universidad de Ghent de Bélgica, reportaba que en éste país se presentan muchos daños en las construcciones en ambientes marinos, debido a la agresividad del agua de mar que contiene cloruros y sulfatos; siendo los cloruros elementos que “afectan la durabilidad iniciando la corrosión del acero de refuerzo y los sulfatos deteriorando el concreto mediante la formación de productos de reacción expansivos”⁷. Esta investigación comparó la resistencia contra el ataque de iones de cloruros y el ataque combinado cloruros y sulfatos, mediante pruebas de difusión natural basadas en NT Build 443, a distintas edades, ya que la penetración del cloruro disminuye con la edad concreta. Como resultados se tuvo que la resistencia del concreto contra los cloruros es influenciada por la temperatura a menor temperatura mayor resistencia a éstos, asimismo el contenido de C3A del cemento juega un papel importante en el mecanismo de ataque y en el comportamiento de unión de cloruros y sulfatos, cuando ambos iones penetran juntos, C3A influye en este transporte multi-iónico, así como en la durabilidad del concreto.

Por otro lado, Investigadores del Department of Civil Engineering y del Kalinga Institute of Industrial Technology de la India, en 2015 desarrollaron la investigación titulada “Acid, Alkali and Chloride Resistance of HighVolume Fly Ash Concrete” (Resistencia ácida, alcalina y al cloruro de hormigón volátil de gran volumen), cuyo objetivo fue encontrar variaciones en la resistencia a la compresión y la masa de muestras de hormigón sometidas a diferentes soluciones químicas de cloruro de sodio, sulfato de sodio y ácido sulfúrico, encontrándose que “la resistencia del concreto de control a los tres ataques químicos es mejor solo hasta 28 días de curado con agua. A los 56 días de curado con agua, LFC muestra una mejor resistencia contra el control y el HFC. Sin embargo, con el curado prolongado con agua de cubos de 90 días o más, el HFC ha demostrado consistentemente la resistencia más alta; mientras que el hormigón de control enfrentaba una gran pérdida de resistencia”⁸.

Al respecto el estudio realizado en 2016 “Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying–wetting cycles”⁹ (Resistencia del hormigón contra el ataque combinado de cloruro y sulfato en ciclos de secado y humectación), investigó la solución combinada de cloruro y sulfato para tres mezclas diferentes, incluidas cenizas volantes y escoria. El cambio de masa, el módulo de

⁷ MAES, Mathias; GRUYAERT, Elke y DE BELIE, Nele. Resistance of concrete against combined attack of chlorides and sulphates. *En: Cement and Concrete Composites*. October, 2014. vol. 53, p. 59

⁸ SAHOO, Sanjukta; DAS, B.B.; RATH, A. K. y KAR, B.B. Acid, Alkali and Chloride Resistance of High Volume Fly Ash Concrete. *En: Indian Journal of Science and Technology*. August 2015. vol. 8, no. 19, p. 1

⁹ CHEN, Yanjuan; GAO, Jianming; TANG, Luping y LI, Xuehong. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying–wetting cycles. *En: Construction and Building Materials*. March, 2016. vol. 106, no. 1, p. 650

elasticidad dinámica, las profundidades de penetración de cloruro se probaron en la solución diferente. Los resultados indicaron que las muestras de OPC mostraron un mayor deterioro en comparación con las muestras con cenizas volantes y escoria expuestas a un ataque de solución combinada en ciclos de secado y humedecimiento, así mismo, el sulfato adicional y superior compite en una solución combinada con un daño retardado para OPC bajo un ciclo de secado-humectación.

Otra investigación fue la realizada por ingenieros de la Universidad de Pristina en 2017 presentada en la Primera Conferencia internacional sobre materiales de construcción para un futuro sostenible, titulada “Corrosion In Concrete Under Sulphate And Chloride Attacks” (Corrosión en Concreto Bajo Sulfato y Ataques de Cloruro), en ésta se ratifica que “el concreto en estructuras se encuentra bajo varias influencias agresivas, siendo las más comunes: Contaminación atmosférica: los niveles de carbono y dióxido de azufre en la atmósfera, las que atacan directamente el concreto, así mismo, sales de sales que contienen cloruros y que han aumentado considerablemente en los últimos 20 años”¹⁰, disminuyendo el tiempo de vida de las estructuras. Y por tanto se debe someter el concreto a tratamientos que ofrezcan una alta resistencia al ingreso futuro de dióxido de carbono y cloruro.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema. El concreto es un material cuyas características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, lo han convertido en el material de construcción más utilizado no sólo en el mundo sino en Colombia, sin embargo, factores como “un medio ambiente cada vez más agresivo en las ciudades, el medio marino, con su gran poder de deterioro; así como los errores de diseño, las malas prácticas constructivas y la elección de materiales de bajo costo y calidad llevan a una estructura a un estado límite que obliga a intervenirla”¹¹.

En este sentido, las estructuras de concreto en Colombia presentan cierta vulnerabilidad, especialmente las localizadas en zonas costeras, pues se ha observado que, el agua de mar en su estado natural contiene diversas concentraciones de sales disueltas, y que la brisa marina genera altos contenidos de humedad que transmiten los cloruros y sulfatos, llegando éstos a las diferentes estructuras, generando deterioros en el concreto, así como fallas repentinas, agrietamientos, erosión y corrosión, que si no son prevenidas generan consecuencias catastróficas como el colapso total de la estructura o grandes pérdidas de dinero por mantenimiento. Al respecto, Londoño Gómez, explica que

¹⁰ KABASHI, Naser; KRASNIQI, Cene; SADIKAJ, Anita; BUBLAKU, Skender; MURIQI, Ali y MORINA, Hysni. Corrosion in concrete under sulphate and chloride attacks [en línea]. Zadar: 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/316440930_CORROSION_IN_CONCRETE_UNDER_SULPHATE_AND_CHLORIDE_ATTACKS>

¹¹ ROJAS PINEDA, Sheyla. El universo de la rehabilitación de estructuras [en línea]. Bogotá: Periódico El Tiempo [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5384175>>

“los ataques de sulfatos no solo producen degradación por expansión y fisuración, también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento, lo anterior también conlleva a una pérdida de adherencia entre la pasta y las partículas de los agregados”¹².

Así mismo, estos fenómenos de deterioro de estructuras de concreto por ataques de cloruros y sulfatos, no sólo se presentan en regiones cercanas al mar, en las zonas urbanas como Bogotá, en donde puentes y edificios, también presentan daños por corrosión, generadas adicionalmente por el dióxido de carbono que producen los vehículos, el humo de las fábricas y la humedad, ya que “estos componentes provocan que el concreto se carbonate, el acero se corroa y se produzca un fenómeno conocido como corrosión generalizada”¹³.

Por otro lado, en Colombia, el concreto empleado en la construcción de obras, especialmente las portuarias, es sometido a pruebas de esfuerzo, las cuales exigen que, los comportamientos de las resistencias mecánicas sean óptimas, sin embargo, en pocas ocasiones, se tiene en cuenta el estudio o análisis de la durabilidad del concreto en las estructuras. En este sentido, Juan David Osorio Experto en tecnología del concreto, manifiesta que “cuando se habla de durabilidad, es indispensable pensar en los ambientes en los que la estructura va a desarrollarse y es indiscutible considerar el comportamiento del material en su desarrollo como objeto fundamental de estudio, por cuanto, un concreto durable es aquel que por su configuración química, física y mecánica puede llegar a resistir ambientes exigentes como aquellos que están expuestos diariamente a dióxidos de carbono, cloruros y sulfatos, durante todo su periodo de vida útil”¹⁴.

Por lo anterior, se quiere realizar un estudio de exploración del concreto sometido a ataques de cloruros y sulfatos presentes en el mar de tres ciudades de los departamentos de Sucre, Bolívar y Magdalena, pertenecientes a la región caribe Colombina, a una temperatura promedio de esta zona, para así poder determinar el nivel de influencia de estas sustancias en las propiedades físico químicas y mecánicas del concreto así como su nivel de deterioro con miras a mejorar el tratamiento de este material para estructuras.

1.2.2 Formulación del problema. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el porcentaje de cloruros y

¹² LONDOÑO GÓMEZ, Elizabeth. Lo que debes saber sobre el ataque de sulfato en el concreto [en línea]. Bogotá: 360gradosenconcreto [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/lo-que-debes-saber-sobre-el-ataque-de-sulfato-en-el-concreto/>>

¹³ ROJAS PINEDA, Sheyla. El universo de la rehabilitación de estructuras [en línea]. Bogotá: Periódico El Tiempo [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5384175>>

¹⁴ OSORIO, Jesús David. Durabilidad del concreto en zonas costeras y obras portuarias [en línea]. Bogotá: 360 grados en concreto [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/309324267/DURABILIDAD-DEL-CONCRETO-EN-ZONAS-COSTERAS-Y-OBRAS-PORTUARIAS-proyecto-docx>>

sulfatos que más influencia tiene en el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto, teniendo en cuenta las temperaturas promedio de las zonas de estudio de la Región Caribe Colombiana y el tiempo de curado?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Determinar la influencia de cloruros y sulfatos en el comportamiento de las propiedades del concreto estructural y su deterioro en ciudades de la zona costera del Atlántico Colombiano.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar el rango de cloruros y sulfatos presentes en el mar de los departamentos de Sucre, Bolívar y Magdalena, mediante revisión documental.
- Analizar y determinar las temperaturas mínimas y máximas presentadas en las tres ciudades durante el último año, mediante revisión documental, para promediar la temperatura mínima y máxima a usar en la elaboración de los ensayos.
- Realizar pruebas de laboratorio para la caracterización de los materiales que conforman el concreto estructural, en cumplimiento con lo establecido en las normas INVIAS.
- Realizar pruebas de laboratorio del concreto estructural sometido a ataques de cloruros y sulfatos según rangos determinados, a temperaturas mínima y máxima promedio de las ciudades de la zona costera del Atlántico Colombiano.
- Determinar en qué ciudad de la zona costera del Atlántico Colombiano se presenta mayor nivel de afectación en las propiedades y deterioro del concreto estructural por la acción de cloruros y sulfatos, mediante comparación de resultados obtenidos en los ensayos realizados.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El efecto de cloruros y sulfatos en concreto estructural es un tema que se ha venido estudiando en los últimos tiempos, por lo que, con el desarrollo de esta investigación se quiere estudiar el comportamiento de estructuras de concreto en ambientes en los que se vean expuestas a este tipo de sustancias teniendo en cuenta las condiciones geográficas, ambientales y atmosféricas de los sitios o ciudades en donde se construyan, ya que éstas no son iguales en todo el territorio colombiano, lo que permitirá tener un punto de partida para diseñar tratamientos adicionales para estos materiales y que mitiguen o retrasen el efecto que puedan generar el ataque de cloruros y sulfatos en sus propiedades físico químicas y mecánicas y que alarguen la vida útil de dichas estructuras.

La importancia de esta investigación radica en el aporte que puedan generar los estudiantes al análisis de la incidencia de las diferentes sustancias presentes en los ambientes de las regiones de Colombia, en los materiales de construcción como el concreto, esto teniendo en cuenta que en la normatividad Colombiana que estipula las condiciones y/o requisitos del concreto para estructuras, no se menciona el uso de aditivos o recubrimientos especiales que prevengan los efectos de sustancias químicas o la temperatura en este material, especialmente en ambientes que presenten mayor concentración de éstas.

Finalmente, el desarrollo de esta investigación permitirá a los autores incorporar los diferentes conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la formación profesional y ponerlos en práctica en pro de generar nuevos conocimientos que contribuyan con el desarrollo y avance del sector de la construcción e ingeniería civil en el país.

1.5 ALCANCE Y LIMITACIÓN

1.5.1 Alcance. El alcance de la presente investigación será el siguiente:

- Realización de 16 ensayos de laboratorio según normas NTC, ASTM, INVIAS para la caracterización de agregados y diseño de mezcla de concreto, sometiéndolos a exposición de sulfatos y cloruros.
- Informe de resultados de los ensayos en donde se compare y analice el comportamiento mecánico del concreto expuesto a sulfatos y cloruros.

1.5.2 Limitación. Las posibles limitaciones para el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- Limitación en el tiempo requerido para la realización de los 16 ensayos, teniendo en cuenta que cada uno tiene una duración específica, por lo que se puede dificultar el cumplimiento de los plazos establecidos por la universidad para la realización del proyecto de grado.
- Dificultad en la disponibilidad y utilización de los equipos requeridos para realizar los 16 ensayos.
- Dificultad en la adquisición del material requerido para realizar los ensayos (Arena, Grava, cemento y químicos a emplear).
- Financiación del presupuesto requerido para la realización de la investigación.

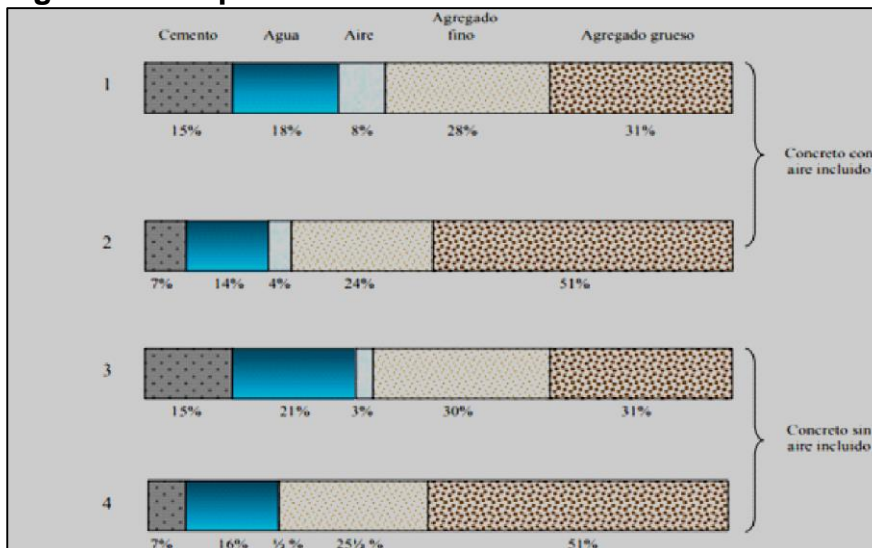
1.6 MARCO REFERENCIAL

1.6.1 Marco teórico.

1.6.1.1 Concreto. Según la empresa Argos el concreto es “una mezcla de cemento, grava, arena, aditivos y agua. Maleable en su forma líquida y de gran resistencia en su estado sólido”.¹⁵ Por otro lado Sánchez de Guzmán lo define como “la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión)”¹⁶

1.6.1.2 Componentes del Concreto. Como se mencionó anteriormente el concreto está compuesto por elementos cemento agua agregado fino y agregado grueso cada uno en proporciones diferentes como se muestra a continuación (véase la figura 1).

Figura 1. Componentes del concreto



Fuente. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología Del Concreto Y Del Mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar, 2001. p. 19

¹⁵ CEMENTOS ARGOS. Concreto [en línea]. Bogotá: La empresa [citado 24 marzo, 2018]. Disponible en Internet: □URL: <https://www.argos.co/Productos/Concreto>

¹⁶ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología Del Concreto Y Del Mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 2001. P. 16

1.6.1.3 Características y Funciones de los Componentes del Concreto

Tabla 1. Características y Funciones de los Componentes

COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS	FUNCIONES
CEMENTO	Fraguar al contacto con el agua	Aglutinar
AGUA	Libre de agentes contaminantes	Hidratar agregados y cemento
AIRE	Forma de burbujas en la mezcla	Puede impermeabilizar controlándose adecuadamente
AGREGADOS	Densos, resistentes a desgastes mecánicos	Forman un esqueleto resistente dentro del concreto, controlan la retracción por fraguado
ADITIVOS	Componentes orgánicos	Reductores de agua, inclusores de aire retardantes de fraguado, acelerantes de fraguado

Fuente. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología Del Concreto Y Del Mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar, 2001. p. 19-21

1.6.1.4 Propiedades del Concreto. Las propiedades el concreto le brindan la capacidad de ganar fuerza con el tiempo y ayudar a conservar los recursos debido a su capacidad para seguir siendo un material de alta calidad con poca o ninguna necesidad de reconstrucción o mantenimiento, pues resiste la descomposición, ardor y la oxidación, proporcionando un entorno estable y seguro.

El concreto presenta diferentes estados, en cada uno de éstos sus propiedades varían en grado considerable mediante el control de sus ingredientes, la temperatura, por ejemplo, en estado fresco las propiedades más importantes son la manejabilidad, la viscosidad, temperatura. Así mismo, el calor de hidratación como una propiedad térmica generada por la reacción de contacto entre el agua y el cemento, genera en la mezcla una serie de cristales endurecidos que conglomeran la mezcla generando en ella una resistencia mecánica durante el proceso de hidratación.

A continuación, se describe las características de cada una de las propiedades principales del concreto (véase la Tabla 2).

Tabla 2. Características de las Propiedades del Concreto

Propiedad	Características
Manejabilidad	Definición Capacidad de mantener un estado plástico desde su elaboración hasta su colocación en obra.
	Factores que influyen Condiciones ambientales “temperatura, humedad” Contenido de agua en la mezcla Fluidez de la pasta Contenido de aire Gradación y textura de los agregados Aditivos
Resistencia del concreto	Definición Capacidad de asumir esfuerzos mecánicos a compresión dependiendo de las características que componen la mezcla.
	Factores que influyen Relación Agua / material cementante Contenido de aire Influencia de agregados Curado Ataques químicos externos Condiciones ambientales “temperatura, humedad” Calidad de materiales
Durabilidad	Definición Resistencia a la exposición del clima y factores químicos del entorno que ocasionan abrasiones en su estructura en el tiempo transcurrido durante su uso y vida útil.
	Factores que influyen Humedecimiento y secado Congelamiento y deshielo Exposición a sustancias químicas agresivas Reacciones químicas de los agregados

Fuente. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología Del Concreto Y Del Mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar, 2001. p. 1-50

1.6.1.5 Deterioro del concreto por sustancias químicas. El concreto sufre deterioros que afectan sus propiedades físicas y mecánicas debido a exposiciones de sulfatos, cloruros, CO₂, y en ocasiones por reacciones químicas propias de la composición de los materiales empleados en la mezcla ocasionando afectaciones irreversibles que pueden llegar a limitar el funcionamiento de las estructuras de concreto.

A continuación, se describe las principales sustancias que generan mayor deterioro en el concreto:

➤ **Exposición por sulfatos.** El ataque de sulfato sobre concreto puede manifestarse en diferentes formas dependiendo del ambiente atmosférico al que está expuesto, pues en el momento en que los sulfatos entran al concreto, se combinan con la pasta de la mezcla que mantiene el concreto unido y comienza a destruirla. Así mismo, a medida que el sulfato se seca, se forman nuevos compuestos, llamados etringita. Estos nuevos cristales ocupan el espacio vacío y a medida que continúan formándose, hacen que la pasta se agriete generando daños más significativos en el concreto. En este sentido, la ACI y el código Europeo ENV 206, establecieron 4 niveles de exposición relacionados a un $f'c$ mínimo¹⁷, los cuales se presentara a continuación (véase la Tabla 3).

Tabla 3. Niveles de exposición relacionados a un $f'c$ mínimo

Tipo de Exposición a los Sulfatos	sulfatos /SO4) en agua (p.p.m)	Relación Agua/Cemento (a/c) Recomendada	$f'c$ Mínimo
Despreciable	0 a 150
Moderada	150 a 1500	0.5	280
Severa	1500 a 10000	0.45	315
Muy severa	>10000	0.45	315

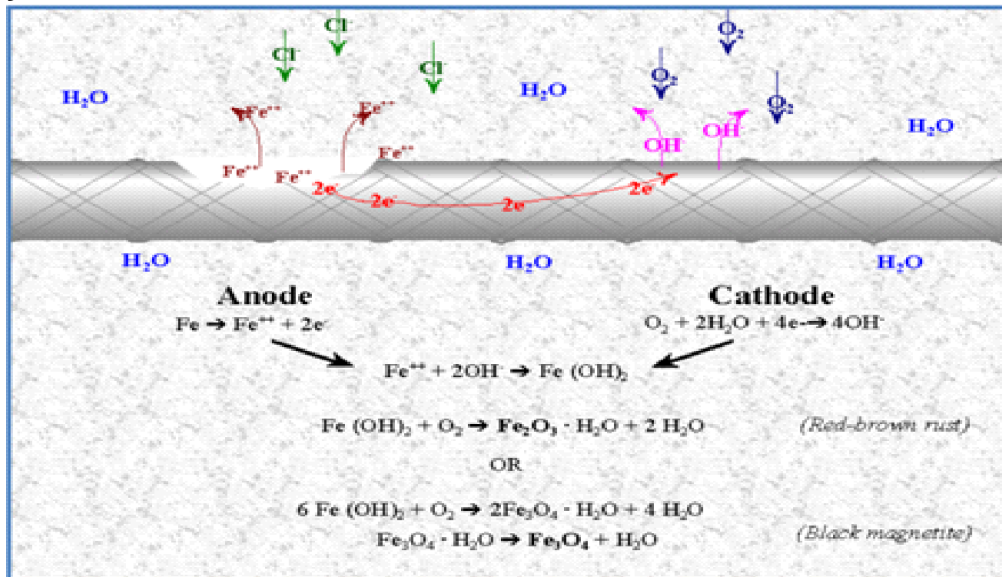
Fuente. CASAS ARCHILA, Jhon Miltón. Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto en un ambiente acuoso con cloruro y sulfato. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Modalidad trabajo de grado, 2010. p. 37

➤ **Exposición por cloruros.** Los concretos expuestos a una solución de cloruros pueden provocar roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero. “El ión Cl⁻ penetra en la película de óxido, a través de los poros y otros defectos, con mayor facilidad que otros iones, como por ejemplo el SO₄, o puede dispersar en forma coloidal la película de óxido e incrementar su permeabilidad, formándose así diminutos ánodos de metal activo, rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo”¹⁸ generándose una corrosión electrolítica (véase la Figura 2).

¹⁷ KABASHI; KRASNIQI; SADIKAJ; MORINA, Op.cit.,p.2.

¹⁸ BERMÚDEZ ODRIÓZOLA, Miguel Ángel. Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Madrid: Universidad Politécnica De Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, Canales y puertos. Modalidad trabajo de doctorado. 2007. P. 32.

Figura 2. Corrosión electrolítica del refuerzo en concreto expuesto a cloruros y humedad



Fuente. CASAS ARCHILA, Jhon Milton. Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto en un ambiente acuoso con cloruro y sulfato. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Modalidad trabajo de grado, 2010. p. 37

Como se puede ver en la Figura 2 la presencia del ion cloruro actúa como un catalizador en el proceso de la oxidación, al oxidar el acero pasa a formar cloruro férrico, (FeCl_2), “el cual reacciona con iones de hidroxilo generando hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, liberando iones de cloro, cuando el electrón liberado fluye a través del acero va formando una reacción de oxidación dando como resultante una reducción del pH cuya disminución de este altera la capa protectora que recubre el acero que se encuentra embebido en el concreto”¹⁹.

➤**Exposición por CO2.** La carbonatación en el concreto se debe a exposiciones constantes de CO_2 que se encuentra en el ambiente producto de la naturaleza y en gran parte producido por el hombre en procesos industriales y cotidianos. “El CO_2 en las estructuras de concreto descompone la capa pasiva que protege el acero de la estructura volviéndola susceptible a corrosión por contacto con agua y otras sustancias perjudiciales para el acero de la estructura”²⁰.

¹⁹ CASA ARCHILA, Op.cit.,p.2.

²⁰ WARE, Toby. Diagnosing and repairing carbonation in concrete structures. En: Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation. Junio. 2015. Volume 1 Number 4. P. 339.

1.6.2 Marco conceptual.

➤ **Absorción.** “Proceso por el cual un líquido es arrastrado dentro de un cuerpo sólido poroso y tiende a llenar los poros permeables del mismo; también se conoce como el aumento en masa de un cuerpo sólido poroso, resultante de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables”²¹

➤ **Asentamiento:** Se le llama asentamiento a “la diferencia de altura que hay entre la parte superior del molde y la parte superior de la mezcla fresca cuando ésta se ha asentado después de retirar el molde de ensayo slump”²²

➤ **Contenido de aire (air content).** “El volumen de los poros o vacíos de aire o de otro gas en la pasta de cemento, mortero o concreto, excluyendo los poros impermeables contenidos en las partículas del agregado, usualmente expresado como un porcentaje del volumen total de la pasta, mortero o concreto”²³

➤ **Condiciones Atmosféricas.** Comprenden el estado de la atmósfera en términos de temperatura, viento, nubes y precipitación, Se incluirán datos espaciales basados en mediciones, modelos o en una combinación de ambos, así como los lugares de medición.²⁴

➤ **Endurecimiento del concreto.** Desarrollo o ganancia de resistencia y otras propiedades de una mezcla cementicia, como resultado de la hidratación, después del fraguado final. el proceso de endurecimiento no depende de que el concreto se "seque", y normalmente es importante que el concreto se "cure" correctamente para mantener la humedad en el concreto (especialmente en superficies vulnerables) mientras la reacción del agua del cemento está activa. La pérdida temprana de humedad causará una reducción en la resistencia y conducirá a una peor durabilidad²⁵.

➤ **Esfuerzo (Stress)** — Fuerza por unidad de área.²⁶

➤ **Fraguado (setting).** El proceso debido a reacciones químicas, que ocurre después de la adición del agua de mezclado, y que produce un gradual desarrollo de rigidez de una mezcla cementicia.²⁷

²¹ THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-11. Standard Terminology Relating to Gypsum and Related Building Materials and Systems1. 1998. P. 4

²² UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA “JOSE SIMEON CAÑAS”, UCA. Materiales de Construcción [en línea]. El Salvador: CCC [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: □URL: <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoConcretoFresco/REVENIMIENTO.pdf>

²³ THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-125 Op.Cit P. 1

²⁴ DESOLMINIHAC, Hernán. Procesos y técnicas de construcción. 5 ed. Santiago de Chile: Ediciones uc, 2011. P. 238

²⁵ The American Society for Testing and Materials, ASTM C-125 Op.Cit P. 1

²⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op Cit P. C-32.

²⁷ THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-125 Op.Cit P. 1

➤ **Materiales cementantes (Cementitious materials)** —Materiales con propiedades cementantes por sí mismos al ser utilizados en el son materias primas que poseen excelentes propiedades de fraguado y endurecimiento cuando se mezclan en una pasta con agua. Existen dos tipos de materiales de cementación, hidráulicos y no hidráulicos. Los materiales de cementación hidráulica se fijan y endurecen en agua. Un ejemplo de un material de cementación hidráulica es el cemento Portland. Los materiales de cementación no hidráulicos se fijan y endurecen en el aire, pero no se endurecen en el agua. Como resultado, estos materiales no se pueden utilizar en el agua. Un ejemplo de un material de cementación no hidráulico es la cal ordinaria.

Los materiales de cementación pueden ser silíceos o calcáreos. El carbonato de calcio y la sílice son los principales constituyentes de los materiales de cementación. Otros constituyentes son cuarzo, feldespato, calcita, arcilla, óxido de hierro, óxido de calcio, sulfato de cobre, manganeso, aluminio y azufre. Dependiendo de la composición química y su disponibilidad en la naturaleza, los materiales de cementación se clasifican como cal, yeso, yeso de París, cemento, concreto y construcción de concreto reforzado (RCC). Los materiales de cementación se utilizan como adhesivo para ladrillos, piedras y azulejos. Estos materiales también se utilizan para hacer grandes estructuras y edificios coherentes..²⁸

➤ **Relación agua-cemento (water-cement ratio).** Relación entre la masa de agua, (excluyendo únicamente el agua absorbida por los agregados) y la masa de cemento Portland en concreto, mortero o graut, expresada preferiblemente como una fracción decimal.²⁹

➤ **Resistencia a la compresión.** Es una característica mecánica del concreto, el cual por medio de una prensa hidráulica se aplica una carga sobre la superficie superior del cilindro dando como resultado un esfuerzo aplicado para llegar a su estado límite de falla.³⁰

1.6.3 Estado del arte. La incidencia de los sulfatos y cloruros en el concreto, es un tema que ha sido investigado de manera amplia a nivel internacional, sin embargo, autores han determinado que es importante seguir analizándolo, involucrando otros elementos o factores que pueden causar aún más incidencia en el comportamiento del concreto, como es el caso de la temperatura; en este sentido, Hossack y Thomas, investigadores de la Brunswick en Canadá, realizaron experimentos de laboratorio, estudiando efecto de la variación de temperaturas de 23°C, 10° C, 5° C y 1°C en la tasa de ataque de sulfato al cemento Portland, estudiándolo en combinación con varios materiales de cementación suplementarios. Las barras de mortero se sumergieron en Na₂SO₄ al 5% (33,800 ppm SO₄²⁻) Solución durante

²⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op Cit p. C-34.

²⁹ THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-125 Op. Cit p. 1

³⁰ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Op Cit. P. 180

15-30 meses³¹. Una vez pasado este tiempo, se encontró que, a temperaturas más altas, los materiales de cementación suplementarios, particularmente las cenizas volantes, mejoraron en gran medida la resistencia al ataque externo de sulfato; por otro lado, a temperaturas más bajas, el metacaolín mejoró la resistencia al ataque de sulfato; así mismo, las cenizas volantes tuvieron poco o ningún efecto sobre la resistencia al sulfato a baja temperatura. Concluyéndose que las alteraciones de la resistencia al sulfato se podían atribuir a la dilución del cemento Portland en presencia de materiales de cementación suplementarios; sitios de nucleación adicionales proporcionados por SMC finamente molidos; y las reacciones puzolánicas e hidráulicas de los SCMs.

Al respecto, Hager (2013)³², ha manifestado en su investigación que el efecto de una alta temperatura en el concreto cubre los cambios que tienen lugar en la pasta de cemento, los agregados, así como la interacción de estos dos componentes, que resultan en cambios de las características físicas y mecánicas del concreto, dejando claro que una alta temperatura genere efectos en las propiedades físicas seleccionadas del concreto, incluido el cambio de color, la deformación térmica, las deformaciones térmicas bajo carga y las deformaciones térmicas transitorias, además de generar cambios en las propiedades mecánicas como la relación tensión-tensión, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad; por lo que según Vasavan (2017), “la mezcla de altas temperaturas con sales de sulfato entran en los poros del hormigón en solución por acción capilar y difusión. La acción de la mecha lleva la solución de sulfato a la superficie expuesta, y por evaporación, la concentración de ión sulfato aumenta gradualmente hasta que se cristaliza”³³.

Los cambios en la temperatura ambiente y en la humedad relativa hacen que las sales de sulfato sufran ciclos de cristalización y disolución, o hidratación y deshidratación. Cuando la cristalización y la hidratación están acompañadas por una expansión volumétrica, los ciclos repetidos pueden causar un deterioro del concreto similar al causado por los ciclos de congelación y descongelación.

Ahora bien, Nguyen-Cote (2014), mostró en investigaciones que, las pruebas de las aguas salobres alrededor de estructuras de concreto han mostraron que al estar expuestas a sulfatos de hasta 2000 ppm y un pH bajo de 4 a 5, junto con cloruros, resultaron con múltiples modos de deterioro lo que contribuye a su daño durante con en el corto plazo. La investigación forense de pilotes de hormigón pretensado prefabricados tomados de un entorno costero reveló daños extensos derivados de múltiples mecanismos de deterioro. La corrosión inducida por el cloruro de las

³¹ HOSSACK, Ashlee M.y THOMAS, Michael D.A. The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na₂SO₄ solution. En: Cement and Concrete Research. July, 2015. vol. 73, p. 136

³² HAGER, Izabela. Comportamiento del hormigón de cemento a alta temperatura. En: Boletín de la academia de ciencias polaca ciencias técnicas. Mazo –abril, 2013. vol. 61, no. 1, p. 2

³³ VASAVAN, Manilal. Sulfate Attack and Sulfate Content in Concrete: A Literature Review [en línea]. New York: LinkedIn Corporation [citado 17 noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.linkedin.com/pulse/sulfate-attack-content-concrete-literature-review-manilal-vasavan/>>

hebras de pretensado en las zonas de salpicadura y marea de las pilas provocó el agrietamiento y la deslaminación de la cubierta de hormigón, así como una pérdida de la sección transversal del acero. Los patrones medidos de ingreso de cloruro sugirieron que la calidad del concreto no era adecuada para proporcionar una vida útil de más de 100 años en el medio ambiente marino. Además, se produjo un grave deterioro del concreto debido al ataque de sulfato en las regiones sumergidas de las pilas, con una carbonatación también evidente allí y en las regiones de marea³⁴.

1.6.4 Marco Legal. En Colombia en la elaboración de Mezclas de concreto se rige bajo los parámetros estipulados en las normas NTC y ASTM a continuación se presentan las normas que se tendrán en cuenta en el proyecto:

NTC 77 Método De Ensayo Para El Análisis Por Tamizado De Los Agregados Finos Y Gruesos

NTC 176 Densidad y absorción agregado grueso

NTC 237 Densidad y absorción agregado fino

NTC 174 Especificaciones de los agregados para concreto

NTC 129 Toma de muestras de agregados

NTC 092 Masa unitaria agregados

NTC396. Asentamiento de concreto

NTC454 toma de muestras

NTC550. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra

NTC673. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales

NTC1377 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio

NTC 1776: 1994, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados

ASTM C-4262 Determinación de ph en concreto endurecido

NTC 4049 Ensayo de contenido de cloruros y sulfatos en concreto endurecido

³⁴ NGUYEN-COTE, Dom. Mecanismos de deterioro múltiple en pilotes de hormigón costero: un estudio de caso forense [en línea]. Ontario: Giatecs [citado 17 noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.giatecscientific.com/education/multiple-deterioration-mechanisms-in-coastal-concrete-piles-a-forensic-case-study/>>

NTC 5551 Durabilidad de estructuras de concreto

NSR-10 Titulo C

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 Tipo de investigación. Se desarrollará una investigación experimental, en la cual se usan experimentos y principios encontrados en el método científico, para analizar eventos determinados. En este caso se realizarán ensayos de laboratorio en los cuales se Expondrá a sulfatos y cloruros unas probetas de concreto, con lo cual se podrá estudiar sus características de físicas, mecánicas y químicas cuyos resultados serán comparados con una muestra de la misma mezcla, pero sin exposición química, es decir sin sulfatos y cloruros.

1.7.2 Fuentes de información. Se incluyen las siguientes fuentes de información.

1.7.2.1 Fuentes Primarias. Normas NTC, ASTM, INVIAS, aplicables para el estudio de agregados y diseño de mezclas de concreto, resultados ensayos de laboratorios, reportes e informes atmosféricos de temperaturas de las ciudades de Santiago de tolú, Santa Marta y Cartagena.

1.7.2.1 Fuentes Secundarias. Se utilizarán documentos como manuales, guías, libros y trabajos de grado relacionados con el tema.

1.8 DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación se desarrollará en 4 etapas principales:

1.8.1 Primera Etapa Revisión literaria. En esta etapa se hará una revisión documental de informes y/o estudios ambientales y atmosféricos de las ciudades de Santiago de tolú, Santa Marta y Cartagena, con la cual se podrá determinar el rango de cloruros y sulfatos presentes en sus mares, así mismo se harán análisis de laboratorio de muestras tomadas de éstos para corroborar la información documental y tener más precisión en los rangos de estas sustancias para la realización de los ensayos en la etapa práctica de la investigación.

Igualmente, en esta etapa se realizará una revisión documental sobre las temperaturas presentadas en las tres ciudades durante el último año, información que permitirá caracterizar las temperaturas mínimas y máximas, que serán utilizadas para la realización de los ensayos de comprobación.

1.8.2 Segunda Etapa Realización de ensayos de caracterización de material. En esta etapa se realizará las siguientes actividades:

Adquisición y selección de materiales caracterización del concreto estructural, según los requerimientos estipulados en las normas colombianas

Realización de ensayos como se describe a continuación:

NTC 77 Método De Ensayo Para El Análisis Por Tamizado De Los Agregados Finos Y Gruesos

NTC 176 Densidad y absorción agregado grueso

NTC 237 Densidad y absorción agregado fino

NTC 174 Especificaciones de los agregados para concreto

NTC 129 Toma de muestras de agregados

NTC 092 Masa unitaria agregados

NTC396. Asentamiento de concreto

NTC454 toma de muestras

1.8.3 Tercera Etapa Realización de pruebas de laboratorio del concreto sometido a ataques de cloruros y sulfatos. En esta etapa se desarrollarán las siguientes actividades:

Diseño de mezcla para concreto de 21.1 Mpa, para la elaboración de las probetas que van a estar expuesta al ataque de sulfatos y cloruros.

Preparación de la mezcla de sulfatos y cloruros según rangos establecidos en la etapa 1.

Exposición de probetas al ataque de sulfatos y cloruros durante la maduración del concreto a temperaturas establecidas en la etapa 1.

Realización de pruebas de resistencia y pH de las probetas

1.8.4 Cuarta Etapa Análisis de resultados y conclusiones finales. En esta etapa se realizarán las siguientes actividades:

Comparación de resultados de pruebas de resistencia y pH de las probetas correspondientes a cada ciudad en cada una de las temperaturas seleccionadas.

Determinación de la ciudad costera del Atlántico Colombiano que mayores niveles de afectación genera en las propiedades y deterioro del concreto de acuerdo al rango de sulfatos y cloruros presentes en ésta y a la temperatura de la zona

Realización del informe final con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

2. ESTIMACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS Y ANÁLISIS DE TEMPERATURAS DE ZONAS A ESTUDIAR

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS OBJETO DE ESTUDIO

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron tres ciudades de la costa atlántica las cuales fueron el Golfo de Morrosquillo - Sucre, Playa Blanca – Cartagena y Bahía Concha - Santa Marta, de las cuales a continuación se describen sus principales características.

2.1.1 Golfo de Morrosquillo. Ubicado en el municipio de Santiago de tolú, departamento de Sucre, el cual tiene una extensión de 30.122 hectáreas, de los cuales 16.5 km son de costas, correspondiendo al núcleo densamente poblado, un área aproximada de 3.655 hectáreas lo que sería un 12,13% del área total del municipio y unas 26.467 hectáreas que corresponde a un 87,86% a las áreas del sector rural, son áreas de vocación agropecuaria, de reserva ecológica, forestal y asentamientos poblacionales menores. Presenta paisajes geomorfológicos definidos: la zona plana se presenta en forma de corona, su inclinación es escasísima, hasta el punto que en promedio de los Montes de María hacia el mar la llanura solo desciende dos metros por cada kilómetro, ésta se cierra tanto al norte como al sur por la aproximación de las montañas al mar. El Golfo de Morrosquillo presenta una temperatura media de 18°C a 30°C y una altitud de la cabecera municipal de 3 m.s.n.m³⁵.

2.1.2 Playa Blanca. Ubicado en el departamento de Bolívar, localizado al noroccidente de Colombia, puerta de entrada a Suramérica, y eje central de todo el continente americano, es el más extenso de la región Caribe colombiana y el séptimo más grande en todo el territorio colombiano; comprende un área total de 25.978 Km², cuenta con un Distrito que es su capital Cartagena de Indias, 46 municipios, 447 centros poblados y un territorio insular conformado por las islas de Tierra bomba, Barú, Islas del Rosario, Isla Fuerte e Islas de San Bernardo; presenta una posición geográfica estratégica, ideal para el desarrollo portuario y turístico. Está conformada por 2.025.573 habitantes, de los cuales 77% habita en la cabecera municipal y el 23% restante en zona rural. Cartagena presenta una temperatura media de 23°C a 32°C y una altitud de la cabecera municipal de 2 m.s.n.m³⁶.

2.1.3 Bahía Concha. Santa Marta, se encuentra a orillas de la bahía del mismo nombre sobre el Mar Caribe, en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta en el departamento del Magdalena, La altura promedio de la ciudad es de 2 msnm, pero con una diferencia de altura que va, en el territorio del municipio, desde

³⁵ ALCALDIA SANTIAGO DE TOLÚ. Descripción Geográfica [en línea]. Tolú: La alcaldía [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://santiagodetolu-sucre.gov.co/Paginas/default.aspx>>

³⁶ CAMARA DE COMERCIO DE CARTAGENA. Descripción Geográfica [en línea]. Cartagena: CCC [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: https://www.cccartagena.org.co/sites/default/files/publicaciones/cartagena_y_bolivar_una_ubicacion_estrategica_para_el_comercio_exterior.pdf>

el nivel del mar hasta los 5.775 msnm en el Pico Cristóbal Colón, que es el más elevado de toda Colombia ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta, Posee un clima cálido y seco, con precipitación media anual de 362 mm, humedad relativa del 77% y rango de temperatura entre los 23°C a 32°C ³⁷.

2.2 PRESENCIA DE CLORUROS Y SULFATOS EN EL MAR DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

2.2.1 Cloruros y sulfatos en el mar costero. El agua de los océanos no es pura, sino que contiene en solución una gran variedad de elementos y compuestos químicos llamados sales, en una proporción de 96.5% de agua y 3.5% de estos últimos, por lo que un litro de agua de mar contiene los siguientes componentes y cantidades de cada una (véase la Tabla 4).

Tabla 4. Componentes de agua de mar

COMPONENTES	CANTIDAD	UNIDADES
Cloruro de sodio	24	gramos
Cloruro de magnesio	5	gramos
Sulfato neutro de sodio	4	gramos
Cloruro de calcio	1,1	gramos
Cloruro de potasio	0,7	gramos
Bicarbonato de sodio	0,2	gramos
Bromuro de sodio	0,096	gramos
Ácido bórico	0,026	gramos
Cloruro de estroncio	0,024	gramos
Fluoruro de sodio	0,003	gramos
Agua destilada	1000	mililitros
Salinidad aproximada 3,45% - pH 7.9-8.3		

Fuente: BIBLIOTECA DIGITAL DEL ILCE. La composición química del agua del mar [en línea]. México [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: >URL: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/><

De acuerdo con la Tabla 4. Se observa que, el cloro y el sodio son los constituyentes fundamentales del agua del mar y se encuentran en forma de cloruro de sodio que se conoce como la sal común. Después del cloro y el sodio, el magnesio es el elemento más abundante en el agua del mar, se encuentra en una relación constante respecto al cloro. Se combina con otros elementos formando cloruro de magnesio, sulfato de magnesio y bromuro de magnesio y está presente en el esqueleto de algunos organismos marinos. Este calcio, combinándose con los carbonatos, constituye la estructura del esqueleto calizo, interior o exterior, de un gran número

³⁷ ALCALDIA DE SANTA MARTA. Descripción Geográfica [en línea]. Santa Marta: La alcaldía [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.santamarta.gov.co/geografia>>

de organismos, como los foraminíferos, pequeños animales del plancton marino, los corales y las algas marinas que viven en el fondo del mar y que forman el bentos; también se encuentran en los caparazones de los crustáceos y en la concha de los moluscos³⁸.

En el caso del mar colombiano éste se caracteriza por presentar variaciones estacionales y espaciales tanto en la temperatura, como la salinidad, por ejemplo:

En febrero la salinidad en la superficie alcanza 36 ppm (ppm=partes por millón) y la temperatura 26 °C y en agosto la salinidad baja a 35 ppm y la temperatura sube a 28°C. así mismo, se han detectado cinco tipos diferentes de aguas: las superficiales que van desde la superficie a los 50m, con una temperatura media de 27°C y salinidad de 35,5 ppm; las subsuperficiales intermedias, entre 70 y 100 m, con una temperatura de 23,5 °C y salinidad de 37,0 ppm; las intermedias, que se encuentran entre los 400 y 600 m, con una temperatura media de 15°C y salinidad de 34,5 ppm; las subantárticas intermedias, entre 700 y 800 m, con una temperatura media de 10 °C y salinidad de 35,3 ppm y las profundas del Atlántico Norte, que se encuentran debajo de los 1.000 m, con una temperatura de 4 °C y salinidad de 35 ppm³⁹.

2.2.2 Cloruros y sulfatos presentes en el mar de las zonas de estudio. Para el caso de la zona de estudio de la investigación se documentaron las características químicas de tres regiones costeras del Atlántico Colombiano, encontrándose que los componentes relacionados con ph, salinidad, conductimetría, y turbiedad no presentan variaciones significativas.

En cuanto a la cantidad de cloruros presentes en el mar de las tres zonas de estudio, se obtuvo que, en el Golfo de Morrosquillo es de 19375,0 mg/L, Playa Blanca 20450,0 mg/L y Bahía Concha 20281,3 mg/L, siendo Golfo de Morrosquillo el de menor concentración de cloruros ya que Playa Blanca y Bahía concha presentan una variación 169 mg/L. Por otro lado, en cuanto a la concentración de sulfatos, la del Golfo de Morrosquillo es de 2554,5 mg/L, Playa Blanca 2623,6 mg/L y Bahía Concha 2646,0 mg/L, observándose que en Bahía Concha es la zona con más concentración de sulfatos⁴⁰ (véase la Tabla 5).

³⁸ BIBLIOTECA DIGITAL DEL ILCE. La composición química del agua del mar [en línea]. México [citado 19 septiembre, 2018]. □ disponible en internet: URL: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>

³⁹ IM EDITORES. Libros de la colección ecológica del Banco del Occidente [en línea]. Colombia [citado 19 septiembre, 2018]. □ disponible en internet: URL: <https://www.imeditores.com/>

⁴⁰ SOLER W, DURANGO H. y SOLER JP. Control microbiano de agua de mar mediante microfiltración. En: Rev Fac Nac Salud Pública. Abril – mayo, 2010. vol. 28, no. 2, p. 144

Tabla 5. Concentraciones de Componentes de Zonas de Estudio

VARIABLES	TIPO DE MUESTRAS		
	GOLFO DE MORROSQUILLO	PLAYA BLANCA	BAHIA CONCHA
pH	8,26	8,23	8,24
Salinidad (g/L)*	32,2	35,3	36,5
Conductimetría (msiemens/cm)*	49,3	53,5	55,1
Dureza total (mg/LCaCO3)	6025	6740	6550
Turbiedad (UNT)	0,2025	0,166	0,1675
Cloruros (mg/L)§	19375	20450	20281,3
Sulfatos (mg/LSO4)	2554,5	2623,6	2646

Fuente. SOLER W, DURANGO H. y SOLER JP. Control microbiano de agua de mar mediante microfiltración. En: Rev Fac Nac Salud Pública. Abril – mayo, 2010. vol. 28, no. 2, p. 144

Teniendo en cuenta lo anterior, para la realización del modelo de curado para las muestras a ensayar en laboratorio se utilizarán los datos encontrados para cada zona de estudio, los cuales en resumen serán los siguientes (véase la Tabla 6).

Tabla 6. Cantidades de Sulfatos y Cloruros a Utilizar en Modelo de Simulación

ZONA	SULFATOS	CLORUROS
	mg/L	mg/L
GOLFO DE MORROSQUILLO	2554,5	19375,0
PLAYA BLANCA	2623,6	20450,0
BAHÍA CONCHA	2646,0	20281,3

Fuente. SOLER W, DURANGO H. y SOLER JP. Control microbiano de agua de mar mediante microfiltración. En: Rev Fac Nac Salud Pública. Abril – mayo, 2010. vol. 28, no. 2, p. 144

2.3 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO

El clima de la región Caribe de Colombia es en general cálido, enmarcándose dentro de la categoría de clima tropical. “La región Caribe ubicada en el norte del país, haciendo frontera con el citado mar y con Venezuela, está compuesta por 8 Departamentos y posee distintas variantes geográficas; desde las grandes llanuras mayoritarias, hasta los sistemas montañosos de Santa Marta.

Así, las temperaturas, no suelen bajar de los 20°C durante el invierno, mientras que en la época de clima cálido la temperatura puede superar fácilmente los 30°C; se destaca que esta característica se mantiene también cuando se habla de precipitaciones, sin embargo, para las zonas de estudio, durante el año 2018 se

presentaron variaciones de temperaturas, aunque no fueron tan significativas, ni en su temperatura máxima ni en la mínima como se muestra a continuación (véase la Tabla 7)

Tabla 7. Temperaturas Promedio

Temperatura, SANTIAGO DE TOLÚ, SUCRE (Golfo de Morrosquillo)									
AÑO	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Promedio
T máxima (°C)	32,7	32,8	33,4	32,9	31,6	31,1	31,9	31,5	32,24
T mínima (°C)	20,1	20,9	21,6	22,2	22,4	22,1	21,6	21,6	21,56
T promedio (°C)	26,4	26,8	27,5	27,5	27	26,6	26,7	26,5	26,88
Temperatura, Cartagena, BOLIVAR (Playa Blanca)									
AÑO	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Promedio
T máxima (°C)	31,8	31,9	32,4	32,2	32,2	31,8	31,8	31,6	31,96
T mínima (°C)	22	22,4	23,2	23,8	24,2	23,8	23,8	23,8	23,38
T promedio (°C)	26,9	27,1	27,8	28	28,2	27,8	27,8	27,7	27,66
Temperatura, Santa Marta, Magdalena (Bahía Cocha)									
AÑO	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Promedio
T máxima (°C)	33	33,5	33,7	33,4	32,6	32,7	32,7	32,4	33,00
T mínima (°C)	21,7	22,6	23,7	24,9	25,1	24,6	24	24	23,83
T promedio (°C)	27,3	27,8	28,3	28,6	28,8	28,9	28,9	28,8	28,43

Fuente. CLIMATE DATA. Clima [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.climate-data.org/location/3650/>>

Como se puede observar, en el caso de las zonas de estudio, se documentaron las temperaturas de tres regiones costeras del Atlántico Colombiano, encontrándose que la temperatura máxima promedio anual registrada durante los últimos 8 años es de Bahía Cocha registrando con 33° C y la mínima se presentó en Tolú la cual fue de 21,56 °C.

Dado lo anterior, y teniendo en cuenta que las variaciones de la temperatura de las tres zonas de estudio no son significativas, se calculó la temperatura promedio de las tres regiones de estudio según los datos de la Tabla 7, encontrándose que ésta es de 27,65°C, sin embargo, para realizar el curado de las muestras de concreto se determinó utilizar una temperatura media de 27°C, ya que ésta es más fácil de controlar durante la realización de las pruebas.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA PRUEBAS DE ESTUDIO

3.1 CARACTERIZACIÓN AGREGADOS PÉTREOS

Teniendo en cuenta que la normatividad colombiana estipula que los materiales de construcción, en este caso el concreto estructural, debe cumplir con una serie de parámetros, antes de realizar las pruebas de laboratorio objeto de estudio de la investigación, se procede a realizar la debida caracterización del material a usar, lo que garantiza que la simulación del concreto de las pruebas tendrá las mismas características del material usado normalmente en las obras estructurales.

De acuerdo con lo anterior, para la realización los ensayos de caracterización se usarán agregados provenientes de la cantera JPMC ubicada en el departamento del Tolima, y con los cuales se caracterizan las propiedades físicas de los agregados de acuerdo a las NTC para agregados.

3.1.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino NTC 77. El objetivo de este ensayo es determinar la distribución de partículas de los agregados por medio de tamizaje.

“El ensayo se realiza después de tener una muestra de agregado seco previamente pesada, se separa a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más reducidas para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas, donde se van registrando la cantidad en peso de material retenida en cada uno de los tamices”⁴¹ donde se trazará una curva granulométrica cumpliendo con los requisitos dispuestos en la NTC 174 (véase la Tabla 8 y la Figura 3).

Tabla 8. Requisitos de gradación

GRAVAS				ARENAS			
ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA		ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)	Límite Inferior	Limite Superior	(mm)	(Denom. Estándar)	Límite Inferior	Limite Superior
12,5	1/2"	100%	100%	38	1 1/2"	100%	100%
9,5	3/8"	100%	100%	25	1"	95%	100%
4,76	N° 4	85%	100%	19	3/4"	60%	80%
2,38	N° 8	60%	80%	12,5	1/2"	25%	60%
1,19	N° 16	45%	65%	9,5	3/8"	13%	35%
0,6	N° 30	30%	55%	4,76	N° 4	0%	10%
0,3	N° 50	15%	35%	2,38	N° 8	0%	5%
0,15	N° 100	2%	14%	0,075	N° 200	0%	2,0%
0,075	N° 200	0%	7%				

Fuente. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Concretos. Especificaciones De Los Agregados Para Concreto. NTC-174. Bogotá: ICONTEC, 2000. p. 8

⁴¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC-77. Bogotá: ICONTEC, 1994, p. 2

Figura 3. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino NTC 77



Fuente. Los Autores

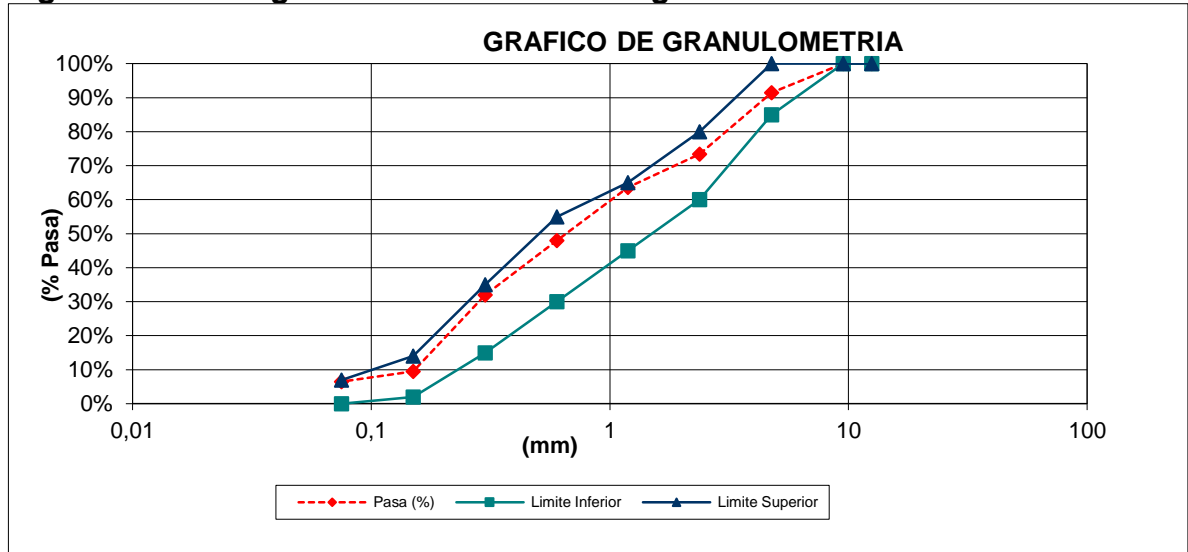
De acuerdo con los datos obtenidos los porcentajes que pasan en la gradación de la arena gruesa cumplen con los parámetros máximos y mínimos estipulados en la especificación NTC-174, material apto para mezcla de concreto, obteniendo un módulo de finura de 2,91. (Véase la Tabla 9 y la Figura 4).

Tabla 9. Registro de pesos y cálculo de arena tamizada

CARACTERISTICAS FISICAS DE ARENA GRUESA							
Muestra: <u>1</u>		Descripción: <u>Arena</u>		Mina: <u>JPMC</u>		Fecha: <u>31/05/2018</u>	
Ensayo: <u>31/05/2018</u>							
ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	(Denom. Estándar)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
						Limite Inferior	Limite Superior
12,5	1/2"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
9,5	3/8"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
4,76	N° 4	167,5	8,5%	8,5%	91,5%	85%	100%
2,38	N° 8	353,8	18,1%	26,6%	73,4%	60%	80%
1,19	N° 16	191,4	9,8%	36,4%	63,6%	45%	65%
0,6	N° 30	307,3	15,7%	52,0%	48,0%	30%	55%
0,3	N° 50	312,9	16,0%	68,0%	32,0%	15%	35%
0,15	N° 100	441,5	22,5%	90,5%	9,5%	2%	14%
0,075	N° 200	57,7	2,9%	93,5%	6,5%	0%	7%
Fondo		128,0	6,5%	100,0%	0,0%		

Fuente. Los Autores

Figura 4. Grafica granulométrica de arena gruesa



Fuente. Los Autores

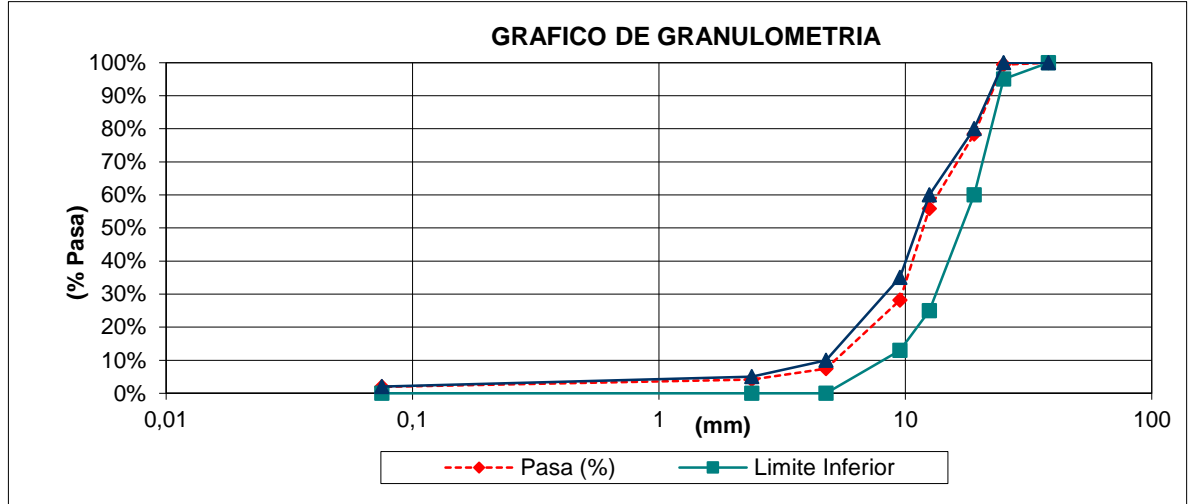
Por otro lado, y de acuerdo con los datos obtenidos los porcentajes que pasan en la gradación de la grava cumplen con los parámetros máximos y mínimos estipulados en la especificación NTC-174, material apto para mezcla de concreto, obteniendo como máximo tamaño nominal 1". (Véase la Tabla 10 y la Figura 5).

Tabla 10. Registro de pesos y cálculo de grava 1" tamizada

CARACTERISTICAS FISICAS DE GRAVA DE 1"							
Muestra: <u>1</u>		Descripción: <u>Grava</u>		Mina: <u>JPMC</u>		Fecha: <u>31/05/2018</u>	
Ensayo: <u>31/05/2018</u>							
ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)					Limite Inferior	Limite Superior
38	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
25	1"	22,4	0,6%	0,6%	99,4%	95%	100%
19	3/4"	734,2	21,0%	21,7%	78,3%	60%	80%
12,5	1/2"	786,8	22,5%	44,2%	55,8%	25%	60%
9,5	3/8"	967,1	27,7%	71,9%	28,1%	13%	35%
4,76	N° 4	721,6	20,7%	92,5%	7,5%	0%	10%
2,38	N° 8	115,4	3,3%	95,8%	4,2%	0%	5%
0,075	N° 200	77,3	2,2%	98,0%	2,0%	0%	2,0%
Fondo		68,4	2,0%	100,0%	0,0%		

Fuente. Los Autores

Figura 5. Grafica granulométrica de Grava 1”.



Fuente. Los Autores

3.1.2 Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados NTC 92. En este ensayo se determinará la masa unitaria suelta y compacta de los agregados finos y gruesos dispuestos para el diseño de mezcla.

Para la masa unitaria compacta, “se llena una tercera parte del molde aforado con el material seco y se compacta con la varilla apisonadora dando 25 golpes de inserción al material, repitiendo el procedimiento con las dos terceras partes restantes, se nivela el material con el borde molde y se registra el peso, este procedimiento se realiza de igual manera para la arena y la grava”⁴².

Para el procedimiento del ensayo de la masa unitaria suelta, “se vierte el material llenándolo completamente descargando el material a una altura de 2” sobre el borde del molde, se nivela el material con el borde del molde, se pesa y se registran datos, este procedimiento se realiza de igual manera para la arena y la grava”⁴³ (véase la Tabla 11).

Tabla 11. Registro de pesos y cálculo peso unitario suelto y apisonado grava 1” y arena

CONDICIÓN	MATERIAL	
	ARENA	GRAVA 1"
	g/cm ³	g/cm ³
PESO UNITARIO SUELTO	1,345	1,269
PESO UNITARIO APISONADO	1,631	1,442

Fuente. Los Autores

⁴² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC-92. Bogotá: ICONTEC, 1995. p. 6

⁴³ *Ibid.*, p. 6

De acuerdo con los resultados obtenidos el material de agregado grueso tiene un peso unitario seco apisonado de 1,631 g/cm³, para la arena gruesa.

De acuerdo con los resultados se tiene un peso unitario seco apisonado de 1,442 g/cm³, para la grava de 1”

Lo cual son datos de gran importancia para poder determinar la cantidad de agregados a utilizar en la mezcla.

3.1.3 Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso NTC 176. La muestra de agregado grueso se sumerge en agua durante 24 horas aproximadamente para saturar los poros. “Luego se remueve el agua y se seca la superficie de las partículas, y se determina su masa. Posteriormente, la masa de la muestra es determinada y sumergida en el agua, finalmente, la muestra es secada al horno y se determina su masa una tercera vez. Se usan las masas obtenidas y con las fórmulas de este método de ensayo, se calculan tres tipos de densidad y la absorción”⁴⁴ (véase la Tabla 12).

Tabla 12. Registro de pesos y cálculo de densidades y absorción, para agregado grueso

PRUEBAS	No. 1	No. 2	PROMEDIO
A - Peso material seco (gr)	3071,8	3062,0
B - Peso en aire S.S.S. (gr)	3204,0	3199,2
C - Peso en agua S.S.S. (gr)	1866,5	1868,5
B - C	1337,5	1330,7
A - C	1205,3	1193,5
B - A	132,2	137,2
GS. BULK= A/(B-C)	2,297	2,301	2,299
GS. BULS SSS= B/(B-C)	2,396	2,404	2,400
GS. APARENTE=A/(A-C)	2,549	2,566	2,557
ABSORCIÓN= (B-A)/A*100 (%)	4,30	4,48	4,39

Fuente. Los Autores

Como se puede observar la densidad de la grava a utilizar para el diseño de mezcla es de 2,4 g/cm³ y absorción de 4,39% promedio, dato muy importante para el diseño de mezcla, ya que no se tiene un rango de aceptabilidad para este dato.

3.1.4 Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino NTC 237. La muestra de agregado fino se sumerge en agua durante 24 horas aproximadamente para saturar los poros. “Luego se remueve el agua y se seca la superficie de las partículas, donde se determina la humedad superficial del material con el ensayo del cono descrito en la NTC-237, donde se apisona con un pistón 25 veces distribuyéndolos en la superficie y se levanta el cono verticalmente. Cuando el agregado fino se asienta levemente, ello indica que ha alcanzado la

⁴⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC-176. Bogotá: ICONTEC, 1995. p. 3

condición superficialmente seca esperada para este ensayo”⁴⁵ (véase la Figura 6).

Figura 6. Ensayo de Cono para Determinar Condición Superficialmente Seca



Fuente. El Autor

Se llena el picnómetro parcialmente con agua. “Inmediatamente se introduce dentro del picnómetro 500 g \pm 10 g de agregado saturado y superficialmente seco, y se llena con agua adicional hasta aproximadamente el 90 % de la capacidad. Se gira, invierte y agita el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire. Se determina la masa total del picnómetro, con la muestra y el agua”⁴⁶ (véase la Figura 7).

Figura 7. Extracción de aire y peso de picnómetro más muestra.



Fuente. Los Autores

⁴⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC-237. Bogotá: ICONTEC, 1995. p. 4-5

⁴⁶ *Ibid.*, p. 5

Tabla 13. Registro de pesos y cálculo de densidades y absorción, para agregado fino

PRUEBAS	No. 1	No. 2	PROMEDIO
A - Peso material seco (gr)	416,3	418,6	
B - Peso del picnómetro lleno (gr)	704,1	702,8	
C - Peso del picnómetro + muestra (gr)	961,9	961,0	
S - Peso del material S.S.S. (gr)	431,7	430,5	
S - A	15,4	12,0	
(B+S-C)	173,9	172,3	
GS. BULK= $A/(B+S-C)$	2,394	2,430	2,412
GS.BULS SSS= $S/(B+S-C)$	2,482	2,499	2,491
GS. APARENTE= $A/(B+A-C)$	2,626	2,611	2,619
ABSORCIÓN= $(S-A)/A*100$	3,70	2,86	3,28

Fuente. Los Autores

Como se puede evidenciar el resultado de laboratorio arrojó una densidad promedio de 2,49 g/cm³ y una absorción de 3,28%, siendo mayor la densidad del agregado fino a la del grueso, debido a que el agregado fino tiene una mejor acomodación de partículas.

4. DISEÑO DE MEZCLA MÉTODO ACI 211

El diseño realizado se basa en cálculos de volumen absoluto ocupados por los ingredientes del concreto, “el procedimiento tiene como consideración los requisitos de consistencia, resistencia y durabilidad”⁴⁷, que para este caso se diseña una mezcla de 21,1 MPa, equivalente a una resistencia de 3000 psi, con un contenido de aire natural estimado de 1,5% y 10 cm de revenimiento.

4.1 CONSIDERACIÓN DE CONTENIDO DE AIRE DE ACUERDO A MÁXIMO TAMAÑO NOMINAL DEL AGREGADO Y DETERMINACIÓN DE AGUA DE DISEÑO

La estimación de aire y agua en la mezcla, depende del tamaño máximo nominal del agregado a utilizar que para este caso es de 1”, proporciona estimaciones de la mezcla requerida agua para concreto hecha con varios tamaños máximos de agregado, con y sin inclusión de aire. “Dependiendo de textura y forma de agregados, los requisitos de agua de mezcla pueden estar algo por encima o por debajo de los valores tabulados, pero son lo suficientemente precisos para la primera estimación”⁴⁸ (véase las Tablas 14 y 15).

Tabla 14. Determinación de Agua y Contenido de Aire

Water, lb/yd ³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
Slump, in.	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	6
Non air entrained concrete								
1 to 2	350	33	315	300	275	260	220	190
3 to 4	385	365	340	325	300	285	245	210
6 to 7	410	385	360	340	315	300	270	--
Approximate amount of entrapped air in non air entrained concrete. percent.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-8

Tabla 15. Contenido de Aire y Agua de Diseño

Tamaño Máximo Nominal	25	mm
Contenido De Aire Estimado	1,5	%
Asentamiento	100	mm
Agua De Diseño	340	lb/yd ³
	193	Lt/m ³

Fuente. Los Autores

⁴⁷ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-1

⁴⁸ Ibid., p. 211.1-8

Para el diseño de mezcla se estima un contenido de aire de 1,5%, que es aire naturalmente atrapado por la mezcla del concreto, el cual se toma por el tamaño máximo nominal del agregado, con un asentamiento de 100mm para diseño de la mezcla de concreto.

4.1.1 Estimación de relación agua material cementante y resistencia a la compresión. La estimación de la relación de agua-cemento está determinado por la resistencia a compresión de diseño y tipos de mezcla sin inclusor de aire, que para este caso la relación agua- cemento será de $A/C=0,68$, para una mezcla de 21,1 MPa (véase la Tabla 16).

Tabla 16. Relación Agua Material Cementante

Compressive strength at 28 days, psi	Water-cement ratio, by weight	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
6000	0.41	----
5000	0.48	0.40
4000	0.57	0.48
3000	0.68	0.59
2000	0.82	0.74

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-11

4.1.2 Estimación de peso de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Se determina la cantidad de agregado grueso por unidad de volumen mediante el módulo de finura del agregado fino (véase la Tabla 17) y el máximo tamaño nominal del agregado grueso, permitiendo obtener un coeficiente de 0,66.

Tabla 17. Factores para determinación de peso de agregado grueso por unidad de volumen de concreto

Nominal maximum size of aggregate. in.	Volume of oven-dry-rodded coarse aggregate per unit volume of concrete for different fineness moduli of fine aggregate+			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-12

Peso seco del Agregado grueso = $0,66 \times$ Peso unitario compactado del Agregado grueso

Peso seco del Agregado grueso = $0,66 \times 1442 \text{ kg/m}^3 = 951,72 \text{ kg}$

Según lo descrito anteriormente, a continuación, se presenta el resumen de los pesos de los materiales para la mezcla por m^3 (véase la Tabla 18).

Tabla 18. Pesos de materiales para mezcla por m^3

CONTENIDO DE AIRE	1,5	%
AGUA DE DISEÑO	193	lts
a/c	0,68	-----
CANTIDAD DE CEMENTO	284	kg
PESO DE GRAVA	951	kg
PESO DE ARENA	853	kg

Fuente. Los Autores

De acuerdo con lo anterior se determina el peso de los agregados para un metro cúbico de mezcla de concreto, dando como resultado 951Kg para grava y 853Kg para la arena, de acuerdo con la relación a/c y la cantidad de agua calculada, se determina que para un metro cubico de concreto se utilizaría 284Kg de cemento.

En cuanto a los volúmenes de la mezcla, se hace la verificación obteniendo lo siguiente (véase la Tabla 19).

Tabla 19. Volumen de materiales de mezcla por m^3

CEMENTO	94,5170	m^3
AGUA	192,8147	m^3
AIRE	15,0000	m^3
GRAVA	372,1034	m^3
ARENA	325,5649	m^3
Total	1000	m^3

Fuente. Los Autores

De acuerdo con la Tabla 19 se realiza una verificación del volumen de los materiales para un metro cúbico, cumpliendo con el objetivo de las cantidades para un metro cúbico.

4.2 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DE DISEÑO

4.2.1 Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados NTC-1776. Este ensayo se realiza con la finalidad de determinar la cantidad de humedad retenida en los agregados, por medio de una fuente calor que induce a la evaporación del agua contenida en los poros de los agregados, secado del material hasta obtener una masa constante, siendo la

diferencia de pesos entre el húmedo y el seco la cantidad de agua retenida por los agregados (véase la Figura 8).

Figura 8. Contenido de humedad de agregados



Fuente. Los Autores

Tabla 20. Proporciones de materiales para mezcla de diseño

DESCRIPCIÓN PROYECTO:	CUADRO DE PROPORCIONES DE DISEÑO DE MEZCLA										
		21,1 Mpa	Asentamiento/Consistencia de Diseño (mm):			Volumen a mezclar (litros):		100	Fecha de elaboración de la mezcla:		23-Jul-18
		Contenido de Aire esperado (%):	1,5%			55					
MATERIAL	PROCEDENCIA	DENSIDAD g/cm ³	VOLUMEN litros	PESO SECO kg	PESO MEZCLA (kg)	UNIDAD	HUMEDAD %	ABSORCIÓN %	HUMEDAD LIBRE, %	PESO CORREGIDO MEZCLA	
CEMENTO 1	HOLCIM	3,00	95	284	15,60	kg	-	-	-	15,60	
AGUA	EAAB	1,00	193	193	10,60	kg	-	-	-	9,26	
ARENA1	Arena Gruesa JPMC	2,49	326	811	44,60	kg	6,22	3,28	2,94	47,38	
GRAVA 1	Grava 1" JPMC	2,40	372	893	49,11	kg	4,46	4,39	0,06	51,30	
AIRE	AIRE ESPERADO	-----	15,00								
TOTAL	-	-	1000	2180	-	-	-	-	-	-	

Fuente. Los Autores

En el Cuadro anterior se determina la cantidad de materiales a utilizar para un volumen de 55 litros de mezcla de concreto para el cual se fundirá 70 probetas de concreto.

4.2.2 Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto NTC 396. Este ensayo tiene por objeto determinar la fluidez del concreto elaborado en laboratorio, la cual la muestra de concreto se coloca en un molde tronco cónico compactándose con una varilla. “El cono se levanta permitiendo el asentamiento del

concreto, la medición del asentamiento está dada por la diferencia de la altura inicial y la altura final desplazada medida en centímetros⁴⁹, que para este diseño es de 10 cm (véase la Figura 9).

Figura 9. Ensayo de asentamiento del concreto



Fuente. Los Autores

4.2.3 Elaboración de especímenes de concreto y curado NTC-550. En la norma específica la elaboración de los especímenes de concreto, la cual se utilizará formaleta cilíndrica de 100mm de diámetro y una altura de 200mm. “Se coloca el concreto en tres capas de igual volumen apisonando con la varilla 25 veces en forma de espiral cada capa penetrando aproximadamente 12mm la capa inferior. Después de apisonar cada capa, se golpea suavemente de diez a quince veces los bordes del molde con el martillo de caucho sacando las burbujas de aire que hayan quedado atrapadas en la mezcla⁵⁰ (véase la Figura 10).

Figura 10. Elaboración de muestras de concreto



Fuente. Los Autores

⁴⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC-396. Bogotá: ICONTEC, 1992. p. 1

⁵⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC-550. Bogotá: ICONTEC, 2000. p. 7

Las muestras se dejan rotuladas y sumergidas en una concentración de cloruros y sulfatos, específica de las zonas de estudio con una temperatura media aproximada de 27°C para cada región para su curado (véase la Figura 11).

Figura 11. Curado de muestras de Concreto



Fuente. Los Autores

5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA MUESTRAS REALIZADAS EN LABORATORIO

5.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALES DE CONCRETO NTC-673

Este método de ensayo consiste en “la aplicación de una carga axial de compresión a cilindros moldeados a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la máxima carga alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal de la probeta de concreto”⁵¹.

Las muestras de concreto se marcan por zonas y tipo de exposición de la siguiente manera (véase la Tabla 21)

Tabla 21. Tipificación de Muestras de Concreto

TIPIFICACIÓN	UBICACIÓN	TIPO DE EXPOSICIÓN
A	CONVENCIONAL	n/a
B-1	GOLFO DE MORROSQUILLO	CLORUROS
B-2		SULFATOS
B-3		CLORUROS + SULFATOS
C-1	PLAYA BLANCA	CLORUROS
C-2		SULFATOS
C-3		CLORUROS + SULFATOS
D-1	BAHÍA CONCHA	CLORUROS
D-2		SULFATOS
D-3		CLORUROS + SULFATOS

Fuente. Los Autores

Una vez tipificadas, las probetas de concreto se miden tanto en altura como en diámetro (véase la Figura 12), se registra su peso y posteriormente se aplica carga axialmente para determinar su resistencia a compresión (véase la Figura 13).

⁵¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC-673. Bogotá: ICONTEC, 2000. p. 2

Figura 12. Medidas de muestras de concreto



Fuente. Los Autores

Figura 13. Compresión de muestras de concreto



Fuente. Los Autores

5.2 RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN

Conocer la evolución de la resistencia a la compresión de concreto ($f'c$) resulta de suma importancia para “poder predecir la resistencia que éste puede tener a los 28 días, respecto a la que posea a los 7 días e incluso, a una menor edad. Debido a las distintas variables que intervienen en la evolución de la resistencia a la compresión con la edad, se hace complejo establecer alguna regla general para su predicción. Esta es la razón por la que se sugiere que debe determinarse la relación de las resistencias versus el tiempo de maduración”⁵².

⁵² CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. Medida del desempeño real del concreto [en línea]. México [citado 14 octubre, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://www.imcyc.com/revistacyt/septiembre2013/pdfs/ingenieria.pdf>>

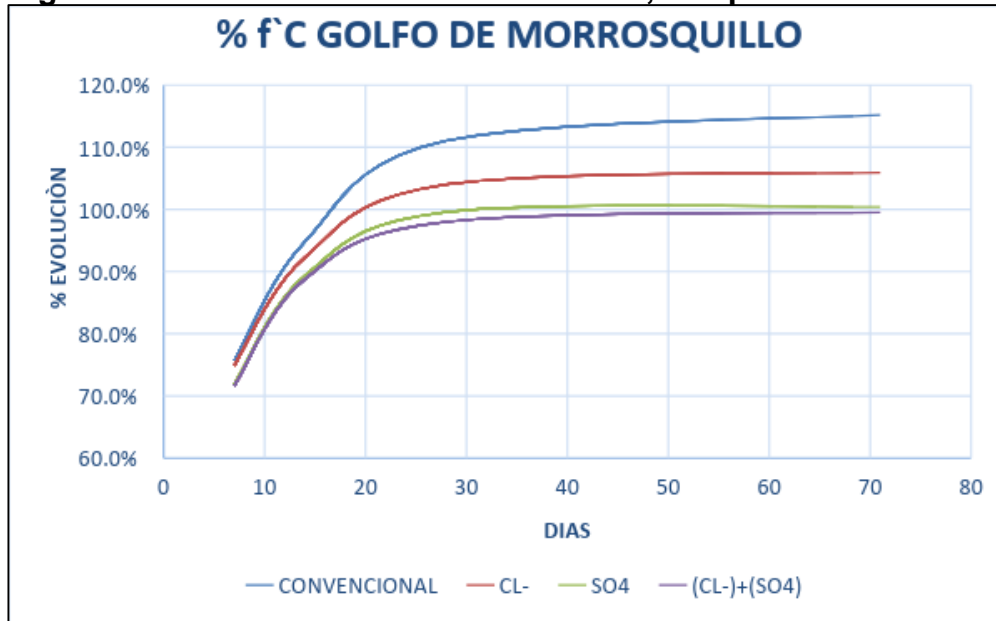
De acuerdo con lo anterior, en la presente investigación se analiza la resistencia a la compresión del concreto de cada una de las zonas de estudio seleccionadas, durante los periodos de análisis establecidos para cada una, para luego hacer la comparación de resultados de las tres zonas y determinar en cual se observa mayor incidencia de los cloruros y sulfatos en la resistencia del concreto. A continuación, se puede observar los resultados (véase las Tablas 22, 23 y 24 y, las Figuras 14, 15 y 16).

Tabla 22. Porcentajes de evolución Golfo de Morrosquillo

GOLFO DE MORROSQUILLO				
EDAD	CONVENCIONAL	CL	SO4	CL+SO4
7	75,7%	74,9%	71,9%	71,6%
14	94,8%	92,3%	89,3%	88,8%
28	111,1%	104,0%	99,6%	98,0%
71	115,2%	105,9%	100,4%	99,5%

Fuente. Los Autores

Figura 14. Curva de evolución de concreto, comparativa Golfo de Morrosquillo



Fuente. Los Autores

Como se puede observar la evolución de la resistencia de las muestras de concreto, del Golfo de Morrosquillo, sometido a cloruros, sulfatos y cloruros + sulfatos, se evidencia que a los 7 días de curado, tiene más incidencia las muestra que están sometidas a sulfatos con una disminución promedio de evolución de 3,95% aproximadamente con respecto a la muestra convencional, esta diferencia se puede evidenciar hasta los 71 días en la cual se observa que las muestras sometidas a sulfatos + cloruros no cumplen con la resistencia de diseño de la mezcla,

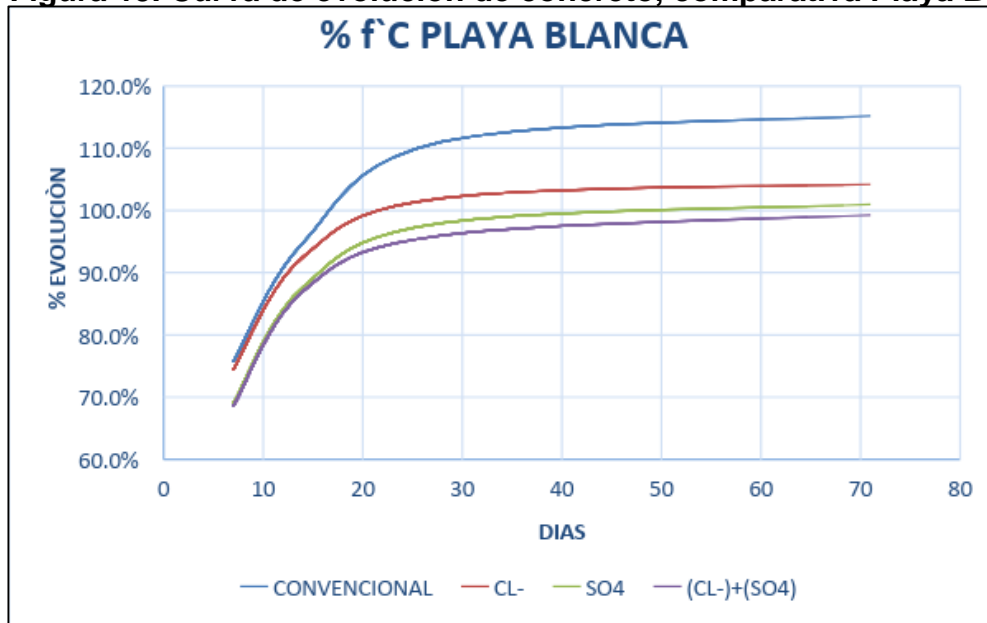
presentando una evolución de resistencia a los 71 días de 99,3%, con una diferencia de 15,9% con respecto a la muestra convencional.

Tabla 23. Porcentajes de evolución Playa Blanca

PLAYA BLANCA				
EDAD	CONVENCIONAL	CL	SO4	CL+SO4
7	75,7%	74,4%	69,0%	68,5%
14	94,8%	92,5%	87,7%	87,0%
28	111,1%	102,0%	98,0%	96,0%
71	115,2%	104,2%	101,0%	99,3%

Fuente. Los Autores

Figura 15. Curva de evolución de concreto, comparativa Playa Blanca



Fuente. Los Autores

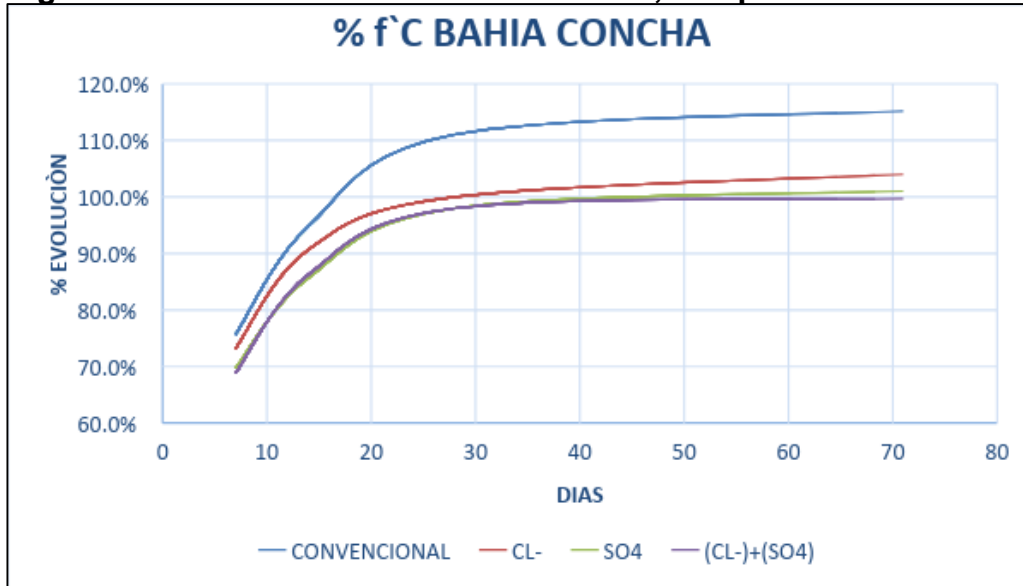
Como se puede observar la evolución de la resistencia de las muestras de concreto, de Playa Blanca, sometido a cloruros, sulfatos y cloruros + sulfatos, evidencia que a los 7 días de curado, tiene más incidencia las muestra que están sometidas a sulfatos y cloruros + sulfatos con una disminución promedio de evolución de 5% aproximadamente con respecto a la muestra convencional, esta diferencia se puede evidenciar hasta los 71 días en la cual se observa que las muestras sometidas a sulfatos+cloruros no cumplen con la resistencia de diseño de la mezcla, mostrando una evolución de resistencia a los 71 días de 99,3%.

Tabla 24. Porcentajes de evolución Bahía Concha

BAHIA CONCHA				
EDAD	CONVENCIONAL	CL	SO4	CL+SO4
7	75,7%	73,2%	69,7%	68,8%
14	94,8%	90,7%	85,7%	86,3%
28	111,1%	100,0%	98,0%	98,0%
71	115,2%	104,0%	101,0%	99,7%

Fuente. Los Autores

Figura 16. Curva de evolución de concreto, comparativa Bahía Concha



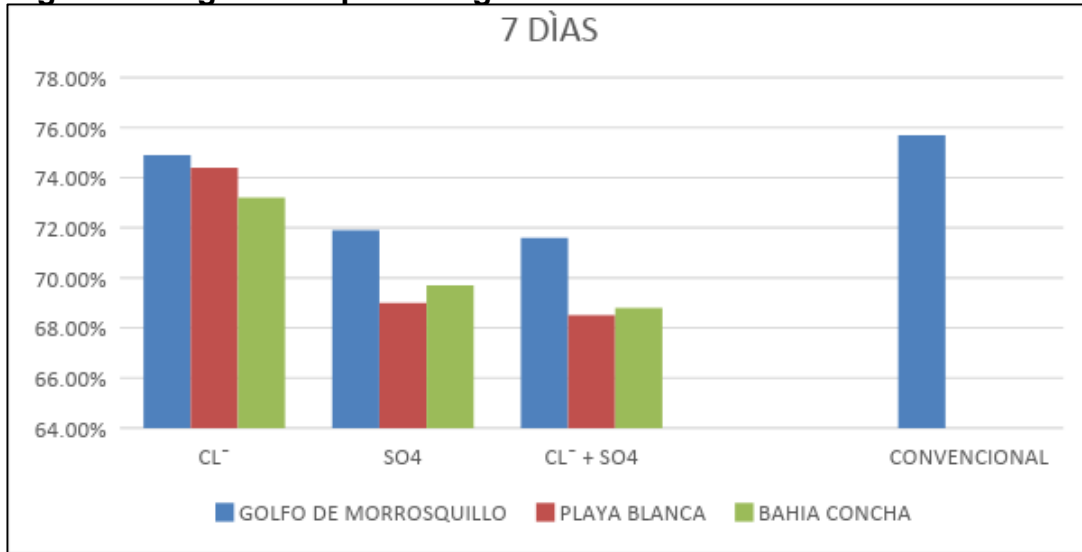
Fuente. Los Autores

Según lo expuesto en la Figura 16 la evolución de la resistencia de las muestras de concreto, de Playa Blanca, sometido a cloruros, sulfatos y cloruros + sulfatos, evidencian que a los 7 días de curado, tienen más incidencia las muestra que están sometidas a sulfatos y cloruros + sulfatos con una disminución promedio de evolución de 5% aproximadamente con respecto a la muestra convencional, esta diferencia se puede evidenciar hasta los 71 días en la cual se evidencia que las muestras sometidas a sulfatos+cloruros no cumplen con la resistencia de diseño de la mezcla, mostrando una evolución de resistencia a los 71 días de 99,7%.

5.3 COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS

5.3.1 Análisis de Resistencias a 7 Días. Se toman los resultados obtenidos del ensayo de resistencia para las tres zonas de estudio a 7 días de curado y se comparan teniendo los siguientes resultados (véase la Figura 17).

Figura 17. Figura comparativa general a 7 días

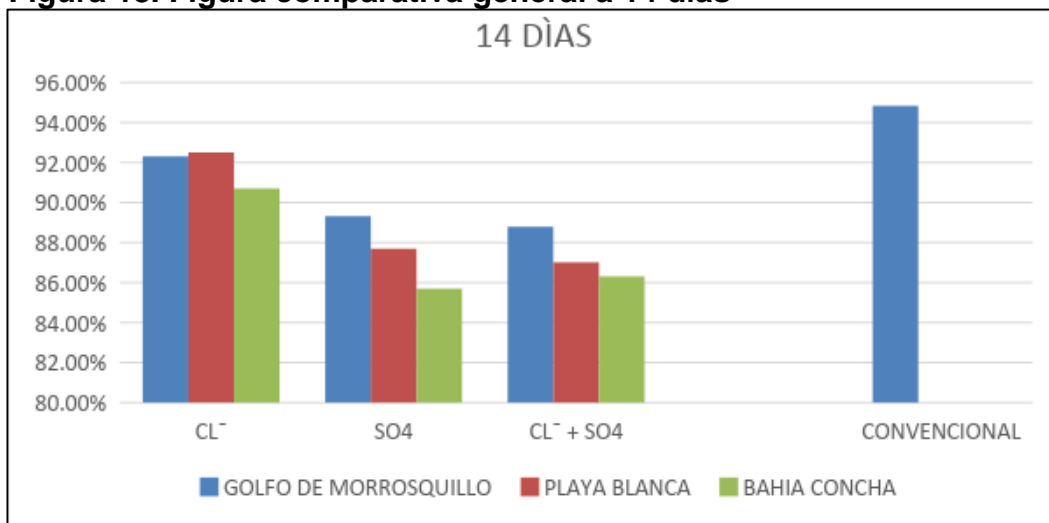


Fuente. Los Autores

En el gráfico se puede observar que las resistencias por debajo a los 70% de evolución pertenecen a las muestras referentes a Playa Blanca las cuales fueron expuestas a sulfatos y combinación de sulfatos y cloruros, Bahía Concha sometidos a cloruros, sulfatos y combinación de sulfatos y cloruros, los cuales representan una disminución de evolución promedio de 6,74%, con respecto a la muestra convencional sin exposición a ataques por sulfatos y cloruros.

5.3.2 Análisis de resistencias a 14 días. Se toman los resultados obtenidos del ensayo de resistencia para las tres zonas de estudio a 14 días de curado y se comparan teniendo los siguientes resultados (véase la Figura 18).

Figura 18. Figura comparativa general a 14 días

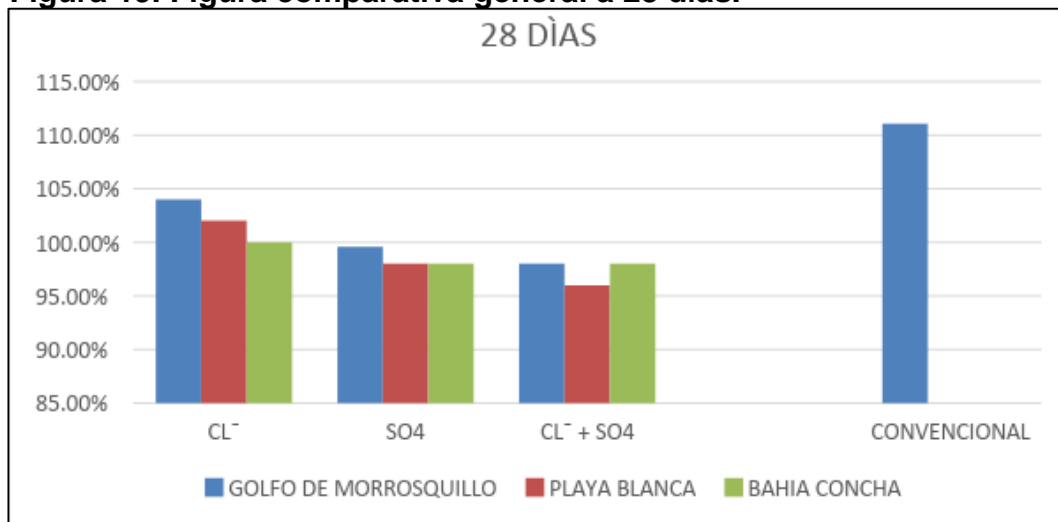


Fuente. Los Autores

En la Figura 18 se puede observar que las resistencias por debajo al 90% de evolución son los de Golfo de Morrosquillo sometidos a sulfatos y combinación de sulfatos y cloruros, con una disminución promedio de 5,75% de la resistencia con respecto a la muestra convencional si exposición a ataques por cloruros y sulfatos, Playa Blanca sometidos a sulfatos y combinación de sulfatos y cloruros, los cuales representan una disminución de resistencia promedio de 7,45%, con respecto a la muestra convencional si exposición a ataques por sulfatos y cloruros, Bahía Concha sometidos a sulfatos y combinación de sulfatos y cloruros, los cuales representan una disminución de resistencia promedio de 8,80%, con respecto a la muestra convencional sin exposición a ataques por sulfatos y cloruros.

5.3.3 Análisis de Resistencias a 28 días. Se toman los resultados obtenidos del ensayo de resistencia para las tres zonas de estudio a 28 días de curado y se comparan teniendo los siguientes resultados (véase la Figura 19).

Figura 19. Figura comparativa general a 28 días.

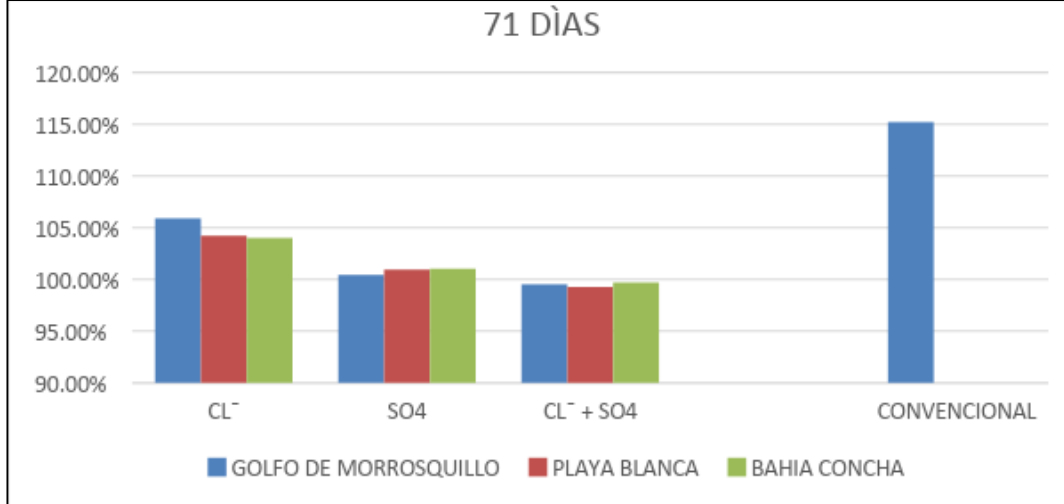


Fuente. Los Autores

En la Figura 20 se puede determinar claramente que las muestras sometidas a sulfatos y la combinación de cloruros y sulfatos de Golfo de Morrosquillo, Playa Blanca y Bahía Concha no cumplen con resistencia a especificación a 28 días.

5.3.4 Análisis de resistencias a 71 días. Se toman los resultados obtenidos del ensayo de resistencia para las tres zonas de estudio a 71 días de curado y se comparan teniendo los siguientes resultados (véase la Figura 20).

Figura 20. Figura comparativa general a 71 días



Fuente. Los Autores

En el gráfico se puede determinar claramente que las muestras sometidas a la combinación de cloruros y sulfatos de Golfo de Morrosquillo, Playa Blanca y Bahía Concha no cumplen con resistencia de diseño de 21 MPa, ya que se encuentra por debajo del 100% requerido, por lo tanto, se puede evidenciar que la combinación de cloruros y sulfatos de las tres zonas de estudio tiene una incidencia en la resistencia del concreto durante su curado con respecto a la muestra convencional.

5.4 ANÁLISIS DEL PH DEL CONCRETO ENDURECIDO

De acuerdo con Vidaud, el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo contra la corrosión. “Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelantes y ambientes marinos”⁵³.

El concreto proporciona normalmente protección contra la corrosión del acero de refuerzo embebido debido a la alta alcalinidad de la pasta de cemento (pH > 12,5), que da como resultado la formación de una película de óxido de hierro que hace pasivo al acero y lo protege de la corrosión. Según lo expuesto en la NTC 5551:

Existe una protección adicional debida a la relativamente alta resistividad eléctrica del concreto expuesto al ambiente atmosférico, cuando la humedad del medio es baja. La película inhibidora del acero se pierde, con lo cual posibilita el inicio del proceso electroquímico de corrosión al carbonatarse la pasta de cemento del

⁵³ VIDAUD, E. Ensayo a la compresión: Medida del desempeño real del concreto [en línea]. México: Construcción y Tecnología en concreto [citado 14 octubre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.imcyc.com/revistacyt/septiembre2013/pdfs/ingenieria.pdf>>

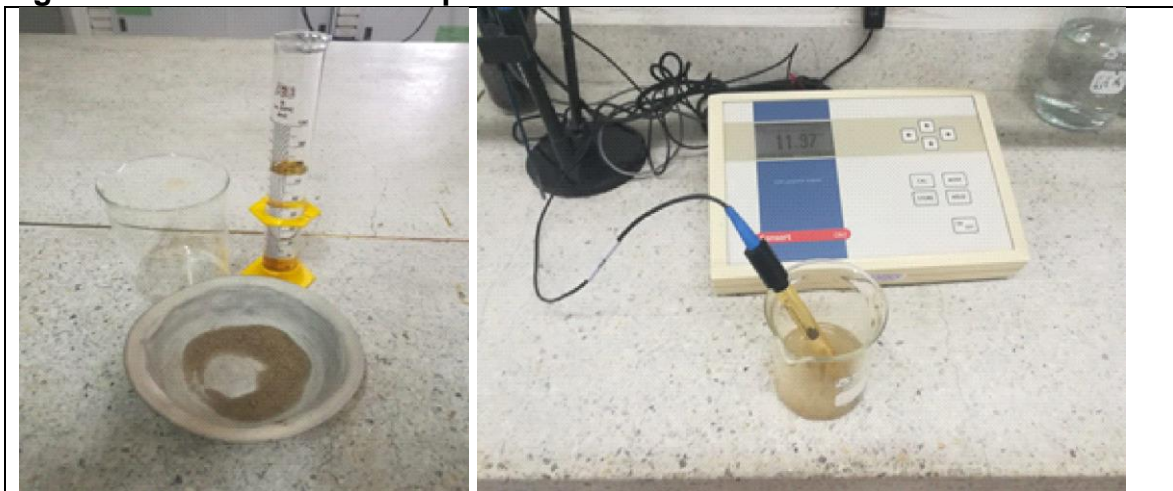
concreto. De esta manera, alcanza valores de pH de 10,5 o menos o cuando la concentración de ión cloruro soluble en agua alcanza un valor superior al 0,25 % de la masa del cemento en la vecindad del refuerzo. Una vez la película capa protectora del acero se pierde, la presencia de humedad y oxígeno dan inicio a la corrosión. La existencia de grietas acelera el proceso, ya que éstas proporcionan más fácil acceso a los contaminantes, al aire y a la humedad⁵⁴.

De acuerdo con lo anterior, se ha querido analizar el comportamiento que tuvo el Ph en el concreto sometido a la exposición de sulfatos y cloruros para determinar si hubo alguna alteración, para esto se utilizó el método ASTM C-4262.

5.4.1 Standard Test Method for pH of Chemically Cleaned or Etched Concrete Surfaces¹ ASTM C-4262. Este método de ensayo consiste en la determinación del pH del concreto endurecido por medio del equipo multiparamétrico con sondas respectiva para pH (Marca Consort C862), el cual se utilizó 10g de concreto pulverizado y agua destilada.

Se vierten 75ml de agua destilada a cada muestra se homogeniza y se procede a tomar las lecturas de Ph (véase la Figura 21)

Figura 21. Determinación de pH.

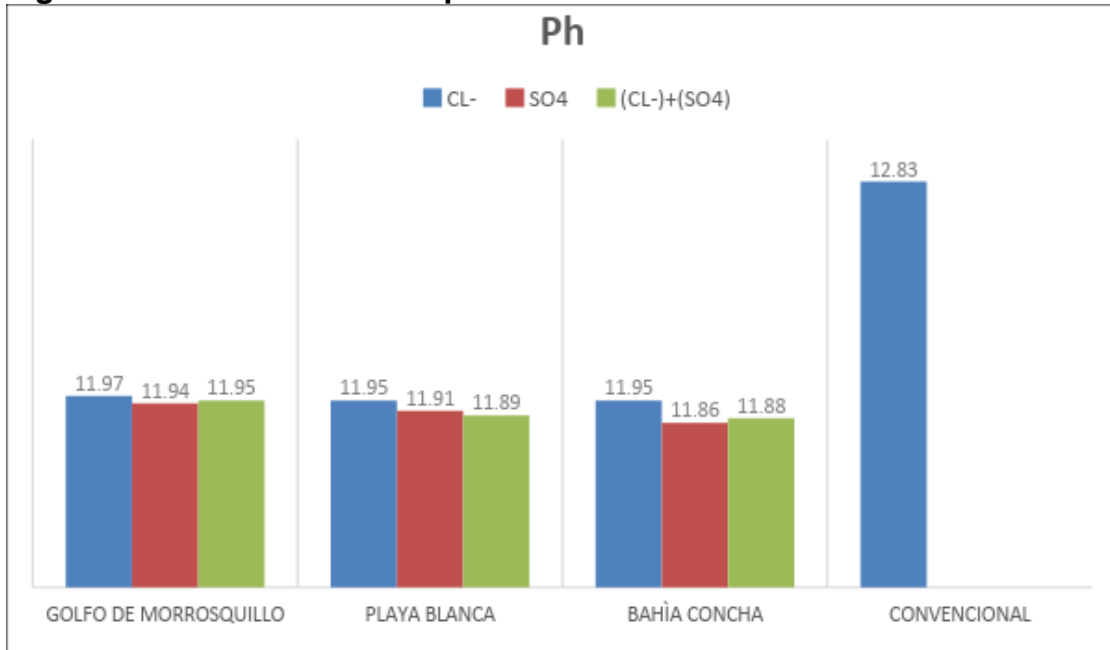


Fuente. Los Autores

De acuerdo con lo anterior, en la presente investigación se analiza el pH del concreto endurecido de cada una de las zonas de estudio seleccionadas, de los cilindros ensayados a compresión a 71 días, para luego hacer la comparación de resultados y determinar en cual se observa un cambio de pH del concreto. A continuación, se puede observar los resultados (véase la Figura 22).

⁵⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Concretos. Durabilidad de estructuras de concreto. NTC-5551 Bogotá: ICONTEC, 2007. p. 18-19

Figura 22. Determinación de pH.



Fuente. Los Autores

Como se puede observar en la Figura 22 se evidencia una disminución de pH en las tres zonas analizadas por ataque de cloruros, sulfatos y cloruros + sulfatos, con respecto a la muestra convencional no expuesta, donde la zona que presenta un pH más desfavorable es Bahía Concha, expuesto a sulfatos y sulfatos+cloruros con una disminución de pH de 0,96 con respecto al convencional.

6. CONCLUSIONES

➤ Con el desarrollo de la investigación se pudo establecer que la combinación de cloruros y sulfatos que mayor influencia tuvo en el comportamiento de la resistencia a la comprensión del concreto fue la correspondiente a la zona de Playa Blanca, ubicada en Cartagena Bolívar con una concentración de cloruros de 20450 g/L, sulfatos de 2623,6 g/L y la de Bahía Concha ubicada en Santa Marta Magdalena, con una concentración de cloruros de 28281,3 g/L, sulfatos de 2646 g/L, evidenciando una influencia directa de estas sustancias en las propiedades del concreto, a mayor tiempo de exposición.

➤ Se pudo determinar que, la región Caribe colombiana presenta variaciones en la cantidad de sustancias que componen sus mares, destacándose Bahía Concha como la zona cuyo mar contiene mayor cantidad de sulfato 2623,6 mg/l; mientras que, para el caso de los cloruros es el agua del mar de Playa Blanca la que tiene mayor presencia de esta sustancia 20450 mg/l. Así mismo se destacó que de las tres zonas de estudio, el mar del Golfo de Morrosquillo es el que contiene menor cantidad de sulfatos y cloruros 2554,5 mg/l y 19375 mg/l respectivamente, mostrándose una diferencia de 69,1mg/l para sulfatos y 1075mg/l para cloruros respecto a Playa Blanca y 91,5 para sulfatos y 906.3 mg/l para cloruros respecto a Bahía Solano, situación que se presente posiblemente por los aportes de vertimientos de aguas residuales de los pobladores de estas áreas, a la temperatura del agua y oleaje del mar ya que estos son determinantes para la salinidad del agua.

➤ Así mismo, se pudo establecer que, en las zonas de la Región Caribe colombiana seleccionadas para el estudio, presentan pequeñas variaciones en sus temperaturas, debido a que su altitud, sin embargo, dichas diferencias no son significativas, evidenciando que durante el transcurso del 2018, las tres zonas tuvieron una temperatura promedio de 27.28°C; esto permitió que para el desarrollo de la investigación se pudiera manejar la misma temperatura para la realización de los ensayo, sin embargo, no se pudo evaluar si la temperatura tiene una incidencia en el comportamiento del concreto expuesto a los sulfatos y cloruros.

En Cuanto a los resultados de los ensayos los principales hallazgos fueron los siguientes:

➤ Se determinó que, el concreto no se ve afectado en su resistencia por exposición por ataques de cloruros, ya que las resistencias de las tres zonas de estudio llegaron a 100% o más a 28 días de exposición.

➤ Por otro, las muestras expuestas a sulfatos y cloruros+sulfatos presentan una disminución de resistencia a 28 días, evidenciando que los sulfatos pueden llegar a afectar la pasta cementante en el transcurso del curado disminuyendo su resistencia en un 11% aproximadamente con respecto a la muestra de concreto no expuesta.

- Se determinó que las muestras falladas a 71 días correspondientes a la exposición por clouros+sulfatos de las tres zonas de estudio, no cumplieron con el 100% de evolución de resistencia, ya que posiblemente la combinación de sulfatos y cloruros tienen incidencia en la resistencia de las probetas de concreto.
- Se puede evidenciar que la exposición de las muestras de concreto de las tres zonas de estudio, presentan una disminución de pH conservándose en pH básico, lo cual no afecta la durabilidad del concreto a corto plazo.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio en el que no sólo se evalúe la exposición del concreto a sulfatos y cloruros, sino una mezcla de concreto estructural con presencia de acero de refuerzo, el cual es usado para construcción de estructuras y el cual, si se puede ver más afectado por la exposición a este tipo de sustancias, y por ende incidir en la vida útil del concreto.

Se recomienda realizar análisis de microscopia para evidenciar las alteraciones químicas a la pasta cementante de las muestras expuestas a cloruros y sulfatos para estudiar y analizar su incidencia en la composición de la mezcla para determinar daños como porosidad entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, A. M. y MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. En: Materiales de Construcción. Enero-marzo, 2013. vol. 63, no, 309.

ALCALDIA DE SANTA MARTA. Descripción Geográfica [en línea]. Santa Marta: La alcaldía [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.santamarta.gov.co/geografia>>

ALCALDIA SANTIAGO DE TOLÙ. Descripción Geográfica [en línea]. Tolù: La alcaldía [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://santiagodetolu-sucre.gov.co/Paginas/default.aspx>>

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-1

BERMÚDEZ ODRIÓZOLA, Miguel Ángel. Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Madrid: Universidad Politécnica De Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, Canales y puertos. Modalidad trabajo de doctorado. 2007. 120 p. .

BIBLIOTECA DIGITAL DEL ILCE. La composición química del agua del mar [en línea]. México: La Biblioteca [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>>

CAMARA DE COMERCIO DE CARTAGENA. Descripción Geográfica [en línea]. Cartagena: CCC [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: https://www.ccccartagena.org.co/sites/default/files/publicaciones/cartagena_y_bolivar_una_ubicacion_estrategica_para_el_comercio_exterior.pdf>

CARRILLO, Julián; CÁRDENAS PULIDO, Jhon y APERADOR CHAPARRO, William. Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería y Desarrollo. Julio - diciembre, 2015. vol. 33, no. 2.

CASAS ARCHILA, Jhon Milton. Evaluación de la corrosión mediante técnicas electroquímicas en el acero de refuerzo del concreto en un ambiente acuoso con cloruro y sulfato. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Modalidad trabajo de grado, 2010. 98 p.

CEMENTOS ARGOS. Concreto [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 24 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.argos.co/Productos/Concreto>>

CHEN, Yanjuan; GAO, Jianming; TANG, Luping y LI, Xuehong. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying–wetting cycles. En: Construction and Building Materials. March, 2016. vol. 106, no. 1.

CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. Medida del desempeño real del concreto [en línea]. México: La Empresa [citado 14 octubre, 2018]. Disponible en internet: <URL: <http://www.imcyc.com/revistacyt/septiembre2013/pdfs/ingenieria.pdf>>

CORREA, Esteban; MONTOYA, Rubiela; PEÑARANDA, Sergio; ECHEVERRÍA, Félix y CASTAÑO, Juan. Deterioro atmosférico del concreto en ambientes urbanos colombianos de diferente agresividad. En: Revista Científica Ingeniería y Desarrollo. Enero – febrero, 2008. no 23.

DESOLMINIHAC, Hernán. Procesos y técnicas de construcción. 5 ed. Santiago de Chile: Ediciones UC, 2011. 398 p.

HAGER, Izabela. Comportamiento del hormigón de cemento a alta temperatura. En: Boletín de la academia de ciencias polaca ciencias técnicas. Mazo –abril, 2013. vol. 61, no. 1

HOSSACK, Ashlee M.y THOMAS, Michael D.A. The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na₂SO₄ solution. En: Cement and Concrete Research. July, 2015. vol. 73.

IM EDITORES. Libros de la colección ecológica del Banco del Occidente [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en internet: <URL: <https://www.imeditores.com/>>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC-673. Bogotá: ICONTEC, 2000.

------. Concretos. Durabilidad de estructuras de concreto. NTC-5551 Bogotá: ICONTEC, 2007.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC-77. Bogotá: ICONTEC, 1994.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC-92. Bogotá: ICONTEC, 1995.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC-176. Bogotá: ICONTEC, 1995.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC-237. Bogotá: ICONTEC, 1995.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC-396. Bogotá: ICONTEC, 1992.

------. Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC-550. Bogotá: ICONTEC, 2000.

KABASHI, Naser; KRASNIQI, Cene; SADIKAJ, Anita; BUBLAKU, Skender; MURIQI, Ali y MORINA, Hysni. Corrosion in concrete under sulphate and chloride attacks [en línea]. Zadar: 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: https://www.researchgate.net/publication/316440930_CORROSION_IN_CONCRETE_UNDER_SULPHATE_AND_CHLORIDE_ATTACKS>

LONDOÑO GÓMEZ, Elizabeth. Lo que debes saber sobre el ataque de sulfato en el concreto [en línea]. Bogotá: 360gradosenconcreto [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/lo-que-debes-saber-sobre-el-ataque-de-sulfato-en-el-concreto/>>

MAES, Mathias; GRUYAERT, Elke y DE BELIE, Nele. Resistance of concrete against combined attack of chlorides and sulphates. En: Cement and Concrete Composites. October, 2014. vol. 53.

MARTÍNEZ, Ramón. ¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón? [en línea]. Bogotá: Interempresas [citado 24 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37070-Estructuras-de-hormigon.html>>

NGUYEN-COTE, Dom. Mecanismos de deterioro múltiple en pilotes de hormigón costero: un estudio de caso forense [en línea]. Ontario: Giatecs [citado 17 noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.giatecscientific.com/education/multiple-deterioration-mechanisms-in-coastal-concrete-piles-a-forensic-case-study/>>

OSORIO, Jesús David. Durabilidad del concreto en zonas costeras y obras portuarias [en línea]. Bogotá: 360 grados en concreto [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/309324267/DURABILIDAD-DEL-CONCRETO-EN-ZONAS-COSTERAS-Y-OBRAS-PORTUARIAS-proyecto-docx>>

ROJAS PINEDA, Sheyla. El universo de la rehabilitación de estructuras [en línea]. Bogotá: Periódico El Tiempo [citado 25 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5384175>>

SAHOO, Sanjukta; DAS, B.B.; RATH, A. K. y KAR, B.B. Acid, Alkali and Chloride Resistance of High Volume Fly Ash Concrete. En: Indian Journal of Science and Technology. August 2015. vol. 8, no. 19.

SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología Del Concreto Y Del Mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 2001. 435 p.

SOLER W, DURANGO H. y SOLER JP. Control microbiano de agua de mar mediante microfiltración. En: Rev Fac Nac Salud Pública. Abril – mayo, 2010. vol. 28, no. 2.

THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C-11. Standard Terminology Relating to Gypsum and Related Building Materials and Systems1. 1998. 433 p.

UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA “JOSE SIMEON CAÑAS”, UCA. Materiales de Construcción [en línea]. El Salvador: CCC [citado 19 septiembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoConcretoFresco/REVENIMIENTO.pdf>>

VASAVAN, Manilal. Sulfate Attack and Sulfate Content in Concrete: A Literature Review [en línea]. New York: LinkedIn Corporation [citado 17 noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.linkedin.com/pulse/sulfate-attack-content-concrete-literature-review-manilal-vasavan/>>

VIDAUD, E. Ensayo a la compresión: Medida del desempeño real del concreto [en línea]. México: Construcción y Tecnología en concreto [citado 14 octubre, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.imcyc.com/revistacyt/septiembre2013/pdfs/ingenieria.pdf>>

WARE, Toby. Diagnosing and repairing carbonation in concrete structures. En: Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation. Junio. 2015. Volume 1 Number 4.