



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

EVALUACIÓN DEL IMPACTO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

P R E S E N T A

**BENÍTEZ LANDERO ÁNGEL ANTONIO
TÉLLEZ FERNÁNDEZ KARLA TERESA**

**ASESOR: M.V.T HUMBERTO RAYMUNDO
GONZÁLEZ MORENO**

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

ÁNGEL ANTONIO BENITEZ LANDERO

La presente obra está dedicada a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio que ambos me han brindado durante todos estos años; gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Gracias por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado, gracias por su apoyo incondicional en cada aspecto de mi vida. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo, son los mejores padres, solo podría pedir que estén conmigo mucho tiempo más.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, por lo que les agradezco, y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia, mis papás, mis abuelos, mis tíos, gracias a todos, porque de alguna manera todos han contribuido a que pueda concluir mis estudios.

A mi hermano Cachorro por estar siempre presente, acompañándome y creyendo mis historias como si fueran las más grandes hazañas nunca jamás contadas, por aceptar jugar solo un rato, porque debo hacer tarea y por el apoyo moral, que ha servido de inspiración desde que llegaste a mi vida.

Gracias a mi compañera de tesis, que ha sabido estar ahí, presente siempre, en las buenas y en las malas, gracias por tu apoyo incondicional, como amiga, como novia, espero seguir escribiendo historias sobre nosotros, cada una mejor que la anterior.

Un agradecimiento especial al Laboratorio de Control de Calidad (LACOCA), por todas las facilidades prestadas para el desarrollo de esta investigación, desde abrirnos sus puertas, compartir sus instalaciones como su basto conocimiento en el área. De manera especial, al M.V.T. Y futuro Doctor Humberto Raymundo González Moreno, asesor de nuestro proyecto de investigación quien nos ha guiado con paciencia, y rectitud como docente.

Y como no podría faltar, un agradecimiento al #TEAMBODY, por el apoyo mutuo que brindamos a nuestros proyectos de investigación, pero especialmente por tantas experiencias, vivencias, recuerdos, risas y momentos que serán significativos y que los cinco guardaremos en nuestro corazón.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

KARLA TERESA TÉLLEZ FERNÁNDEZ

A mis mamás Yoli e Isa, por el amor y paciencia. Por sus palabras de aliento cuando más lo necesitaba, por ser la mejor mamá del mundo desde siempre, por ser mi ejemplo de lucha y metas en la vida, las amo, todo esto es para ustedes y por ustedes. A mi tía Pili y Rosy, no solo por ser tías, sino por ejercer como consejeras de la vida, con paciencia y virtud. Por saber que cuento con ustedes y ustedes conmigo, por ser esas mamás que cuidan, aman y escuchan.

A mis hermanas, Alexa, Anita, Karen Gu, Mely, Tete y Ari. Por las niñas de mi vida, que con su sonrisa y sus travesuras han llenado de diversión toda la vida. Y me han demostrado que la vida me dio muchas más mejores amigas de las que soy capaz de encontrar. A todas las amo como mis hermanas sin excepción. A mis ángeles; mamá Carmen, papá Téllez y mi mejor amiga Bella, que, aunque la vida me los arrebató a la mitad del camino me dejaron suficientes armas para seguir y concluir toda esta travesía, sin dejar de cuidarme. Los extraño con infinitud.

A mi compañero de vida, y de tesis, por darme la fuerza para terminar, por ser el mejor compañero de trabajo, mi mejor amigo, y un excelente novio, esto solo es un logro de muchos más que nos esperan por vivir juntos, te amo eternamente.

A mi Team Body, Ángel, Pedro, Oswaldo y Zaira, que más que un equipo de trabajo, se convirtieron en una pequeña familia con metas a fin, cada uno, con su rol en el grupo, con muchas risas, cariño, y estrés. Lo hemos de lograr.

A mi asesor M.V.T Humberto Raymundo González Moreno, que se convirtió en un mentor en el proceso y he de agradecerle que haya sido la causa de que esto empezara y ahora concluya, mis respetos y amistad por siempre. Así también, al laboratorio LACOCA por su amabilidad, aceptación y gran conocimiento con el que me ha contribuido.

RESUMEN

En la presente investigación se analizan los efectos causados en los concretos a causa del cambio climático, que dan paso a la carbonatación, desencadenando una serie de patologías en el concreto que culminan en la disminución de la vida útil de la estructura, pudiendo ocasionar un colapso de la misma.

Para la obtención de resultados, se realizaron especímenes de concreto, utilizando tres mezclas diferentes con aditivos industriales y agroindustriales, elaborados mediante Norma Mexicana NMX-C-160, los cuales son sometidos a condiciones naturales de intemperismo en la zona de interés, que es un ambiente urbano-marino para analizar su progresivo deterioro.

Se pretende más que proponer una posible alternativa en el diseño convencional de las mezclas, sentar las bases para futuras investigaciones en el ramo de las mezclas sustentables, observar el desarrollo en los ambientes agresivos de las mezclas con sustitución de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, así mismo, denotar que, en la colecta de resultados, el Humo de Sílice es el material que mejor se desempeña en la zona, pero su costo elevado hace que sea un material poco utilizado.

Así mismo, se plantea la solución de un problema de desechos en las industrias azucareras, así como la metalúrgica, pues se hace un uso responsable de los desechos de ambas industrias, se reduce el uso de cemento y se obtiene una mezcla parcialmente sustentable con mejores características que una convencional.

INDICE GENERAL

Índice	
Capítulo I	1
I.I INTRODUCCIÓN	1
I.II PROBLEMÁTICA	3
I.III JUSTIFICACIÓN	6
I.IV OBJETIVO GENERAL	8
I.V OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
I.VI HIPÓTESIS.....	9
I.VII ANTECEDENTES.....	10
I.VIII ALCANCES	13
I.IX LIMITACIONES	14
Capítulo II	15
II.I MARCO TEÓRICO.....	15
II.I.I Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero	15
II.I.II Carbonatación	19
II.I.III Concreto modificado con aditivos	22
II.I.IV Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.....	24
II.I.V Humo de Sílice	25
II.I.VI Cemento Portland Compuesto	26
Capítulo III	27
III.I METODOLOGÍA	27
III.I.I Zona de exposición.....	27
III.I.II Matriz de Experimentación	35
III.I.III Caracterización de materiales.....	36
III.I.IV Dosificación.....	62
III.I.V Elaboración de probetas de estudio	64
III.I.VI Pruebas al concreto fresco	66
III.I.VII Especificación del sitio de exposición.....	71
III.I.VIII Pruebas a Concreto Endurecido	75
Capítulo IV	78
IV.I RESULTADOS	78
IV.I.I Carbonatación.....	78



IV.I.II Pronóstico de velocidad de carbonatación.....	89
IV.I.III Parámetros climáticos	92
IV.I.IV Análisis conjugado de factores climáticos.....	98
IV.I.V Análisis conjugado de factores climáticos con carbonatación.....	103
Capítulo V	108
V.I CONCLUSIONES.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	111

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Conceptualización de Cambio Climático, Calentamiento Global y Efecto Invernadero	16
Figura 2. 2 Relación entre Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio climático	18
Figura 2. 3 Gases de Efecto Invernadero, y efectos la atmósfera	18
Figura 2. 4 Prolongación de carbonatación.....	20
Figura 2. 5 Carbonatación en el concreto observada con un indicador colorimétrico	20
Figura 2. 6 Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.	24
Figura 2. 7 Humo de Sílice, en estado poroso y tamizado	25
Figura 2. 8 Cemento Portland Compuesto (CPC).....	26
Figura 3. 1 Temperatura máxima y mínima promedio (Weather Spark).	28
Figura 3. 2 Probabilidad de precipitación (Weather Spark).....	29
Figura 3. 3 Niveles de humedad (Weather Spark).	30
Figura 3. 4 Velocidad promedio del viento (Weather Spark).	31
Figura 3. 5 Dirección del viento (Weather Spark).	32
Figura 3. 6 Metodología gráfica en el diseño de mezclas según ACI 211.1	37
Figura 3. 7 Horno eléctrico	38
Figura 3. 8 Cucharón.	38
Figura 3. 9 Charolas.....	38
Figura 3. 10 Pala cuadrada.....	38
Figura 3. 11 Enfriamiento y distribución de material	39
Figura 3. 12 Secado de material.....	39
Figura 3. 13 Báscula eléctrica.....	40
Figura 3. 14 Brocha	40
Figura 3. 15 Lona ahulada	40
Figura 3. 16 Distribución de material	41
Figura 3. 17 Revoltura de material.	41
Figura 3. 18 Cuarteo de material.....	41
Figura 3. 19 Tamices	43
Figura 3. 20 Tapa y fondo de tamices	44
Figura 3. 21 Proceso de tamizado.	45
Figura 3. 22 Pesado de material por tamiz.....	45
Figura 3. 23 Matraz.....	47

Figura 3. 24 Picnómetro tipo sifón	47
Figura 3. 25 Probeta graduada	47
Figura 3. 26 Fuente de calor.	48
Figura 3. 27 Secado de material.....	48
Figura 3. 28 Saturación de grava	48
Figura 3. 29 Secado de grava	48
Figura 3. 30 Curva de calibración	49
Figura 3. 31 Saturación de arena.....	50
Figura 3. 32 Saturación de arena 2.....	50
Figura 3. 33 Determinación de densidad con pictómetro.....	50
Figura 3. 34 Determinación de densidad por pictómetro 2	50
Figura 3. 35 Determinación de densidad por pictómetro 3.	50
Figura 3. 36 Varilla punta de bala	52
Figura 3. 37 Recipiente cilíndrico.....	52
Figura 3. 38 Homogenización de material	53
Figura 3. 39 Peso volumétrico seco compactado	53
Figura 3. 40 Canasta de Malla	54
Figura 3. 41 Pisón metálico.	54
Figura 3. 42 Distribución de grava.	55
Figura 3. 43 Saturación de material	55
Figura 3. 44 Secado de material manualmente.	55
Figura 3. 45 Material en canasta.	56
Figura 3. 46 Sumergimiento de material.....	56
Figura 3. 47 Distribución de material Arena.....	56
Figura 3. 48 Saturación de material arena.....	57
Figura 3. 49 Pesado de material Arena	58
Figura 3. 50 Probeta de estudio real.....	64
Figura 3. 51 Modelo de probetas de estudio.	64
Figura 3. 52 Elaboración de moldes para probetas	65
Figura 3. 53 Moldes para probetas.....	65
Figura 3. 54 Mezcla para revenimiento y temperatura.....	66
Figura 3. 55 Mezcla para revenimiento y temperatura.....	66

Figura 3. 56 Prueba de revenimiento	67
Figura 3. 57 Varillado para revenimiento	67
Figura 3. 58 Medición de temperatura	69
Figura 3. 59 Medición de revenimiento	69
Figura 3. 60 Pesado de material para colado.....	70
Figura 3. 61 Colado de mezcla	71
Figura 3. 62 Revoltura de mezcla	70
Figura 3. 63 Descimbrado de cilindros	71
Figura 3. 64 Tanque de curado con los especímenes	71
Figura 3. 65 Facultad de Ingeniería Universidad Veracruzana, Campus Boca Del Rio	72
Figura 3. 66 Ubicación de la zona de exposición y distancia a la costa.....	72
Figura 3. 67 Especificación de la posición de la zona de exposición	73
Figura 3. 68 Parámetros ambientales de la estación de monitoreo.	73
Figura 3. 69 Ficha de identificación de la estación de monitoreo.	73
Figura 3. 70 Cilindros colocados en exposición ambiental.....	74
Figura 3. 71 Vernier.....	76
Figura 3. 72 Fenolftaleína al 1%	76
Figura 3. 73 Concreto cortado para carbonatación.	76
Figura 3. 74 Reacción de concreto a la solución.....	76
Figura 3. 75 Medición de carbonatación.....	77
Figura 4. 1 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre agosto 2018 – septiembre 2018.....	78
Figura 4. 2 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre octubre 2018 – noviembre 2018.....	79
Figura 4. 3 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre octubre 2018 – noviembre 2018.....	80
Figura 4. 4 Reporte de pruebas de carbonatación periodo agosto 2018 – enero 2019	81
Figura 4. 5 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre Febrero-Marzo 2019.....	83
Figura 4. 6 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre Abril-Mayo 2019.....	84
Figura 4. 7 Evolución de las probetas de CBCA en el periodo agosto 2018 – mayo 2019.....	85
Figura 4. 8 Evolución de las probetas de Humo de Sílice en el periodo agosto 2018 – mayo 2019.....	86
Figura 4. 9 Evolución de las probetas de Control en el periodo agosto 2018 – mayo 2019	87
Figura 4. 10 Evolución de las probetas de CBCA, Humo de Sílice y Control en el periodo agosto 2018 – mayo 2019	88
Figura 4. 11 Velocidad de Carbonatación.....	90
Figura 4. 12 Temperatura máxima, mínima y media de los últimos 5 años.....	92

Figura 4. 13 Velocidad del viento promedio Veracruz	94
Figura 4. 14 Humedad relativa.....	95
Figura 4. 15 Precipitación media anual.....	96
Figura 4. 16 Niveles de SO ₂ y CO ₂	97
Figura 4. 17 Temperatura combinada con CO ₂ y SO ₂	98
Figura 4. 18 Humedad combinada con SO ₂ y CO ₂	100
Figura 4. 19 Velocidad de viento combinada con SO ₂ y CO ₂	101
Figura 4. 20 Precipitación combinada con SO ₂ y CO ₂	102
Figura 4. 21 Profundidad de carbonatación combinada con Temperatura	103
Figura 4. 22 Profundidad de carbonatación combinada con Humedad.....	104
Figura 4. 23 Profundidad de carbonatación combinada con velocidad de viento	105
Figura 4. 24 Profundidad de carbonatación combinada con Precipitación	106
Figura 4. 25 Profundidad de carbonatación combinada con SO ₂ y CO ₂	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Relación de la humedad con la carbonatación.	21
Tabla 3. 1 Resumen de Temperatura anual de Xalapa y Boca del río, Ver.....	33
Tabla 3. 2 Resumen de Humedad anual de Xalapa y Boca del río, Ver	33
Tabla 3. 3 Resumen de Vel. del Viento anual de Xalapa y Boca del río, Ver	34
Tabla 3. 4 Resumen de Precipitación anual de Xalapa y Boca del río, Ver	34
Tabla 3. 5 Matriz de experimentación.	35
Tabla 3. 6 Características de tamices.	43
Tabla 3. 7 Cálculo de tamaño máximo nominal	46
Tabla 3. 8 Cálculo de módulo de finura.....	46
Tabla 3. 9 Resumen de datos obtenidos de las pruebas	61
Tabla 3. 10 Dosificación para 1 espécimen de control	62
Tabla 3. 11 Dosificación para 1 espécimen de CBCA.....	63
Tabla 3. 12 Dosificación para 1 espécimen de Humo de sílice.....	63
Tabla 4. 1 Pronóstico de carbonatación	89

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3. 1 Módulo de finura y Tamaño máximo nominal.....	46
Ecuación 3. 2 Densidad relativa de grava.	51
Ecuación 3. 3 Densidad relativa de arena	51
Ecuación 3. 4 Peso volumétrico.....	53
Ecuación 3. 5 Contenido de Humedad.....	60
Ecuación 4. 1 Profundidad de carbonatación (mm)	89
Ecuación 4. 2 Velocidad de Carbonatación	89

Capítulo I

I.1 INTRODUCCIÓN

La geografía del estado de Veracruz permite diferenciar un tipo de zona climática destacada: zona costera. Esta zona tiene factores de intemperismo como; vientos, inestabilidad del suelo superficial, el ataque de cloruros, sulfatos, la humedad, las fuertes lluvias pueden reducir la vida útil de nuestros edificios, generando costos elevados por mantenimiento, etc.

Mientras tanto el cambio climático es un hecho importante que está afectando tanto a la vida humana como al ciclo de vida de las estructuras de concreto según Hernández y Mendoza, en 2006. Ante esto, Domínguez en el 2015 afirma que las estructuras de construcción se ven afectadas en diferente medida y con un nivel de deterioro diferente.

Teniendo como punto de partida las afirmaciones anteriores, es indispensable mencionar que, en la ciudad de Boca Del Rio, Veracruz, las estructuras de concreto son las más utilizadas para la construcción de casas, edificios pequeños y vías terrestres. En este proyecto se presentarán 3 tipos de concretos; concreto de control, elaborado con cemento Portland Compuesto (CPC), concreto con una sustitución del 20% del cemento inicial con CBCA (Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar) y concreto con Humo de sílice, de la misma manera, sustituyendo al 20% el cemento convencional.

Se evaluarán los efectos por cambio climático teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona y las características de los concretos, midiendo principalmente la profundidad de la carbonatación, pues es la primera señal del deterioro del concreto, la cual, al llegar al acero de refuerzo, puede desencadenar otras afectaciones, como son la corrosión del acero embebido, desprendimiento del recubrimiento, agrietamiento, entre otros. Las muestras serán expuestas en la ciudad de Boca Del Rio como referente a la zona costera, del estado de Veracruz.

De acuerdo con reportes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2012) el cambio climático afecta a las regiones montañosas del mundo y puede poner en peligro los importantes servicios que brindan estas regiones. Esto podría incluir impactos en el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica, la aptitud agrícola y los riesgos de amenazas naturales. El cambio climático puede intensificar fenómenos meteorológicos extremos tales como olas de calor, sequías y fuertes precipitaciones que podrían ocasionar inundaciones y deslizamientos de tierra en las montañas, e inundaciones de gran extensión en las tierras bajas circundantes (Soto, 2013).

I.II PROBLEMÁTICA

La durabilidad de las estructuras de concreto armado se ve comprometida con la incesante actividad del intemperismo a que están sometidas dichas estructuras, por lo que su vida útil inevitablemente se ve reducida, esto implica un mayor gasto en mantenimiento para retardar los efectos climatológicos, que tarde o temprano se harán presentes y el deterioro nos llevará al caso extremo de desechar completamente una estructura por motivos de seguridad, establecido según Adam Neville en .2001

Pues Carcaño y Moreno, después de analizar en 2005 el costo de una construcción durante todo su ciclo de vida, se ha calculado que más del 40% de los recursos totales de la industria de la construcción en países desarrollados se aplican a la reparación y mantenimiento de estructuras existentes, aunado a esto, los efectos del cambio climático aumentan la agresividad de los ambientes naturales y disminuyen así la vida útil de las estructuras.

Los principales efectos ambientales que influyen de manera negativa en la durabilidad del concreto pueden clasificarse en agentes físicos y agentes químicos. Entre los agentes físicos se encuentran el desgaste de la superficie ocasionada por erosión, el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de sales contenidas en los poros del concreto y la exposición a temperaturas extremas. Por agentes químicos se podría mencionar los daños provocados por hidrólisis, que es ocasionado por el contacto de aguas con escasos iones de calcio, la corrosión de metales embebidos en el concreto por acción de los sulfatos, la carbonatación del concreto, debido a la pérdida de pH del mismo, el ataque al concreto por sulfatos contenidos en el agua o el suelo, o por ácidos generados por la actividad humana en especial actividades industriales y agrícolas como bien afirman Carcaño y Moreno en el 2005.

Aunque para fines de la presente investigación, resaltaremos los efectos de la carbonatación, pues es el principal enemigo del concreto endurecido.

La carbonatación es un proceso natural en el concreto, que sucede inmediatamente después del curado, a edades tempranas es imperceptible, pero con el paso del tiempo, es evidente que se vuelve un problema, y los efectos del cambio climático empeoran la situación, pues según la revista científica del IMCYC, del año 2012, el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, y se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero embebido. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el intervalo de ppm de cloruros para que inicie la corrosión es significativamente menor (100 ppm o menos).

Lo anterior quiere decir que si el pH del concreto baja, por muy poco que sea, ya se está afectando a la estructura, aquí está el propósito de la investigación, evidenciar si los desechos industriales y agroindustriales pueden servir como un sustituto al cemento Portland, pues es importante mencionar que las temperaturas excepcionalmente elevadas (1400-1500 °C) que se requieren en la fabricación del cemento Portland son responsables de que se le atribuya el 40% del consumo de energía, penalizando el proceso con unos costos muy elevados, según datos de Adamec en 2010

Las temperaturas elevadas provocan la deshidratación de los concretos, ya que la tasa de humedad del aire se torna relativamente baja. Otros efectos por altas temperaturas que se desglosan de la deshidratación son la mayor necesidad de agua, el revenimiento reducido, los tiempos de fraguado más cortos, la porosidad más elevada y la mayor tendencia a la formación de fisuras por contracción (Guevara et al., 2012).

Los agentes químicos contenidos en el ambiente, provocan la despasivación del acero, y llegan a corroerlo, esto se produce en las estructuras ubicadas en ambientes costeros, donde la brisa marina se vuelve peligrosa cuando arrastra iones de cloruro y partículas de arena que erosionan la superficie de las estructuras, impregnándose en ellas, a partir de esto, la acumulación de cloruro y sulfatos se transportan a través de los poros del concreto, hasta llegar al acero, lo despasivan y comienzan a corroerlo, después se forma una capa de óxido (Moreno, et al, 2001).

Cuando el acero se corroe embebido en el concreto, se consume la capa superficial del acero y se forma una creciente capa de óxido, La transformación del hierro metálico corroído es acompañada de un incremento en el volumen que, dependiendo de su estado de oxidación, puede ser tan grande como 600% del metal original (Carcaño y Moreno, 2005), lo que produce presiones contra el concreto, propiciando la formación de grietas y desprendimiento de capas de concreto llamadas delaminaciones, comprometiendo la resistencia estructural del elemento (Rómel et al, 2005).

La industria azucarera genera anualmente enormes cantidades de residuos, aproximadamente para la modalidad de cosecha en verde, los residuos pueden ser entre 50 y 100 t/ha, según Martínez, de las 6 millones 182,000 toneladas de caña de azúcar que se produjeron en el 2018, las cuales se cosechan en 802,000 hectáreas, ubicadas en 227 municipios de 15 estados del país. Como desecho producto de esta industria se encuentra la denominada Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) que resulta de la combustión de este subproducto y cuya dispersión en el ambiente contamina el aire y afecta la salud humana, debido al tamaño de sus partículas, por lo cual, si este desecho puede reutilizarse, por ejemplo, en un material de construcción, se reintegra al mundo como un material sustentable y no como un contaminante (Martínez, 2018).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la ONU (IPCC, 2012) declaró que el rápido calentamiento global ha propiciado los impactos sobre los océanos, amenazando tanto la vida marina y las personas que habitan en las regiones costeras y las comunidades pesqueras. Por otra parte, Yáñez propone en 2013 que más de 500 millones de personas en los países en desarrollo dependen directamente de las zonas costeras y marinas, por sus recursos pesqueros para el sustento y el espacio de esparcimiento social.

I.III JUSTIFICACIÓN

Las estructuras de concreto son el principal elemento de construcción en la zona de Boca Del Rio del estado de Veracruz, razón más que suficiente para analizar las causas o factores que reducen la vida útil de los elementos, basados en los efectos del cambio climático, para así poder dar una solución al problema de durabilidad de los concretos, retrasar el deterioro y de alguna manera alargar el periodo de vida útil de las estructuras.

Además, el uso de aditivos naturales propicia una reducción considerable en el consumo de cemento, ya que se emplea como una sustitución parcial del uso total de este. La importancia en esta situación recae en la contaminación del ambiente, principalmente de la producción del cemento, pues en 2001 Worrell, ya habían establecido que este genera un enorme impacto por contaminantes, pues la industria cementera contribuye con aproximadamente el 5% de las emisiones antrópicas a nivel global, haciendo de este rubro un sector importante de emisiones de CO₂ (Acosta,2017). Recordando lo mencionado anteriormente, las elevadas temperaturas necesarias para la fabricación del cemento Portland oscilan entre los 1400-1500 °C y son responsables de que se le atribuya el 40% del consumo de energía, costos muy elevados, según datos de Adamec en 2010

Por lo que el utilizar un cemento con aditivos puzolánicos reciclados, según Calleja en 1972 resulta sumamente favorable, pues reducen el impacto por CO₂ provocados por la fabricación del cemento, siendo así una acción para mitigar el problema de calentamiento global actual. Es importante mencionar como Worrell en 2001 que al darles un uso apropiado a estos residuos se aprovechan elementos considerados desechos de otras actividades industriales y ya no contaminan directamente al medio ambiente.

Lo mismo aplica para ambos aditivos, pues los dos son considerados desechos de sus respectivas industrias, por su parte la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, es un subproducto de la industria azucarera, que resulta después de la combustión del bagazo de la caña de azúcar que, a su vez, resulta de la molienda de la caña de azúcar para la obtención de azúcar para uso alimenticio.

Y la Microsilice o humo de sílice es un desecho de la industria metalúrgica que resulta de la escoria de alto horno, pues la fundición de los metales se genera a altas temperaturas que oscilan entre los 1100°C y 1200°C.

La única diferencia entre ambos aditivos es su origen y el tamaño de sus partículas, pues, aunque ambos tamaños son menores que el de las partículas de cemento, el tamaño de una partícula de humo de sílice es relativamente menor. Aunado que ambas poseen propiedades puzolánicas.

Los cambios en el clima son factores que no puede controlar, y el hombre es responsable de su descontrol actual, por lo que tenemos la responsabilidad de mitigar las afectaciones al medio ambiente. El calentamiento global es una de las principales problemáticas ambientales, pues en definición la sobreproducción de gases de efecto invernadero no permite a la radiación salir de la atmósfera, y se sobrecalienta la superficie terrestre. Los cambios drásticos de temperatura a los que están expuestos no propician un ambiente favorable para el desarrollo de una vida útil de las estructuras de concreto (Berga, 2012).

I.IV OBJETIVO GENERAL

Medir la profundidad de carbonatación en estructuras de concretos modificados con aditivos industriales y agroindustriales, para evaluar los efectos del cambio climático, comparados con un concreto convencional en la zona costera del estado de Veracruz y evaluar el desempeño de las mezclas de experimentación como alternativa sustentable ante el cambio climático.

I.V OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recolectar datos climatológicos de manera radial de la zona costera del estado de Veracruz de los últimos 5 años.
2. Analizar parámetros climatológicos de la zona como son: humedad relativa, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento.
3. Diseñar los tipos de mezclas con las que se va a experimentar.
4. Elaborar las probetas de estudio.
5. Colocar en exposición ambiental las muestras de concreto.
6. Medir la profundidad de carbonatación en periodos de tiempo en los especímenes de estudio.
7. Relacionar los datos climáticos con los resultados de las pruebas de carbonatación.
8. Evaluar la factibilidad del uso de concretos sustentables en la zona de interés, como medida ante el cambio climático.
9. Establecer un antecedente para futuras investigaciones sobre el tema.

I.VI HIPÓTESIS

Los concretos sustentables de las mezclas experimentales tienen una mayor resistencia a la carbonatación, y es ampliamente factible el uso de desechos industriales y agroindustriales como sustitutos al Cemento Portland Compuesto como una opción sustentable ante el cambio climático en la costera del estado de Veracruz.

I.VII ANTECEDENTES

Durante años las construcciones convencionales han sido desarrolladas con materiales resistentes que protegieran de vientos, lluvias, intensos soles o animales. Desde que la humanidad era nómada hasta su estabilización en el sedentarismo, el cuidado de las viviendas y la resistencia de las mismas han sido importantes para el humano. Con la evolución se pasó de cuevas a pequeñas tiendas echas de cuero, prosiguiendo con la conglomeración de rocas, luego a casas echas de paja y tierra, como lo menciona Marks (2007). Todas estas técnicas se fueron perfeccionando con el tiempo y mejorando la estructura como el diseño, con un solo fin; preservar la vida humana.

Sin embargo, el mismo tiempo fue quien (junto con el sedentarismo) obligó a las masas a preocuparse por la resistencia de las estructuras a causa de las inclemencias del tiempo, temporadas difíciles y la dificultad de llevar una vida estable, que requería de servicios básicos establecidos.

Pasando entonces al uso de lo que hoy conocemos como morteros, como el adobe y el barro, mostrando una resistencia mayor y un nivel térmico que favorecía en los cambios de clima. Así abriendo paso al uso de pastas como material de construcción.

Con la civilización en Egipto entró al mercado la utilización de pastas con valor cementante, con un resultado de gran resistencia y durabilidad. Hasta que, en el año de 1824, según E. Vidaud en 2013, después de años de experimentación por parte del inglés James Parker, Joseph Aspdin, y el final perfeccionamiento de Isaac Johnson en 1845 se presenta el cemento Portland, el aglomerante más importante de le época moderna, con un costo económico.

El cemento empezó a tomar fama gracias a sus propiedades puzolánicas y adherentes, capaz de unir bloques de ladrillos o block y edificar muros para la construcción de casas. Así como su gran papel en la fabricación del concreto; con una mezcla de un agregado grueso (grava), un agregado fino (arena), agua y un aglomerante (cemento), el concreto

ganó terreno en las edificaciones por ser el único que llegaba a resistencias más altas que las ya registradas, y su durabilidad las humedades y ataques mecánicos.

El concreto fue mostrando diferentes etapas, y siendo modificados con aditivos o con nuevas presentaciones que mejoraban sus propiedades, a causa de la demanda que las poblaciones y sus estructuras requerían por la rápida urbanización.

Sin embargo, no solo se hicieron modificaciones al incorporar un aditivo a la fórmula original del concreto, si no que el reemplazo parcial de su activador (el cemento) se presentó en diversos intentos por encontrar un sustituto de la misma mezcla tan popular, no solo por encontrar otra alternativa, también por tener una opción más amigable con el ambiente, pues el cemento es producía grandes cantidades de CO₂ a lo largo de su fabricación.

Es entonces cuando entra un campo de investigación donde elementos prototipo para actuar como aglomerante en el concreto, son puestos a prueba tratando de igualar resistencias y durabilidad o incluso mejorarlas. Estos elementos tendrían que tener una actividad puzolánica y es así como se llega a una utilización del humo de sílice y la ceniza de bagazo de caña de azúcar como buenos candidatos para la experimentación.

Como antecedentes de la utilización de estos sustitutos se encuentran diversas investigaciones internacionales como internacionales, donde a principio de los 90 se empieza a evaluar en otros países con publicaciones en revistas como Cement and Concrete Composites y Magazine of Concrete Research, y es hasta finales de los 90 cuando se presentan investigaciones mexicanas con lugar en revistas universitarias y de diversidad latina como ALCONPAT.

Algunas investigaciones mostraban diversos autores tanto nacionales e internacionales en variados artículos han puesto a prueba sustituciones del 0.1% hasta el 100% del cemento convencional, tal es el caso del autor Sajad que en el 2018, probó resistencia a compresión con un concreto de tan solo 0.1% al 0.7% de sustitución de cemento con

Nano sílice, donde sus resultados fueron favorables con ante la sustitución de 0.7% contra el concreto convencional, notando una diferencia de 76.42 kg/cm².

Mientras que autores como Babakahmadi en 2014 optaron por hacer 3 mezclas donde en dos de ellas se sustituía un 100% de cemento, dando como resultado favorecedor a la mezcla de Humo de Sílice, con una resistencia de 529.88 kg/cm².

Shaikh en 2015 y Ali Sadrmomtazi en 2018 se arriesgaron un poco al proponer mezclas con la sustitución de dos aditivos al mismo tiempo en un solo concreto, en el primer caso se presentaron combinaciones como 10%UFFA+25%RCA y 10%UFFA + 50%RCA, mientras que para Ali sus propuestas se caracterizaban por contener a la ceniza volante al 5% y la Humo de Sílice a 10, 20 y 30 %. Sin embargo, Monower en 2012 tuvo un campo interesante de experimentación sustituyendo el 100% de cemento, usando dos aditivos a la vez. Sus resultados concluyeron con una balanza a favor de la mezcla 30% HC 70% CV con una resistencia superior de 560.45 kg/cm².

I.VIII ALCANCES

A pesar de las grandes mejoras a la fórmula original del concreto con el uso de aditivos, como un ingrediente extra; la sustitución parcial del cemento resulta ser una manera más ecológica y económica para el ambiente. Teniendo en cuenta que la producción del cemento reparte gran parte del total de los gases del efecto invernadero que afectan a la atmósfera, la utilización de aditivos artificiales y principalmente naturales, hacen del proyecto un concreto sustentable.

El objetivo es conseguir una resistencia y un efecto de carbonatación más alto que otros concretos, como lo es el concreto convencional, así como analizar los efectos del cambio climáticos en todos los prototipos.

Para la recolección de datos climáticos será necesaria la investigación y consulta de servicios meteorológicos, y de gobierno, y así establecer un parámetro para la región a analizar. Mientras que, para la elaboración de las probetas, será de gran utilidad la caracterización de agregados a utilizar, así como la definición de los mismos, concluyendo con una dosificación específica y acorde a la sustitución propuesta, junto con el colado, curado y distribución de las mismas.

Mientras que, para los resultados, se requiere del adecuado y cuidadoso ejercicio de carbonatación, el cual será nuestro principal indicador para el avance o la respuesta negativa de las propuestas, ante los ataques del clima. Se espera una mejora en los resultados de carbonatación, en comparativa con el concreto convencional también expuesto, de los cilindros modificados, donde se espera un gran impacto por el alto contenido de sales y cloruros.

La presente investigación no solo aporta a la expansión del campo de la investigación en la Ingeniería civil, sino que también deja bases confiables y concretas para el desarrollo de próximos proyectos relacionados con él, y consecuentemente a estos una futura común utilización de los sustitutos cementantes (humo de sílice y CBCA).

I.IX LIMITACIONES

En cuanto a las limitaciones dentro de la investigación, no se registró ninguna que marcara un problema determinante dentro del proyecto, en su lugar fueron problemas de logística y descuido de los tiempos establecidos en la matriz de experimentación.

Las limitaciones importantes que, si llegaron a dificultar el avance de la investigación, fue el hecho que no se cuenta con un laboratorio científico enfocado a la carrera de ingeniería civil en la institución y se requirió de un traslado a laboratorios externos.

Para la obtención de los aditivos empleados, no se tenía una fuente de producción cercana, por lo tanto, se tuvo que recurrir al ingenio azucarero más cercano que es de donde se obtiene la CBCA está a 120 KM aproximadamente.

La parte teórica no representó una limitación tan marcada, pues se tiene un gran antecedente de investigaciones acerca de los materiales que se emplearían en la investigación y de los procesos a practicar.

En cuanto a las limitaciones temporales se tiene principalmente las instalaciones de nuestra institución, pues al no contar con la infraestructura necesaria para llevar a cabo las pruebas necesarias, el grupo de investigación y el asesor se tuvo que dar a la tarea de buscar un laboratorio de control de calidad para realizar las pruebas de ensaye y carbonatación.

Otro inconveniente fue el transporte, debido a que la matriz de experimentación marcaba la zona de interés, en un viaje de alrededor de 5 horas, en transporte público, y resulta un tanto complicado transportar los especímenes para las pruebas de control.

Como ya se mencionó anteriormente la parte económica es un factor determinante para el avance de la investigación, debido a que los miembros del grupo de investigación dependemos aun del apoyo económico que nuestros padres pueden brindar.

Capítulo II

II.I MARCO TEÓRICO

Dado que el principio fundamental de esta investigación está centrado en el impacto climático, medido a través de pruebas de profundidad de carbonatación en 3 tipos de mezclas, será necesario plantear algunas referencias para el entendimiento del mismo.

Antes que todo hay que definir y hacer una diferencia comparativa entre tres conceptos que pueden en un momento confundirse; cambio climático, impacto climático y efecto invernadero.

II.I.I Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero

Empezando por definir al igual que La Comisión Forestal Nacional en 2010, el cambio climático como el cambio en la distribución estadística de los patrones meteorológicos durante un periodo prolongado de tiempo, incluyendo los cambios en las condiciones promedio de tiempo o en la variación temporal de este.

El cambio climático no tiende a producirse por una fuente 100% natural, está causado por factores como procesos bióticos, variaciones en la radiación solar recibida por la Tierra, tectónica de placas y erupciones volcánicas. También se han identificado ciertas actividades humanas como causa principal del cambio climático reciente, a menudo llamado calentamiento global definido así, en el 2008, por el Intergovernmental Panel on Climate Change.

Por otra parte, el calentamiento global es el aumento observado en más de un siglo de la temperatura del sistema climático de la Tierra y sus efectos (Gillis, 2015). Entonces tenemos al aumento temperatura como el concepto principal del calentamiento global y a la meteorología en el cambio climático.

Ahora bien, el efecto invernadero siendo el proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos y es irradiada en todas las direcciones según Pachauri y Reisinger, 2008, y

que los GEI incluyen vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno y ozono.

Según Mann en 2014, estos gases absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo y sin estos la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de la media actual de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El siguiente diagrama presenta una comparación entre los tres conceptos a entender:



Figura 2. 1 Conceptualización de Cambio Climático, Calentamiento Global y Efecto Invernadero

Así como cada concepto trabaja de manera diferente con sus respectivas características cada uno de estos procesos se entrelazan para crear la problemática presentada, como se estratifica en la figura 2.1.

Empezando por el efecto invernadero, este tiene la característica de conservar la temperatura de la Tierra en un estado no congelante, sin embargo, con el paso humano y la evolución de sus máquinas y tecnologías los gases del efecto invernadero han aumentado considerablemente hasta sobre pasar la calidez que otorga.

Explicado a más detalle este efecto, como lo muestra la Figura 2.1, existen gases como el metano (CH_4), que forma parte de los GEI, que tiene un potencial de calentamiento global de 23. Esto significa que en una medida de tiempo de 100 años cada kg de CH_4 calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de dióxido de carbono (CO_2), sin embargo, hay 220 veces más de CO_2 en la atmósfera de la Tierra que metano (IPCC,

2012), por lo que el metano se presenta como un problema sombra ante la cantidad de CO₂.

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro y vital para la vida en la Tierra, pero a pesar de ello, la quema de combustibles de carbono desde la Revolución Industrial ha aumentado rápidamente su concentración en la atmósfera, provocando el aumento de los GEI.

Como menciona Chang en 2007, otro gas importante de resultado de la actividad humana es el óxido de nitrógeno (NiO), donde el proceso de formación habitual de estos compuestos inorgánicos es la combustión a altas temperaturas, son liberados al aire desde el escape de vehículos motorizados (sobre todo diésel y de mezcla pobre), de la combustión del carbón, petróleo o gas natural, y durante procesos tales como la soldadura por arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. depende de la humedad, tenemos por demás causas y razones para que esta sea un problema que, aunque no se ve, pone en riesgo la durabilidad de las estructuras de concreto.

Así bien, el portal de Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro en 2017 menciona otro gas importante producto de las acciones antrópicas: el SO₂, El Dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro e irritante contaminante del aire. El dióxido de azufre no es inflamable, ni explosivo, es muy soluble en agua y es más denso que el aire ambiental. Las mayores fuentes de dióxido de azufre incluyen plantas carboeléctricas, procesos industriales que usan carbón, vehículos (locomotoras, barcos de gran tamaño, maquinaria pesada) que usan combustibles poco refinados, refinerías de petróleo, fábricas de cemento, la manufactura de pulpa de papel, la producción de ácido sulfúrico, procesos de extracción de metales a partir de minerales (aluminio, cobre zinc, hierro, plomo) y en general el uso de combustibles que contienen, dependiendo del tipo, mayor o menor contenido de azufre. Sin embargo, el dióxido de azufre se produce también a partir de fuentes naturales como volcanes y actividad geotérmica.

Por último, el Ozono (O_3), dentro de este término se encuentra el esmog fotoquímico que es la contaminación del aire, principalmente en áreas urbanas, por ozono originado por reacciones fotoquímicas, y otros compuestos (Downie, 2008). Entre estos otros están los y convirtiendo al ozono en un gas oxidante y tóxico que puede provocar en el ser humano problemas respiratorios clorofluorocarbonos (CFC), que durante las últimas 3 décadas han disminuido las concentraciones de ozono, dando como resultado un forzamiento radiactivo negativo (Benavides y León, 2007).

Y el vapor de agua que sigue siendo el GEI más abundante en la atmósfera y las nubes son una parte importante del invernadero planetario de la Tierra, ya que calientan nuestro planeta atrapando el calor que se encuentra debajo de ellas como lo dice Benavides y León, como se estratifica en la figura 2.2

El aumento de los GEI evoluciona y aumentan el efecto invernadero como tal, a causa del aumento en la temperatura de la atmósfera por la cantidad de gases atrapada con ayuda de vapor de agua que se refleja en nubes, dando como resultado el calentamiento global, como se muestra en la figura 2.3.

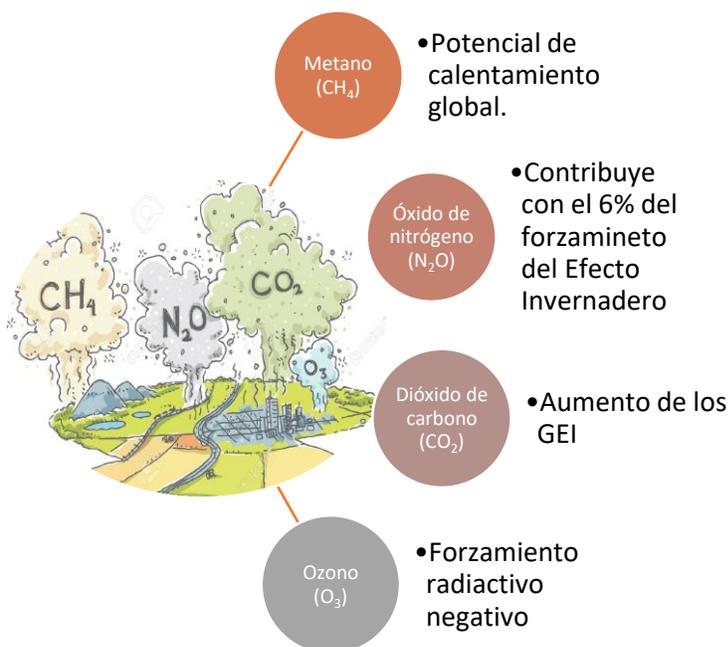


Figura 2. 3 Gases de Efecto Invernadero, y efectos la atmósfera

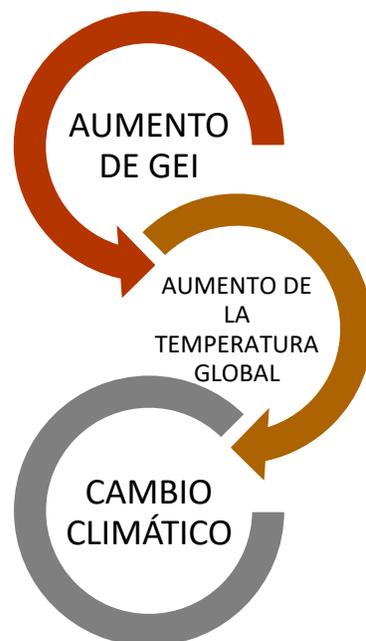


Figura 2. 2 Relación entre Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio climático

En este punto la relación entre los fenómenos de Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático puede quedar determinada. Considerando que el aumento de GEI provoca un aumento en el calentamiento global, y este último modifica en gran medida el cambio climático llevándolo a condiciones con distorsiones extremas a las naturales.

Y aunque al cambio climático se le añade la radiación solar recibida por la Tierra, tectónica de placas y erupciones volcánicas según Duarte en 2006, los cambios provocados por estos factores en el pasado no toman mayor peso que el daño causado por calentamiento global actual por los GEI producidos por el hombre.

II.I.II Carbonatación

La función de un concreto es formar parte de una estructura que soporta ciertas cargas muertas y vivas, haciendo de un lugar seguro y duradero para la vida humana, sin embargo, no hay manera de que al paso de los años la estructura continúe 100% sana, sin tener ningún daño tanto superficial o interno. Existen daños superficiales como lo son grietas o fisuras y daños internos como la carbonatación y corrosión.

Después del proceso de curado, empieza la etapa de desgaste de la estructura, pasando de un 100% sana hasta el momento en que quede inservible debido a los ataques que pueda presentar. Este trabajo se enfocará en un daño interno ligado al Cambio climático: La carbonatación

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral, pero ¿Por qué es un problema la pérdida de pH?

Porque el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión, y se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero embebido. Sin embargo, si el pH del concreto baja a un rango de 10 a 11, únicamente con 100 ppm o menos de cloruros puede comenzar el proceso de corrosión.

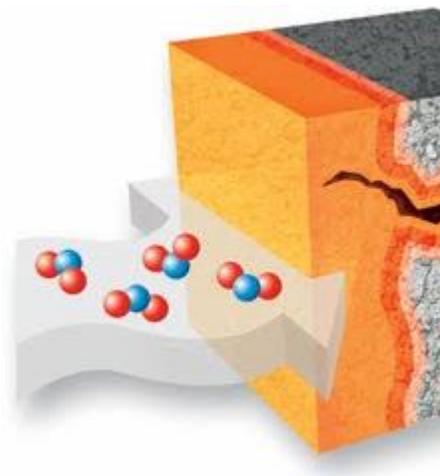


Figura 2. 4 Prolongación de carbonatación

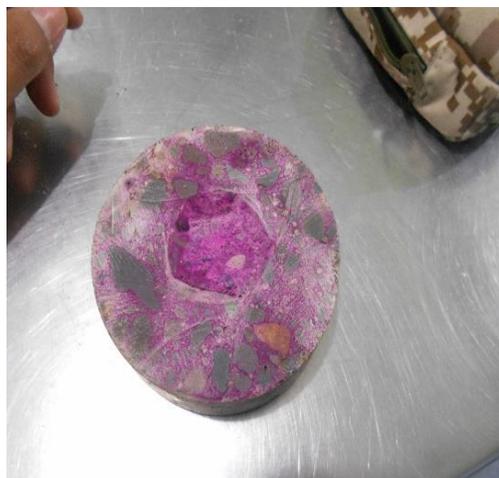


Figura 2. 5 Carbonatación en el concreto observada con un indicador colorimétrico

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. Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar. (Montani, 2010)

Entonces por entendido de la importancia del CO₂ en el daño de carbonatación en el concreto, el cambio climático por ser parte de la cadena (Efecto Invernadero-Calentamiento global- Cambio climático) resulta ser una de las mayores consecuencias, lo cual lo convierte en uno de nuestros problemas a tratar. A mayor alteración del cambio

climático las cantidades de CO_2 resultan ser perjudiciales cuando penetran (Figura 2.3). Si a esto le agregamos los periodos débiles del concreto como lo son las temporadas de congelación y descongelamiento, así como a los agentes climáticos según su zona su exposición, ya que en gran medida la carbonatación depende de la humedad, como podemos observar en la siguiente Tabla 2.1, para que los cloruros puedan disolverse tenemos por demás causas y razones para que esta sea un problema que, aunque no se ve, pone en riesgo la durabilidad de las estructuras de concreto.

Tabla 2. 1 Relación de la humedad con la carbonatación.

Humedad Relativa % (HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO_2
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50%	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO_2

II.I.III Concreto modificado con aditivos

Siendo la durabilidad la característica que se busca mejorar, los aditivos resultan ser una alternativa para el desarrollo de un concreto que pueda resistir los efectos del cambio climático, que sea sustentable y factible en el ámbito comercial.

El trabajo de los aditivos en el concreto consiste en modificar una o más propiedades del concreto fresco, fraguado o endurecido. Los aditivos pueden ser divididos en artificiales y naturales. En donde los primeros son los extraídos de productos naturales, por lo general desechos de la industria, que después de pruebas, demuestren tener una actividad puzolánica similar a la del cemento convencional. Mientras que los artificiales resultan de los desechos industriales como residuos de vidrio, humo de sílice, escoria de aluminio, o geopolímeros entre otros.

Entre las razones principales para utilizar aditivos se encuentran:

En el concreto fresco:

- Incrementar la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua.
- Disminuir el contenido de agua sin modificar su trabajabilidad.
- Reducir o prevenir asentamientos de la mezcla.
- Crear una ligera expansión.
- Modificar la velocidad y/o el volumen de exudación.
- Reducir la segregación.
- Facilitar el bombeo.
- Reducir la velocidad de pérdida de asentamiento

En el concreto endurecido:

- Disminuir el calor de hidratación.
- Desarrollo inicial de resistencia.
- Incrementar las resistencias mecánicas del concreto.
- Incrementar la durabilidad del concreto.
- Disminuir el flujo capilar del agua.
- Mejorar la adherencia concreto-acero de refuerzo.

La utilización de los aditivos nació de la necesidad de mejorar las características del concreto, a causas de los daños que las estructuras estaban presentando y por consiguiente la fórmula original no estaba preparada para ellos. Tal es el caso de la problemática de este trabajo: el cambio climático. El clima y los gases de efecto invernadero, aunado a la contaminación y el crecimiento exponencial de la población que obligaba al desarrollo de estructuras más grandes, resistentes y construidas en cualquier parte del mundo, dieron como resultado el desgaste inesperado del concreto, ya que este habría de ser diseñado en una época donde las exigencias eran menores. Y ahora en la actualidad y urbanización debería ser mejorado.

Para la experimentación con aditivos naturales y artificiales se han seleccionado dos de cada tipo, a criterio de disponibilidad en la zona, para evaluar su desempeño en mezclas previamente diseñadas de concreto: Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (aditivo agroindustrial) y Humo de Sílice (aditivo industrial).

Para comenzar con la familiarización con estos dos aditivos, empezaremos con el aditivo natural que ha sido utilizado en más de 26 artículos nacionales e internacionales desde el 2010 a la actualidad: Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.

II.I.IV Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.

Siendo un residuo natural de la ceniza de bagazo de caña este se obtiene en el fondo de la caldera y como cenizas volantes, este material es considerado puzolánico por algunos investigadores por presentar en su composición gran cantidad de SiO_2 .



Figura 2. 6 Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar.

Vidal en 2014 define que entre sus características principales se destacan las partículas ultrafinas las cuales se obtienen por procesos de molienda (Figura 2.6). Entre las aplicaciones de la CBCA, se encuentran la obtención de materiales vitrocerámicos, como material absorbente para la eliminación de iones de cromo, como material de cama para la crianza de pollos de engorde en piso y como adición al cemento Portland, entre otros.

La industria azucarera genera anualmente enormes cantidades de residuos, aproximadamente para la modalidad de cosecha en verde, los residuos pueden ser entre 50 y 100 t/ha (Toledo, 2008) de las 6 millones 182,000 toneladas de caña de azúcar que se produjeron en el 2018 las cuales se cosechan en 802,000 hectáreas, ubicadas en 227 municipios de 15 estados del país. Entre estos se encuentra la denominada ceniza de bagazo de caña (CBC) que resulta de la combustión de este subproducto y cuya dispersión en el ambiente contamina el aire y afecta la salud humana.

Con ello nuestro concreto pasa a ser de un concreto ordinario a un concreto sustentable por su aportación al medio ambiente. Y el aprovechamiento de los residuos hace que el costo sea menor a un concreto convencional.

II.I.V Humo de Sílice

Nuestro aditivo artificial es un mineral compuesto de esferas de bióxido de silicio (SiO_2) ultrafino, amorfo y cristalino, producido durante la fabricación de silicio o ferrosilicio (Figura 2.7). Este proceso involucra la reducción de cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C . Los vapores del horno se conducen a través de tuberías de enfriamiento, por un precolector y ciclón – para quitar las partículas gruesas que pudieran haberse arrastrado del horno – y luego se soplan hacia filtros bolsa diseñados especialmente donde se recolectan (Tejeda, 2016)



Figura 2. 7 Humo de Sílice, en estado poroso y tamizado

El tamaño promedio de partícula está por debajo de 0.5 micras, lo que significa que cada microesfera es 100 veces más pequeña que un grano de cemento promedio. En una mezcla típica, con dosificación de 10% de micro sílice, habrá entre 50, 000 y 100, 000 partículas de micro sílice por grano de cemento (QuimiNet, 2005).

Ahora bien, no podemos dejar pasar las características del cemento, del cual sustituiremos parcialmente. Para tener un fundamento del porque se emplean los aditivos y los contrastes entre estos tres productos puzolánicos.

II.I.VI Cemento Portland Compuesto

Características dictadas por la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, el Cemento Portland Compuesto es un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece (Figura 2.8). Se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando a un grado de finura determinado una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, que se denomina clinker Portland, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, además se le pueden incorporar otros materiales como: Puzolanas, Escoria granulada de alto horno, Humo de sílice y Caliza. Y aunque tiene clasificaciones según su composición y características especiales, en esta investigación se trabajará con el Cemento Portland Compuesto (CPC).



Figura 2. 8 Cemento Portland Compuesto (CPC).

Capítulo III

III.I METODOLOGÍA

La metodología es la forma y el proceso ordenado y secuencial de las actividades relacionadas, en este caso, de la parte de experimental de un proyecto. Se presenta el diseño de 3 tipo de mezclas, con un correcto desarrollo de las siguientes actividades:

1. Especificación de zonas de exposición.
2. Matriz de experimentación.
3. Caracterización de los materiales.
4. Dosificación por el método ACI 211.1
5. Elaboración de probetas.
6. Exposición de cilindros.
7. Pruebas de carbonatación

Esta sistemática abarca desde la planeación del lugar, hasta las pruebas realizadas bimestralmente, para al finalizar de esta solo se proceda a la obtención y análisis de los resultados.

III.I.I Zona de exposición

Este trabajo está enfocado en los resultados de carbonatación que resulten de concretos de control, adicionados con Humo de Sílice y CBCA, y su mejoría o en efecto la durabilidad, por ello es necesario explicar porque la zona de exposición está determinada. En Veracruz hay una zona climática que abarca cerca de un 60% del estado; Zona Costera en la cual estarán expuestos nuestros especímenes.

Existen parámetros del clima que tomaremos como base para el análisis de la zona y sus daños en el concreto, como lo son:

- ✓ Humedad
- ✓ Temperatura
- ✓ Precipitación
- ✓ Velocidad y dirección del viento

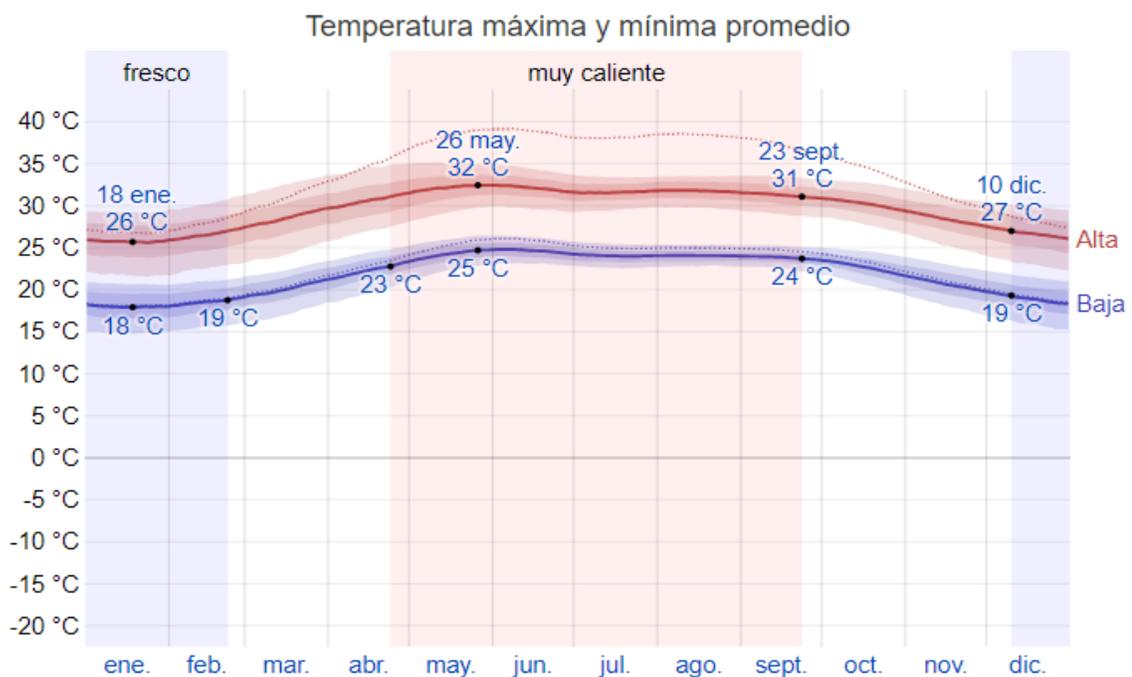
Se eligió esta ciudad debido a la relación de trabajo investigativo que se tiene con la Universidad Veracruzana Campus Boca del Río, y la facilidad de acceso desde la ciudad en la que se encuentra nuestra institución. La ubicación de la estación de monitoreo fue destinada a Boca del Río, Veracruz, que según el sitio web Weather Spark tienen las siguientes características climáticas

Boca del Rio, Veracruz.

Temperatura

Como se muestra en la figura 3.1, la temporada calurosa dura 5,0 meses, del 24 de abril al 23 de septiembre, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 31 °C. El día más caluroso del año es el 26 de mayo, con una temperatura máxima promedio de 32 °C y una temperatura mínima promedio de 25 °C.

La temporada fresca dura 2,4 meses, del 10 de diciembre al 22 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 27 °C. El día más frío del año es el 18 de enero, con una temperatura mínima promedio de 18 °C y máxima promedio de 26 °C.



La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90°. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

Figura 3. 1 Temperatura máxima y mínima promedio (Weather Spark).

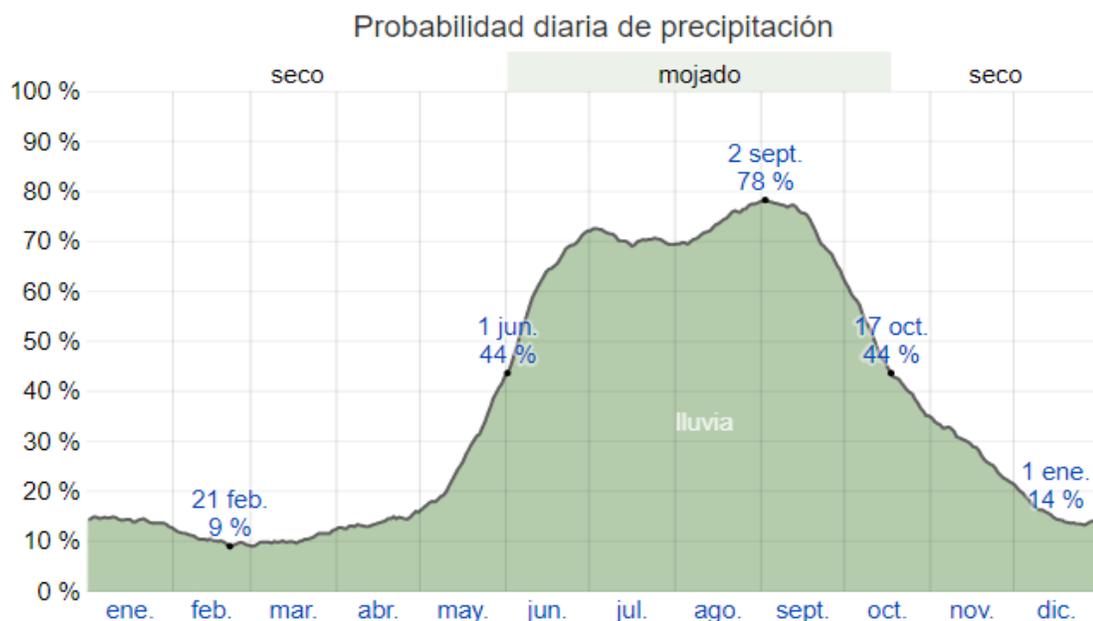
Precipitación

Un día mojado es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido (Figura 3. 2). La probabilidad de días mojados en Veracruz varía muy considerablemente durante el año.

La temporada más mojada dura 4,5 meses, de 1 de junio a 17 de octubre, con una probabilidad de más del 44 % de que cierto día será un día mojado. La probabilidad máxima de un día mojado es del 78 % el 2 de septiembre.

La temporada más seca dura 7,5 meses, del 17 de octubre al 1 de junio. La probabilidad mínima de un día mojado es del 9 % el 21 de febrero.

Entre los días mojados, distinguimos entre los que tienen solamente lluvia, solamente nieve o una combinación de las dos. En base a esta categorización, el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 78 % el 2 de septiembre.



El porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación, excluidas las cantidades ínfimas: solo lluvia, solo nieve, mezcla (llovió y nevó el mismo día).

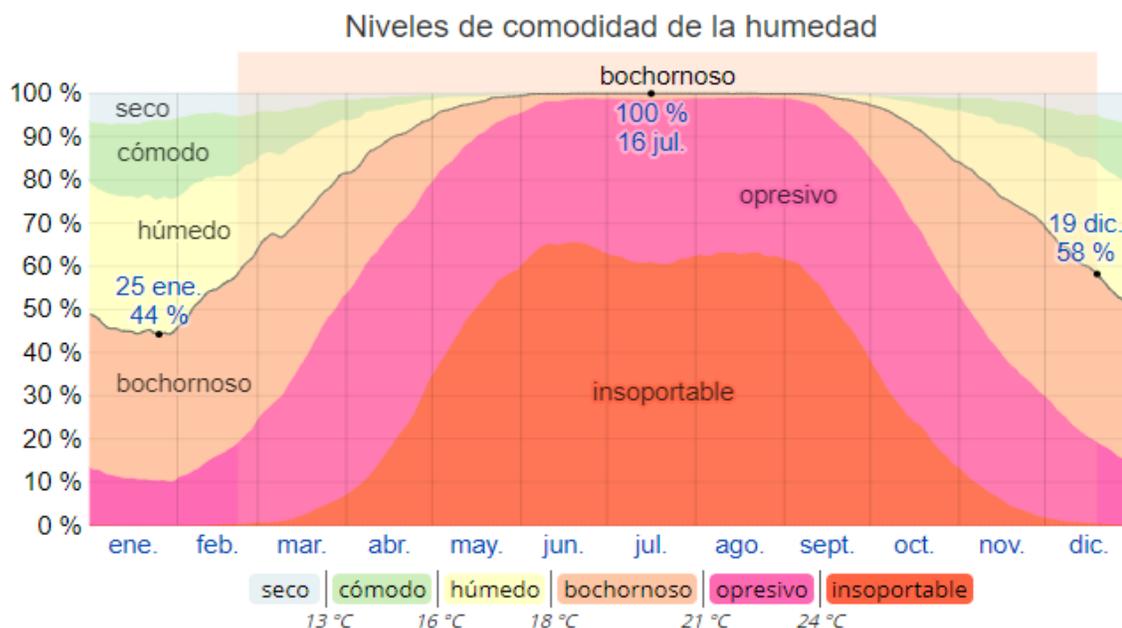
Figura 3. 2 Probabilidad de precipitación (Weather Spark).

Humedad

Basamos el nivel de comodidad de la humedad en el punto de rocío, ya que éste determina si el sudor se evaporará de la piel enfriando así el cuerpo. Cuando los puntos de rocío son más bajos se siente más seco y cuando son altos se siente más húmedo. A diferencia de la temperatura, que generalmente varía considerablemente entre la noche y el día, el punto de rocío tiende a cambiar más lentamente, así es que aunque la temperatura baje en la noche, en un día húmedo generalmente la noche es húmeda.

En Veracruz la humedad percibida varía extremadamente (Figura 3.3).

El período más húmedo del año dura 9,9 meses, del 22 de febrero al 19 de diciembre, y durante ese tiempo el nivel de comodidad es bochornoso, opresivo o insoportable por lo menos durante el 58 % del tiempo. El día más húmedo del año es el 16 de julio, con humedad el 100 % del tiempo. El día menos húmedo del año es el 25 de enero, con condiciones húmedas el 44 % del tiempo.



El porcentaje de tiempo pasado en varios niveles de comodidad de humedad, categorizado por el punto de rocío.

Figura 3. 3 Niveles de humedad (Weather Spark).

Viento

Esta sección trata sobre el vector de viento promedio por hora del área ancha (velocidad y dirección) a 10 metros sobre el suelo. El viento de cierta ubicación depende en gran medida de la topografía local y de otros factores; y la velocidad instantánea y dirección del viento varían más ampliamente que los promedios por hora.

La velocidad promedio del viento por hora en Veracruz tiene variaciones estacionales considerables en el transcurso del año.

La parte más ventosa del año dura 8,2 meses, del 17 de septiembre al 24 de mayo, con velocidades promedio del viento de más de 12,6 kilómetros por hora. El día más ventoso del año es el 6 de noviembre, con una velocidad promedio del viento de 15,9 kilómetros por hora.

El tiempo más calmado del año dura 3,8 meses, del 24 de mayo al 17 de septiembre. El día más calmado del año es el 25 de julio, con una velocidad promedio del viento de 9,3 kilómetros por hora (Figura 3.4).

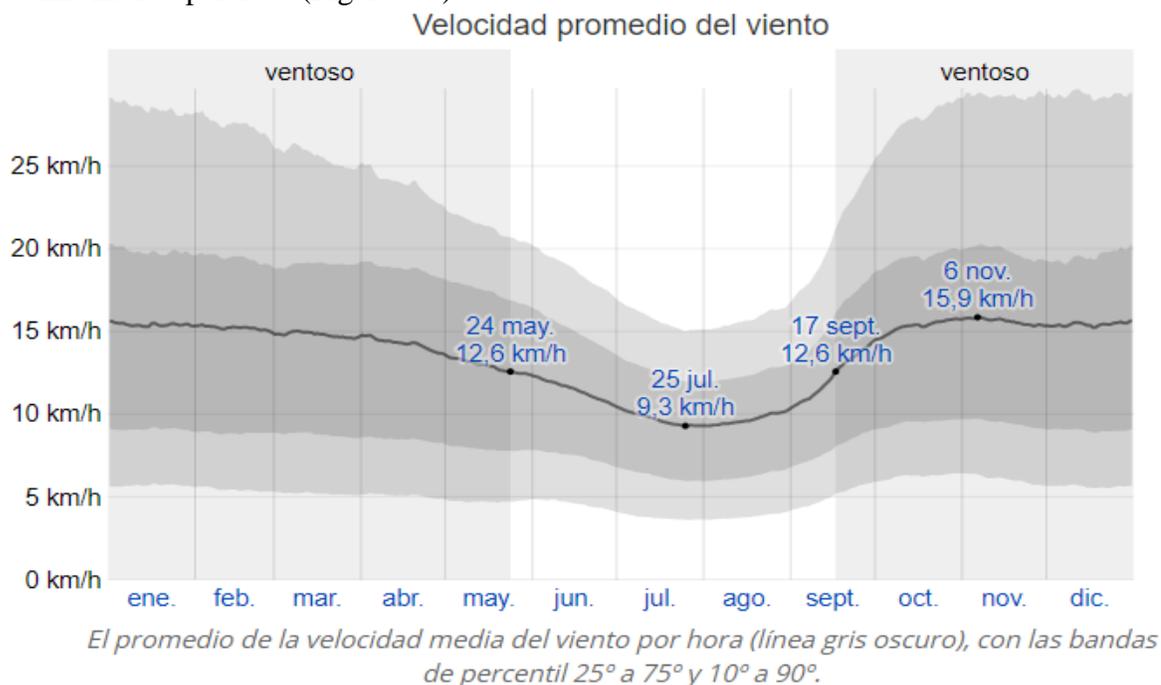
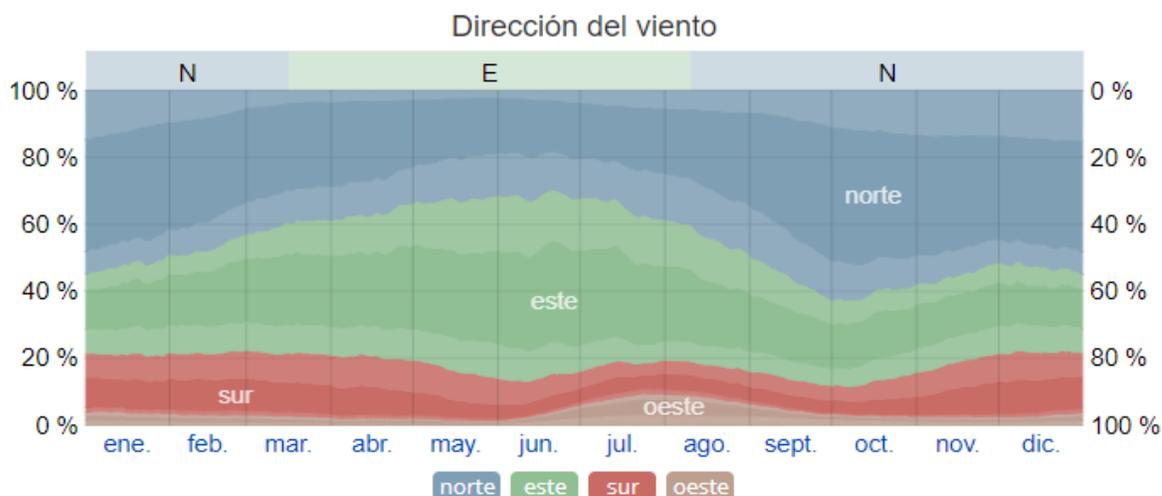


Figura 3. 4 Velocidad promedio del viento (Weather Spark).

La dirección predominante promedio por hora del viento en Veracruz varía durante el año (Figura 3.5).

El viento con más frecuencia viene del este durante 4,8 meses, del 16 de marzo al 10 de agosto, con un porcentaje máximo del 55 % en 7 de junio. El viento con más frecuencia viene del norte durante 7,2 meses, del 10 de agosto al 16 de marzo, con un porcentaje máximo del 55 % en 1 de enero.



El porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en que la velocidad media del viento es menos de 1,6 km/h. Las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste).

Figura 3. 5 Dirección del viento (Weather Spark).

Comparación

Para tener un punto de comparación, se tomaron datos generales de la segunda zona climática más fuerte del estado de Veracruz; zona montañosa Xalapa, Ver., con el fin de tener un análisis sobre la influencia de los factores climáticos en la costa.

Tabla 3. 1 Resumen de Temperatura anual de Xalapa y Boca del río, Ver

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS		TEMPERATURA					
		ENE-FEB	MAR-ABR	MAY-JUN	JUL-AGO	SEP-OCT	NOV-DIC
XALAPA, VER	MÍN. PROM	8°C	10°C	14°C	14°C	11°C	10°C
	MÁX. PROM	20°C	27°C	28°C	25°C	25°C	23°C
VERACRUZ, VER	MÍN. PROM	18°C	19°C	23°C	24°C	22°C	18°C
	MÁX. PROM	27°C	32°C	32°C	32°C	32°C	29°C

En la temperatura, tabla 3.1, podemos distinguir que en la zona costera (Boca del río) se tiene una temperatura máxima 5°C mayor que la zona montañosa (Xalapa, Ver), lo que significa una actividad de cloruros alta.

Tabla 3. 2 Resumen de Humedad anual de Xalapa y Boca del río, Ver

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS		HUMEDAD					
		ENE-FEB	MAR-ABR	MAY-JUN	JUL-AGO	SEP-OCT	NOV-DIC
XALAPA, VER	MÍN. PROM	0%	0%	16%	23%	30%	8%
	MÁX. PROM	0%	16%	35%	30%	8%	0%
VERACRUZ, VER	MÍN. PROM	44%	64%	95%	100%	84%	50%
	MÁX. PROM	63%	94%	100%	100%	100%	84%

La temperatura va de la mano con el contenido de humedad (Tabla 3.2), ya que esta es el indicador para la producción de rocío, que genera humedad. Teniendo en cuenta este principio podremos percibir mayor humedad en la zona costera por las altas temperaturas y con una precipitación máxima consiente de 78% como máxima y 9% como mínima, otorgando un estado de humedad constante.

La velocidad del viento, tabla 3.3, tiene relación con la difusión de los cloruros que provocan la carbonatación en las estructuras, y por consiguiente el ataque de cloruros y sulfatos se hace presente en las estructuras ya existentes ocasionando el desgaste. La velocidad del viento es más intensa en la zona costera, lo que resulta ser del todo lógico siendo una zona colindante al mar.

Tabla 3. 3 Resumen de Vel. del Viento anual de Xalapa y Boca del río, Ver

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS		VEL. DEL VIENTO					
		ENE-FEB	MAR-ABR	MAY-JUN	JUL-AGO	SEP-OCT	NOV-DIC
XALAPA, VER	MÍN. PROM	10.7 km/h	11.7 km/h	10.1 km/h	9 km/h	9.3 km/h	10.5 km/h
	MÁX. PROM	12 km/h	12.5 km/h	11.7 km/h	10.1 km/h	11 km/h	11.7 km/h
VERACRUZ, VER	MÍN. PROM	14.9 km/h	13.6 km/h	10.5 km/h	9.3 km/h	10.4 km/h	15.2 km/h
	MÁX. PROM	15.6 km/h	14.9 km/h	13.5 km/h	10.4 km/h	15.7 km/h	15.9 km/h

Podríamos predecir que el efecto de carbonatación y el desgaste debido al cambio climático (como ya fue analizado) tendrán mayores repercusiones en la zona costera por factores como altos índices de humedad y velocidad del viento significativa, aunque en la región de Xalapa los promedios máximos de precipitación (tabla 3.4) pueden llegar afectar de una manera sorpresiva sumando a esto una urbanización más concentrada en la región montañosa y el aumento de gases contaminantes.

Tabla 3. 4 Resumen de Precipitación anual de Xalapa y Boca del río, Ver

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS		PRECIPITACIÓN					
		ENE-FEB	MAR-ABR	MAY-JUN	JUL-AGO	SEP-OCT	NOV-DIC
XALAPA, VER	MÍN. PROM	22 mm	22 mm	50 mm	194 mm	97 mm	95 mm
	MÁX. PROM	25 mm	49 mm	224 mm	228 mm	239 mm	25 mm
VERACRUZ, VER	MÍN. PROM	14 mm	13 mm	29 mm	239 mm	102 mm	22 mm
	MÁX. PROM	22 mm	28 mm	245 mm	266 mm	270 mm	100 mm

III.I.II Matriz de Experimentación

Para llevar a cabo las pruebas experimentales en este proyecto se realizaron especímenes cilíndricos con tres mezclas diferentes, una con cemento Portland convencional, (llamada para fines prácticos en esta investigación “control”) por ser de concreto simple con un $F'_{C}=250 \text{ kg/cm}^2$, dos mezclas experimentales; la primera sustituyendo el 20% del cemento en la dosificación con un desecho agroindustrial la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, que es el producto de la combustión del bagazo de la caña de azúcar, resultado de la molienda de la caña para la obtención de azúcar en los ingenios azucareros del país a elevadas temperaturas, entre 700°C y 900°C .

La segunda mezcla sustituye de la misma manera que la mezcla anterior, el 20% del cemento en la dosificación inicial con un residuo industrial, la Micro sílice, también llamada Humo de Sílice (HS) es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferro silicio. Su proceso es resultado de la reducción de cuarzo de pureza elevada (SiO_2) con carbón en hornos de arco eléctrico, a temperaturas mayores a 2000°C (IMCYC, 2010).

En definitiva, la matriz de experimentación quedará de la siguiente manera, con 3 tipos de mezcla, un medio para exponerlo a un tiempo de 6 meses; da un total de 18 cilindros a elaborar (Tabla 3.5).

Tabla 3. 5 Matriz de experimentación.

ESPECÍMENES	MEDIO	TIEMPO	TOTAL
CONTROL	BOCA DEL RÍO, VERACRUZ	6 MESES	CARBONATACIÓN (4")
CBCA 20%			
HUMO DE SÍLICE 20%			
3	1	6	18

III.I.III Caracterización de materiales

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm (Campos, 2009).

La caracterización de materiales es el primer paso por realizar dentro del presente proyecto, se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etcétera.

Existen para ello distintas técnicas de caracterización, de acuerdo con el interés que despierte dicho material. Una vez conocidas las características del material puede establecerse la naturaleza de este, así como sus posibles aplicaciones.

Es por esta razón que el proceso de la caracterización de materiales es primordial como base para realizar la dosificación de nuestras mezclas, como se menciona en el método ACI 211.1, “los métodos descritos proporcionan una aproximación preliminar de las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto, que luego deben ser verificadas mediante mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y efectuar los ajustes que sean necesarios con el objetivo de lograr las características deseadas en el concreto fresco y endurecido” (Figura 3.6).

Para todo esto existen pruebas a los agregados, necesarios para la realización de la dosificación y consecuentemente la elaboración de los cilindros a experimentar.

Para la realización de estas en el presente proyecto se utilizó material de Río de la región de Misantla, Veracruz.

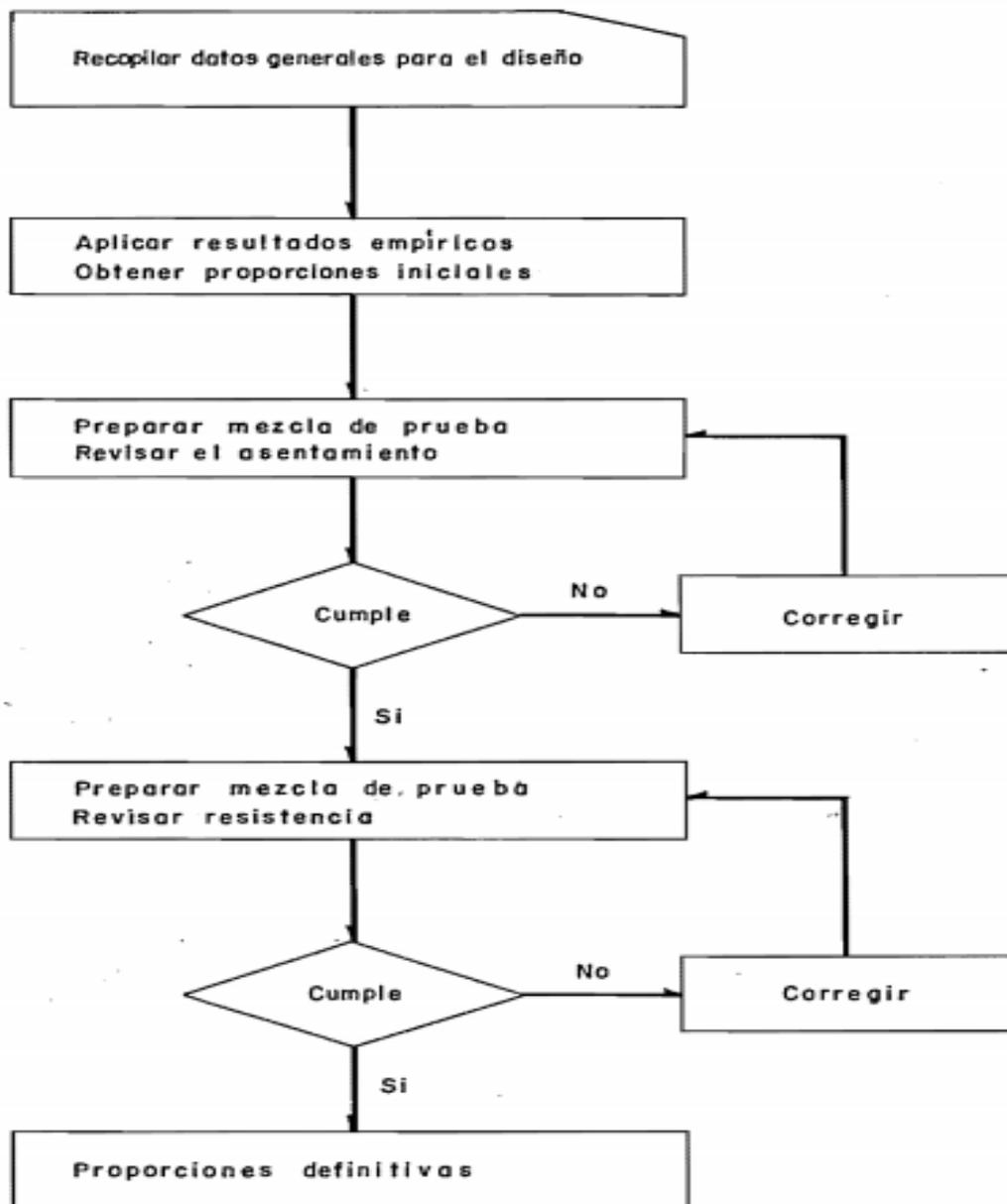


Figura 3. 6 Metodología gráfica en el diseño de mezclas según ACI 211.1

PREPARACIÓN DE LOS AGREGADOS

Secado	Agregado Fino y Grueso
	NMX C-030-ONNCCE-2004

El secado se realiza con el objeto de facilitar la disgregación y manejo de las muestras, cuando su contenido de agua es tal, que no se pueden disgregar fácilmente.

Material

El equipo para el secado estar en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

1. Horno

Eléctrico o de gas, provisto de termostato capaz de mantener una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y con dimensiones mínima de $50 \times 80 \times 30$ cm.



Figura 3. 7 Horno eléctrico

2. Cucharón

De 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un paralelepípedo rectangular con solo cuatro caras, cuya cara menor lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.



Figura 3. 8 Cucharón.

3. Charolas

Lámina galvanizada, de forma rectangular $40 \times 70 \times 10$ cm.



Figura 3. 9 Charolas.

4. Pala

De acero, de forma rectangular.



Figura 3. 10 Pala cuadrada.

Procedimiento.

1. Para realizar el secado de la muestra al aire o al sol a temperatura ambiente, se extiende la muestra en las charolas o sobre una superficie sensiblemente horizontal, lisa y limpia, para que sea fácil recogerla, evitar la pérdida de finos y su contaminación.
2. Cuando se utilice un horno para el secado, la muestra se coloca dentro de éste en las charolas y se mantendrá $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
3. En ambos casos, se revuelve periódicamente el material con el cucharón para lograr un secado más rápido y uniforme, hasta reducir su contenido de agua a un grado tal que permita su fácil disgregación.



Figura 3. 12 Secado de material.



Figura 3. 11 Enfriamiento y distribución de material

Cuarteo	Agregado Fino y Grueso
	NMX C-030-ONNCCE-2004

El cuarteo se realiza con el objeto de obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

Material

El equipo para el cuarteo debe estar en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

1. Balanza.

Con capacidad de 120 kg y aproximación de 10 g.



Figura 3. 13 Báscula eléctrica.

2. Pala.

3. Brocha.

Con las dimensiones y cerdas adecuadas para distribuir el material fino en cada operación de cuarteo.



Figura 3. 14 Brocha

4. Lona ahulada.

Rectangular, de 150 cm por lado como mínimo.

5. Reglas.

Con las dimensiones adecuadas al volumen por cuartear.



Figura 3. 15 Lona ahulada

6. Charolas.

7. Cucharones.

Procedimiento.

1. Se mezcla todo el material de la muestra disgregada hasta que presente un aspecto homogéneo, traspaleándolo de un lugar a otro aproximadamente cuatro veces, sobre una superficie sensiblemente horizontal, lisa y limpia, de preferencia cubierta con la lona.
2. Si se utiliza una lona ahulada, el material se deposita sobre ella y se mezcla levantando simultáneamente dos vértices opuestos de la lona, haciendo rodar la muestra sin que resbale y evitando que el material se salga de ella. Se repite la misma operación con los otros dos vértices y así sucesivamente, hasta lograr la mezcla homogénea del material.

3. Una vez homogeneizada la muestra, se forma un cono, depositando con la pala el material en el vértice de este, para que se acomode por sí solo y procurando a la vez que la distribución se haga uniformemente.



Figura 3. 16 Distribución de material

4. Se forma un cono truncado, encajando la pala en los vértices del cono original y haciéndola girar alrededor de su eje con el fin de ir desalojando el material hacia la periferia, hasta dejarlo con una altura de 15 a 20 cm.



Figura 3. 17 Revoltura de material.

5. Enseguida, el cono truncado se separa en cuadrantes sensiblemente iguales, con la ayuda de una regla de dimensiones adecuadas al volumen de la muestra.



Figura 3. 18 Cuarteo de material

PRUEBAS A LOS AGREGADOS

Granulometría	Agregado Fino y Grueso NMX-C-077-1997-ONNCCE
----------------------	---

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices, según la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE, “El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre aberturas cuadradas, como menciona Chang en 2007. Los siete tamices estándar para agregado fino tienen aberturas que varían desde la malla No. 100(150 micras) hasta 9.52 mm”.

Los números de tamaño (tamaños de granulometría), para el agregado grueso se aplican a las cantidades de agregado (en peso), en porcentajes que pasan a través de un arreglo de mallas. Para la construcción de vías terrestres, la norma ASTM D 448 enlista los trece números de tamaño de la ASTM C 33, más otros seis números de tamaño para agregado grueso.

La arena o agregado fino solamente tiene un rango de tamaños de partícula. Ahora bien, también hay que tener en cuenta que como lo menciona la Norma ASTM D-422, “La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como Las cantidades de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto”, de aquí la importancia de la prueba granulométrica de los agregados.

Antes de efectuar el análisis por tamiz, hay que secar al aire la muestra de agregado para impedir que terrones de partículas finas se clasifiquen como partículas grandes y también para impedir que se obstruyan los tamices más finos. Las masas mínimas de las muestras reducidas por el tamizado

Material

1. Juego de mallas

Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la Tabla 3.6. El tejido está sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor. Para cribar las partículas mayores de 4,75 mm (malla N°4) también se podrán utilizar mallas con marco de 400 mm por lado, a fin de facilitar la operación.



Figura 3. 19 Tamices

Tabla 3. 6 Características de tamices.

Fracción	Malla		Variación permisible de la abertura promedio con respecto a la denominación de la malla	Abertura máxima permisible para no más del 5% de las aberturas de la malla	Abertura máxima individual permisible	Diámetro nominal del alambre ^[1]
	Designación	Abertura nominal				
Grava	3"	75,0	$\pm 2,2$	78,1	78,7	5,80
	2"	50,0	$\pm 1,5$	52,1	52,6	5,05
	1½"	37,5	$\pm 1,1$	39,1	39,5	4,59
	1"	25,0	$\pm 0,8$	26,1	26,4	3,80
	¾"	19,0	$\pm 0,6$	19,9	20,1	3,30
	½"	12,5	$\pm 0,39$	13,10	13,31	2,67
	⅜"	9,5	$\pm 0,30$	9,97	10,16	2,27
	¼"	6,3	$\pm 0,20$	6,64	6,78	1,82
	N°4	4,75	$\pm 0,15$	5,02	5,14	1,54
Arena con finos	N°10	2,0	$\pm 0,070$	2,135	2,215	0,900
	N°20	0,850	$\pm 0,035$	0,925	0,970	0,510
	N°40	0,425	$\pm 0,019$	0,471	0,502	0,290
	N°60	0,250	$\pm 0,012$	0,283	0,306	0,180
	N°100	0,150	$\pm 0,008$	0,174	0,192	0,110
	N°200	0,075	$\pm 0,005$	0,091	0,103	0,053

2. Horno

4. Cucharón

3. Balanzas

5. Charolas.

6. Tapas y charolas de fondo para las mallas

Tapas de forma circular, que se acoplen perfectamente con la parte superior del bastidor de las mallas y charolas de fondos de forma circular de $206. \pm 2$ mm de diámetro interior y $68. \pm 2$ mm de altura, para sujetarse a la parte inferior del bastidor de las mallas.



Figura 3. 20 Tapa y fondo de tamices

7. Cepillos o brochas

Procedimiento

Se preparan dos juegos, el primero para la grava y el segundo para la arena, acomodándolas en el primer caso y ensamblándolas en el segundo, en orden descendente de aberturas y terminando cada juego con las charolas de fondo.

1. Para el cribado, el material se vierte poco a poco y cuidadosamente por cada malla, a la que se le aplica un movimiento vertical y de rotación horizontal, con el fin de mantener al material en constante movimiento para permitir que las partículas de tamaños menores pasen a través de las aberturas y recolectarlas en una charola, como se muestra. El material retenido se coloca en otra charola. Este cribado se hará considerando además que:
 - a) La cantidad de material que se vaya colocando sobre la malla será menor que la capacidad de esta para evitar pérdidas y facilitar el cribado.
 - b) El paso de las partículas a través de las aberturas de la malla se efectuará libremente y sin forzarlas.
 - c) El cribado se suspenderá cuando se estime que la masa del material que pasa dicha malla durante 1 minuto de agitación es menor de 1 g.
2. Concluido el cribado, se verifica si las partículas que quedaron retenidas y que tienen forma de laja o de aguja pueden pasar a través de la malla, para lo cual se acomodan

con la mano según su dimensión menor y sin forzarlas se introducen entre las separaciones, incorporando a la porción retenida aquellas que de cualquier forma queden atoradas en las tramas de la malla.

3. Obteniendo la masa del material retenido en cada una, como se ilustra en la, registrándola como W_i , en g, con aproximación a la unidad, donde el subíndice i corresponde a la designación de la malla respectiva.



Figura 3. 21 Proceso de tamizado.



Figura 3. 22 Pesado de material por tamiz

Método de cálculo y resultados de investigación.

El Tamaño Máximo designado para el agregado, siempre es un tamaño menor que aquél a través del cual se requiere que pase el 100% del material. El Tamaño Mínimo es la máxima abertura de tamiz por el que pase menos del 15% en peso o se retenga en su totalidad. Habiendo definido estos dos valores la normativa ASTM C33.

Esta norma señala el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños a través de las cribas.

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

y el módulo de finura será:

$$MF = \frac{\Sigma \% \text{retenido acumulado}(6'' + 3'' + 1 \frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + No. 4 + No. 16 + No. 30 + No. 50 + No. 100)}{100}$$

Ecuación 3. 1 Módulo de finura y Tamaño máximo nominal

Fórmula para calcular el Módulo de Finura

A continuación, se presenta un ejemplo de gradación y cálculo del módulo de finura, para un agregado fino y uno grueso.

Tamaño máximo nominal

Tabla 3. 7 Cálculo de tamaño máximo nominal

Tamiz No.	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Porcentaje que Pasa	Requisito de % que Pasa [#]
1 1/2	37.5	0	0	0	100	100
1	25	1.2	4	4	96	95 a 100
3/4"	19	9.3	30	34	66	-
1/2"	12.5	6.8	22	56	44	25 a 60
3/8 "	9.5	4.3	14	70	30	-
4	4.75	8.4	27	97	3	0 a 10
8	2.36	0.9	3	100	0	0 a 5
bandeja		0	0	0		
total		30.9	100	360.8		

Según la norma ASTM C33 para un agregado entre 1" a N°4 (tabla 2.9)

$$TMN = \frac{(0 + 34 + 70 + 97 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100)}{100} = \frac{701}{100} = 7.01$$

Módulo de finura

Tabla 3. 8 Cálculo de módulo de finura

Tamiz No.	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Porcentaje que Pasa	Requisito de % que Pasa [#]
3/8 "	9.525	0	0.0	0.0	100.0	100
4	4.75	22	4.1	4.1	95.9	95 a 100
8	2.36	65	12.0	16.1	83.9	80 a 100
16	1.18	103	19.0	35.1	64.9	50 a 85
30	0.6	119	22.0	57.0	43.0	25 a 60
50	0.355	157	29.0	86.0	14.0	10 a 30
100	0.15	60	11.1	97.0	3.0	2 a 10
bandeja		16	3.0			
total		542	100	295.2		

según la norma ASTM C33

$$MF = \frac{(0 + 4.1 + 16.1 + 35.1 + 57 + 86 + 97)}{100} = \frac{295.2}{100} = 2.95$$

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

2	MÓDULO DE FINURA DE LA ARENA	3.8 mm
4	TAMAÑO MÁXIMO DE LA GRAVA	25 mm

Densidad	Agregado Fino y Grueso
	NMX-C-165-ONNCCE-2014
	NMX-C-164-ONNCCE-2014

La densidad es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia, en este caso, los agregados de nuestra mezcla. La densidad media es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Si un cuerpo no tiene una distribución uniforme de la masa en todos sus puntos, la densidad alrededor de un punto dado puede diferir de la densidad media (Schackelford, 2008)

Material

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Mallas del n°4 y de 3/8" 2. Lienzo
De material absorbente. 3. Termómetro
Calibrado, con un rango de 0 a 50°C y aproximación de 0,2°C. 4. Embudo 5. Probeta graduada
De 250 cm³ de capacidad y aproximación de 1 cm³ 6. Picnómetro tipo sifón | <ol style="list-style-type: none"> 7. Matraz
Formado por un cilindro metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura, con un sifón colocado a 250 mm de su base,. 8. Fuente de calor.
Parrilla eléctrica u otra fuente de calor. 9. Balanzas 10. Cucharón |
|--|---|



Figura 3. 23 Matraz



Figura 3. 24 Picnómetro tipo sifón



Figura 3. 25 Probeta graduada

11. Charolas
12. Horno
13. Cuentagotas o pipeta
De vidrio o metal.
14. Agua
Destilada



Figura 3. 26 Fuente de calor.

Procedimiento.

-Preparación de muestra.

Procedimiento para agregado Fino.

1. De la fracción de material que pasa por la malla N°4, se toman aproximadamente 100.g, sin haber secado el material.
2. Aplicando presión en forma manual se disgregan los grumos hasta obtener un material homogéneo, teniendo el cuidado necesario para no romper las partículas durante esta operación.



Figura 3. 27 Secado de material

3. Se procede a secar la muestra en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, que representa la masa seca del material y se registra como P_s , en g.

Procedimiento para agregado Grueso.

1. De la fracción de material que se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ " se toma una cantidad tal que permita obtener una muestra de aproximadamente 500 g.
2. Se colocan los 500 g de material en una charola con agua, donde se somete a saturación por un período de 24 h.
3. Después del período de saturación, se retira el material del agua y se seca superficialmente con un lienzo, procurando eliminar únicamente el agua adherida en la superficie sin remover mediante presión el agua absorbida. Esta operación se realiza lo más rápido posible a fin de evitar cualquier pérdida de agua por evaporación.



Figura 3. 28 Saturación de grava



Figura 3. 29 Secado de grava

-Procedimiento de la prueba

Procedimiento para agregado Fino.

1. Utilizando el embudo, se introduce la muestra que pasó la malla N°4 en el matraz previamente tarado y calibrado.
2. Posteriormente se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.
3. Utilizando la parrilla eléctrica o fuente de calor, se pone en ebullición el agua del matraz, moviendo al mismo tiempo el material con el agitador mientras hierve, hasta expulsar el aire atrapado.
4. Se deja enfriar el matraz hasta alcanzar la temperatura ambiente y se adiciona el volumen de agua destilada necesario para alcanzar la marca de aforo.
5. Se seca superficialmente el matraz y se determina su masa en la balanza, registrándola como P_2 , en g.
6. Se tapa el matraz y se invierte varias veces en forma cuidadosa con el fin de uniformar la temperatura de la suspensión, a continuación se coloca el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra la temperatura, misma que es considerada como la temperatura de la prueba t_p .
7. Finalmente, utilizando la curva de calibración mostrada en la Figura 3.1.3.25, se obtiene la masa del matraz con el agua, en g, correspondiente a la temperatura de prueba t_p y se registra como P_1 .

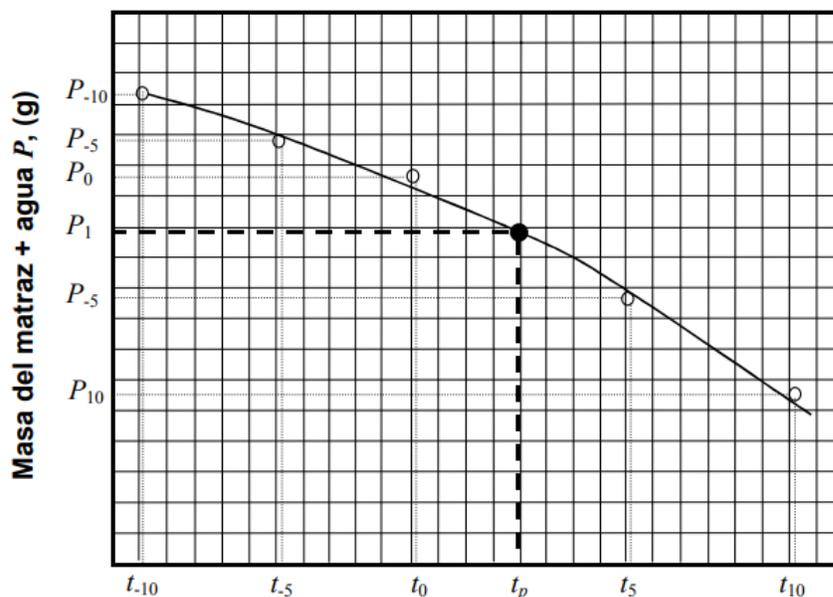


Figura 3. 30 Curva de calibración.



Figura 3. 31 Saturación de arena.



Figura 3. 32 Saturación de arena 2.

Procedimiento para agregado Grueso.

1. Se coloca el picnómetro sobre una superficie horizontal libre de vibraciones y se llena con agua destilada hasta el nivel de derrame. Junto a él, en su extremo de desalajo se coloca una probeta graduada vacía.
2. El material saturado y superficialmente seco se sumerge en el picnómetro y se recolecta en la probeta graduada el agua desalojada. Al concluir la inmersión del material, se mide sobre la escala de la probeta graduada el volumen correspondiente y se registra como V_t , en cm^3
3. Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ C$ durante 20 h. Transcurrido este tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
4. Una vez enfriado, se determina la masa del material seco y se registra como P_i , en g.



Figura 3. 33 Determinación de densidad con pictómetro



Figura 3. 34 Determinación de densidad por pictómetro 2



Figura 3. 35 Determinación de densidad por pictómetro 3.

✚ Método de cálculo y resultados de investigación.

Se calcula y reporta la densidad relativa del material que se retiene en la malla $\frac{3}{8}$ ", mediante la siguiente expresión:

$$D_{rg} = \frac{P_i}{V_t(D_w)}$$

Ecuación 3. 2 Densidad relativa de grava.

Donde:

Drg= Densidad relativa del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ ", (adimensional)

Pi = Masa del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ " en condición seca, (g)

Vt = Volumen del material retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ ", (cm³)

Dw = Densidad del agua, que se considera igual a 1 g/cm³

Se calcula y reporta la densidad relativa del material que pasa la malla N°4, mediante la siguiente expresión:

$$D_{rsf} = \frac{P_s}{P_s + P_1 - P_2}$$

Ecuación 3. 3 Densidad relativa de arena

Donde:

Drsf= Densidad relativa del material que pasa la malla N°4, (adimensional)

Ps = Masa del material que pasa la malla N°4 en condición seca, (g)

P1 = Masa del matraz lleno de agua destilada a la temperatura de prueba tp, determinada gráficamente de la curva de calibración del matraz.

P2 = Masa del matraz con el agua destilada y el material que pasa la malla N°4, obtenida con la balanza, (g)

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

3	PESO ESPECÍFICO DE LA ARENA (DENSIDAD)	2.8
5	PESO ESPECÍFICO DE LA GRAVA (DENSIDAD)	2.4

Peso volumétrico seco varillado	Agregado Grueso
	NMX-C-073-ONNCCE-2004

Es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado compactando el material, mediante vibrado o varillado, que se realiza para obtener un volumen más cercano al real, disminuyendo la cantidad de vacíos. El volumen al que se hace referencia es ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado. El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal varía desde aproximadamente $1,200 \text{ kg/m}^3$ a $1,760 \text{ kg/m}^3$. El contenido de vacíos entre partículas afecta la demanda de mortero en el diseño de la mezcla.

Los contenidos de vacíos varían desde aproximadamente 30% a 45% para los agregados gruesos hasta 40% a 50% para el agregado fino. La angularidad aumenta el contenido de vacíos; mayores tamaños de agregado bien graduado y una granulometría mejorada hacen disminuir el contenido de vacíos.

Material

1. Balanza
2. Cucharón
3. Regla
4. Varilla punta de bala.

De acero de $5/8$ de pulgadas de diámetro, aproximadamente 24 pulgadas de longitud, con al menos uno de sus extremos acabado en forma de bala.

5. Molde o recipiente cilíndrico.
Manejable y rígido para evitar su deformación.



Figura 3. 36 Varilla punta de bala.



Figura 3. 37 Recipiente cilíndrico.

✚ Procedimiento.

1. Se homogeneiza el material mediante mezclado,
2. Empleando el cucharón de lámina, llenar el recipiente de lámina
3. Para lo cual se deja caer el material desde una altura de 20 cm, evitando su reacomodo por movimientos indebidos. Posteriormente se enrasa el material utilizando la regla de 30 cm.
4. Se obtiene la masa del recipiente con el material, y se registra como W_{rm} , en g, con aproximación de 5 g.



Figura 3. 39 Peso volumétrico seco compactado

✚ Método de cálculo y resultados de investigación.

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, la masa volumétrica seca del material en estado suelto, mediante la siguiente expresión:

$$y_{ds} = \frac{100 W_m}{V (100 + w)} = \frac{y_m}{100 + w} (100)$$

Ecuación 3. 4 Peso volumétrico.

Donde:

y_{ds} = Masa volumétrica seca del material en estado suelto, (kg/m^3)

W_m = Masa del material contenido en el recipiente, (kg), determinada como:

$W_m = W_{rm} - W_r$

W_{rm} = Masa del recipiente con el material, (kg)

W_r = Masa del recipiente, (kg)

V = Volumen del recipiente, (m^3)

w = Contenido de agua del material, (%)

y_m = Masa volumétrica del material húmedo en estado suelto, (kg/m^3)

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

6	PESO VOLUMÉTRICO DE LA GRAVA	1508.86 kg/m^3
---	------------------------------	--------------------------------

Absorción	Agregado Fino y Grueso
	NMX-C-165-ONNCCE-2014 NMX-C-164-ONNCCE-2014

Es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca. El agregado se considera como "seco" cuando se ha mantenido a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por suficiente tiempo para remover toda el agua no combinada.

Material

1. Balanza.

2. Recipiente de la muestra.

Una canasta de malla con abertura de 3.35 mm o más fina, o un balde de aproximadamente igual ancho y altura, con capacidad de 4L y 7L para un tamaño máximo nominal de 37.5 mm o menos. El recipiente debe ser construido de modo que no se atrape aire cuando se sumerja.



Figura 3. 40 Canasta de Malla

3. Tamices.

Tamiz N° 4 o 4.75 mm

4. Picnómetro.

5. Pisón Metálico.

Debe tener un peso de 340 g y una sección plana de 25 mm de diámetro



Figura 3. 41 Pisón metálico.

Procedimiento.

Procedimiento para agregado Grueso.

1. Se coge una muestra de agregado grueso la cual se procede a realizar el cuarteo realizando tres veces este procedimiento



Figura 3. 42 Distribución de grava.

2. Esa muestra seleccionada se zarandea con la malla N°04 y lo retenido (según la norma ASTM) corresponde al agregado grueso adecuado y que se utilizará para el ensayo.

3. Ahora tomamos una muestra, el cual se procede a lavarla hasta que el agua alcance una transparencia (lo que indica que se elimina la suciedad contenida) y luego se deja sumergida en agua durante 24 horas.



Figura 3. 43 Saturación de material

4. Una vez lavada la muestra del agregado grueso, dejamos hasta al siguiente día en el laboratorio. Entonces, al día siguiente saturado la muestra, coger el recipiente del agregado. Ahora tomar sólo un parte de la muestra y la otra será eliminada. Debido a las partículas grandes del agregado sólo es necesario secarla con una franela o trapo. Así obtendremos la muestra parcialmente seca.



Figura 3. 44 Secado de material manualmente.

5. Una vez secada (parcialmente seca) se procede a pesar la muestra secada con la balanza de estabilidad. No sin antes tarar la balanza. Luego anotar dicho valor.

6. Después traer un balde repleto de agua y se fija con un pabilo por la base de la balanza. Luego, se introduce una canastilla con la muestra dentro y se sumerge en el balde. Anotar el valor que se obtiene

7. Finalmente, colocar la muestra de la canastilla en un recipiente. La cual será llevada al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas Después de haber pasado las 24 horas, sacar la muestra y pesarla. Tomar los respectivos datos y calcular los resultados para el porcentaje de absorción.



Figura 3. 45 Material en canasta.



Figura 3. 46 Sumergimiento de material.

Procedimiento para agregado Fino.

1. Ahora primero se escoge una muestra del material obtenido, la cual se proceda realizar el cuarteo realizando tres veces este procedimiento.
2. Enseguida empezamos zarandear entre la malla N°04 y N°200 (obtener el agregado fino correcto y adecuado). Considerando que el material que atraviesa la malla N° 200 no es apta para la elaboración de Concreto, y ésta se eliminará. Nota: También zarandeamos el material restante (agregado fino) que no se utilizó para esta elaboración. Pues servirá para posteriores ensayos (Contenido de Humedad).



Figura 3. 47 Distribución de material Arena

3. Ahora de igual manera que el agregado procedemos a lavar el agregado fino, con ayuda de una manguera de tal manera que al lavar el agua contenido en la arena se vea transparente (esto para sacar el polvo adherido a la tierra)

4. Una vez de haber lavado el agregado fino, procedemos a coger un balde con agua y agregamos hasta el tope al recipiente con la muestra contenida (Esto se realiza para que la muestra quede totalmente saturada). Y dejarla sumergida por 24 horas. Además, las piedras deberán estar extendidas, para que se saturen (absorción) el agua.



Figura 3. 48 Saturación de material arena

5. Al siguiente día o después de 24 horas, luego de que la muestra este totalmente saturada por un día, se coge la mitad de la muestra saturada (agregado) y se procede a secarla con la ayuda de una cocina eléctrica hasta que el agregado quede superficialmente seco

6. Una vez calentado el agregado, realizamos un pequeño ensayo del conito de absorción, introducimos la muestra en el molde cónico, luego apisona unas 25 veces dejando caer el pisón desde una altura aproximada de 1cm. Todo esto para corroborar si el material se encuentra superficialmente seco

7. Posteriormente se nivela y si al quitar el molde la muestra se deja caer a lo mucho 1/3 de la muestra, es porque ha alcanzado la condición requerida y no existe humedad libre, de lo contrario se sigue secando y se repite el proceso hasta que se cumpla con la condición

8. Después pesamos una muestra de 500 gramos del agregado y echarla a la fiola. Sin olvidar obtener el peso de la fiola vacía. También, agregar agua (a 20°C) hasta el ras indicado más o menos 500 ml.

9. Debemos mover, mezclar el agua con el agregado para que toda el agua entre y no quede espacio alguno, es decir eliminar todas las burbujas de aire posible.

10. Con la ayuda de una pipeta sacar el agua que sobra (hasta el ras indicado) en caso de que sobre pase.
11. Se procede a cuantificar el peso de la fiola (con la muestra y el aguamezcladas) en la balanza anotando su respectivo valor.
12. Con el material de la fiola procederemos a obtener el porcentaje de absorción. Para sacar la muestra hay una manera o un artificio el cual consiste en sacar primero la arena luego el agua, y así poder sacar fácilmente. Y, envasar esta muestra en un recipiente. Después de esto llevar la muestra al horno por espacio de 24 horas



Figura 3. 49 Pesado de material Arena

13. Para terminar, por último se lleva la muestra de agregado fino (después de 24 horas) a una balanza, y se anota los apuntes necesarios para realizar el cálculo del porcentaje de absorción

✚ Método de cálculo y resultados de investigación.

$$\text{Porcentaje de absorción para grava: } \frac{B-A}{A} \times 100 = \%$$

Donde

A= Peso de la muestra secada al horno

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca:

$$\text{Porcentaje de absorción para arena: } \frac{S-A}{A} \times 100 = \%$$

A= Peso de la arena secada al horno

S= Es la masa de la muestra saturada y superficialmente seca (grs)

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

4	ABSORCIÓN DE LA ARENA	3.8 %
8	ABSORCIÓN DE LA GRAVA	1.6 %

% de Humedad	Agregado Fino y Grueso NMX-C-166-0NNCCE-2006
---------------------	---

El contenido de humedad es la relación que existe entre el peso de agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra después de ser secada en el horno a una temperatura entre los 105°-110° C. Se expresa de forma de porcentaje, puede variar desde cero cuando está perfectamente seco hasta un máximo determinado que no necesariamente es el 100%. La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este, por ejemplo, cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica.

Material

1. Horno de secado.
2. Taras y recipientes resistentes a altas temperaturas y corrosión.
3. Balanza digital con una precisión de 0.01gr para muestras de menos de 200 gr y 0.1gr para muestras de más de 200 gr.
4. Tenazas y espátulas.
5. Guantes.

Procedimiento.

Procedimiento para agregado Grueso.

1. Ahora de la muestra del agregado restante tomamos una pequeña muestra y en dos taras o recipientes agregar dicha muestra. Antes obtener el peso de los recipientes vacíos.
2. Luego anotar el número de tara (para no confundir con otras taras) y anotar el peso de la muestra con los recipientes. Y luego llevarlas al horno por un espacio de 24 horas.
3. Después de 24 horas (al día siguiente) anotar el peso de la muestra en la tara. Por último teniendo todos los datos, podremos así obtener el porcentaje de absorción y el contenido de humedad.

Procedimiento para agregado Fino.

1. Del agregado restante que sobró para el ensayo de absorción, además de ya estar tamizado, se utiliza una pequeña muestra.
2. En un par de taritas debidamente ya pesadas, agregar dicha muestra
3. Luego pesar la muestra con las taras y apuntar su valor.
4. Seguidamente llevar las muestras al horno y dejarlas por el espacio de 24 horas
5. Finalmente ya pasadas las 24 horas, sacarlas del horno y luego pasar a pesarlas. Por cálculos obtener el contenido de humedad del agregado fino

✚ Método de cálculo y resultados de investigación.

Datos del ensayo:

$$W_{\text{tara}}$$

$$W_{\text{tara}} + W_{\text{peso húmedo}}$$

$$W_{\text{tara}} + W_{\text{peso seco}}$$

Obtenemos:

$$W_{\text{peso seco}} = (W_{\text{tara}} + W_{\text{peso seco}}) - (W_{\text{tara}})$$

$$W_{\text{peso húmedo}} = (W_{\text{tara}} + W_{\text{peso húmedo}}) - (W_{\text{tara}})$$

$$W_{\text{agua}} = (W_{\text{peso húmedo}}) - (W_{\text{peso seco}})$$

Contenido de humedad:

$$w\% = \frac{W_{\text{peso húmedo}} - W_{\text{peso seco}}}{W_{\text{peso seco}}} \times 100$$

Ecuación 3. 5 Contenido de Humedad

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

5	% DE HUMEDAD DE LA ARENA	3.09 %
9	% DE HUMEDAD DE LA GRAVA	3.45 %

RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN

Tabla 3. 9 Resumen de datos obtenidos de las pruebas

DATOS NECESARIOS OBTENIDOS DE PRUEBAS PREVIAS		
1	PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO	3150 kg
2	MÓDULO DE FINURA DE LA ARENA	3.8
3	PESO ESPECÍFICO DE LA ARENA (DENSIDAD)	2.8
4	ABSORCIÓN DE LA ARENA	3.8 %
5	% DE HUMEDAD DE LA ARENA	3.09 %
6	TAMAÑO MÁXIMO DE LA GRAVA	25 mm
7	PESO ESPECÍFICO DE LA GRAVA (DENSIDAD)	2.4
8	ABSORCIÓN DE LA GRAVA	1.6 %
9	% DE HUMEDAD DE LA GRAVA	3.45 %
10	PESO VOLUMÉTRICO DE LA GRAVA	1508.86 kg/m ³
11	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	250 Kg/cm ²

Para el correcto desarrollo de las actividades del proyecto, son necesarios una lista de materiales especializados de ingeniería civil, la mayoría fueron proporcionados por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, sitio donde se realizaron la mayoría de las pruebas.

III.IV Dosificación

La matriz de experimentación se realizó en base a las variables del proyecto, como son; la resistencia a la compresión del concreto necesaria, condiciones climatológicas de la zona de exposición y las características de las diferentes mezclas; de control, además de la sustitución del CPC 30R.

Los materiales se caracterizaron, con el fin de conocer las propiedades físicas de los agregados a utilizar, en base a la Normativa ONNCCE, posteriormente basándose en el reglamento ACI 211.1 se hace el proporcionamiento para determinar la cantidad de material necesario para elaborar una probeta de cada tipo de mezcla.

En la mezcla de control, en la Tabla 3.10 se muestra las cantidades empleadas en la dosificación para un espécimen de control, llamados así por ser de concreto simple (sin ningún aditivo), considerando en todos los casos el 10% de desperdicio correspondiente y cantidades necesarias para una probeta propuesta de 4”.

Tabla 3. 10 Dosificación para 1 espécimen de control

PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLA DE CONTROL		
Cemento	0.58	Kg.
Grava	1.34	Kg.
Arena	1.49	Kg.
Agua	0.30	Kg.

La Tabla 3.11 nos muestra las cantidades necesarias de material para el colado de 1 espécimen de CBCA, con una sustitución del 20% de cemento con Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, que como se ha mencionado a lo largo del proyecto, es un sustituto parcial del cemento por su alta actividad puzolánica.

Tabla 3. 11 Dosificación para 1 espécimen de CBCA

PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLA DE CBCA	
Cemento	0.46 Kg.
Grava	1.34 Kg.
Arena	1.49 Kg.
Agua	0.30 Kg.
CBCA	0.12 Kg.

En la Tabla 3.12 observamos la dosificación con los materiales necesarios para elaborar una probeta de Humo de sílice, con su respectiva sustitución igualmente del 20% de cemento, al igual que el sustituto agroindustrial, este desecho de la industria metalúrgica tiene alta actividad puzolánica, además, sus partículas a nivel microscópico tienen una forma esférica y de menor tamaño que el cemento, lo cual lo hace un sustituto perfecto, de manera parcial.

Tabla 3. 12 Dosificación para 1 espécimen de Humo de sílice

PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLA DE HUMO DE SILICE	
Cemento	0.46 Kg.
Grava	1.34 Kg.
Arena	1.49 Kg.
Agua	0.30 Kg.
Humo de sílice	0.12 Kg.

III.I.V Elaboración de probetas de estudio.

Elaboración y curado de especímenes
--

NMX-C-159-ONNCCE-2016

Las probetas de estudio se realizaron en el ITSM, apegándose a la normativa NMX-C-159-ONNCCE-2016 (elaboración y curado de especímenes en laboratorio) y sus dimensiones se aprecian en la figura 3.50.

En total se elaborarán 3 especímenes (Figura 3.50), de cada tipo de mezcla, para cada zona de exposición, para poder monitorearlos a lo largo de un año, haciendo pruebas en periodos de dos meses, lo anterior da un total de 6 probetas de control, 6 probetas con CBCA y 6 probetas con Humo de sílice, para ubicarlas en la zona de exposición, la ciudad de Boca del Rio del estado de Veracruz.

.
.

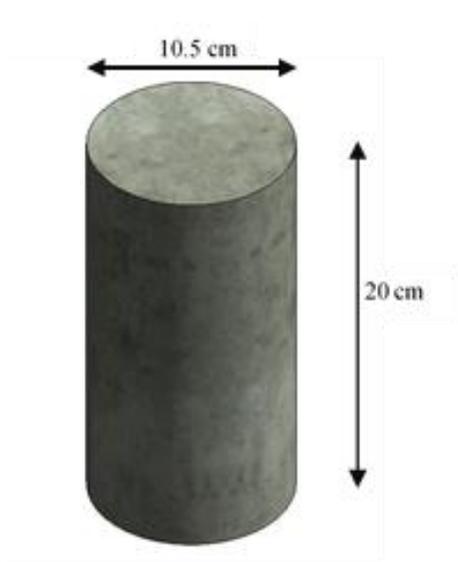


Figura 3. 51 Modelo de probetas de estudio.

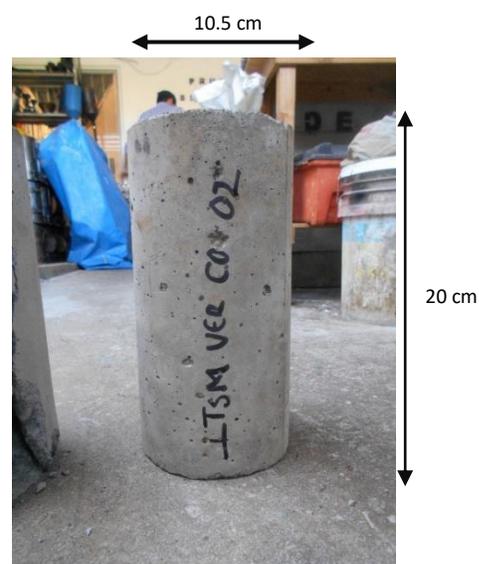


Figura 3. 50 Probeta de estudio real

Elaboración de moldes

De igual manera dentro del ITSM se elaboraron los moldes para las probetas con un tubo de PVC, como se observa en la figura 3.52, en base a un tubo de 4" como se mencionó en las dimensiones, y se anclaron las paredes de la abertura con cintillas metálicas y cinchos de plástico para evitar el colapso del molde y el derrame de concreto en esa zona, además de que se realizaron cortes de 90° al tubo de manera longitudinal, para facilitar el descimbrado de los especímenes y se colocaron en una superficie plana para evitar la salida de mezcla por la parte inferior de las probetas.



Figura 3. 53 Moldes para probetas



Figura 3. 52 Elaboración de moldes para probetas

III.I.VI Pruebas al concreto fresco

Elaboración De Mezcla.

Durante la elaboración de las mezclas de concreto se realizaron las respectivas pruebas al concreto fresco establecidas en la normativa ONNCCE, tanto en procedimiento como en materiales, por ejemplo, la norma que habla sobre las características que debe tener el agua para concreto (NMX-C-122-11-2004):



Figura 3. 54 Mezcla para revenimiento y temperatura.



Figura 3. 55 Mezcla para revenimiento y temperatura.

Revenimiento	NMX-C-156-ONNCCE-2010
---------------------	-----------------------

Siguiendo lo especificado en la norma mexicana NMX-C-156-ONNCCE-2010, “el propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Esta es una medida de la fluidez relativa de la mezcla de concreto. El revenimiento no mide el contenido de agua o la trabajabilidad del concreto”.

Material

1. Cono de Abrams.
2. Varilla Punta de Bala.
3. Cucharón.
4. Cinta métrica
5. Cronómetro

Procedimiento

1. Se humedeció el interior del cono de revenimiento.
2. Se colocó el cono sobre una superficie plana, mojada, no absorbente y rígida.
3. Se sostuvo el cono firmemente en su lugar parándose sobre los dos estribos de apoyo a cada lado del molde. Se llenó el cono en tres capas, varillando 25 veces en cada capa en todo su espesor, en forma de espiral y perforando hasta 1 pulgada la capa inferior.
4. Se enrazó el cono y se sacó en un solo movimiento.
5. Se colocó el cono de manera invertida al lado de la mezcla, se colocó la varilla de manera horizontal sobre el cono e inmediatamente mida la distancia de la varilla al centro de la mezcla. La medición dada es el revenimiento de la mezcla.



Figura 3. 57 Varillado para revenimiento



Figura 3. 56 Prueba de revenimiento

Medición de temperatura del concreto recién mezclado.	ASTM C 1064
--	-------------

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad, tiempo de fraguado y resistencia del concreto. Sin el control de la temperatura del concreto, predecir su comportamiento es muy difícil, si no imposible.

Un concreto con una temperatura inicial alta, probablemente tendrá una resistencia superior a lo normal a edades tempranas y más baja de lo normal a edades tardías. La calidad final del concreto probablemente se verá también disminuida. Por el contrario, el concreto colado y curado a temperaturas bajas desarrollará su resistencia a una tasa más lenta, pero finalmente tendrá una resistencia más alta y será de mayor calidad. La temperatura del concreto se usa para indicar el tipo de curado y protección que se necesitará, así como el lapso en que deben mantenerse el curado y la protección.

Al controlar la temperatura del concreto dentro de los límites aceptables se podrán evitar problemas tanto inmediatos como futuros. Cuando hay que evaluar diferentes tipos de concreto, la temperatura de las mezclas de cada concreto debe ser tan idéntica como sea posible.

La temperatura del concreto afecta el comportamiento de los aditivos químicos, los aditivos inclusores de aire, los materiales puzolánicos y otros tipos de aditivos y adicionantes.

Material

1. Termómetro
2. Mezcla de concreto.

Procedimiento.

1. Se colocó el dispositivo para medir la temperatura en el concreto de modo que la porción sensible esté sumergida al menos 3 pulgadas (75 mm).
2. Se ejerció una presión suavemente el concreto alrededor del dispositivo para medir la temperatura de modo que la temperatura del aire ambiente (afuera) no influya en la temperatura medida.
3. Se dejó el dispositivo para medir la temperatura del concreto por un mínimo de 2 minutos, o hasta que la lectura se estabilice.
4. Se leyó y se registró la temperatura del concreto fresco al 1 °F [0.5 °C] más próximo mientras que el dispositivo para medir la temperatura está en el concreto.
5. Se completó la medición de la temperatura cinco minutos después de obtener la muestra de concreto.



Figura 3. 58 Medición de temperatura

En la figura 3.59 se observa la prueba de revenimiento al concreto fresco, así mismo se realizó la prueba de temperatura la cual indico un parámetro de 29°C, además un revenimiento que se consideró en el diseño de la dosificación de 10 cm, el cual se cumplió en la elaboración de las mezclas mencionadas.



Figura 3. 59 Medición de revenimiento

También se consideró la respectiva normativa mexicana NMX-C-160-2010, para el varillado y golpeo en las probetas de estudio.

El proceso de colado de mezclas se ve reflejada en las siguientes imágenes:



Figura 3. 60 Pesado de material para colado



Figura 3. 61 Revoltura de mezcla



Figura 3. 62 Colado de mezcla

A las 24 horas posteriores al colado de los cilindros, se realizó el descimbrado de las probetas de los moldes establecidos, donde se colocaron en recipientes para su respectiva etapa de curado en 28 días, como se puede observar en la figura 3.64, el tanque de curado con las distintas probetas.



Figura 3. 64 Descimbrado de cilindros



Figura 3. 63 Tanque de curado con los especímenes

III.I.VII Especificación del sitio de exposición.

La zona de exposición es marcada por la matriz de experimentación, en la zona costera, debido a que es uno de los principales ecosistemas del estado.

En la Universidad Veracruzana Campus Boca del Río, en la ciudad de Boca del Río, se van a monitorear los especímenes correspondientes a la zona costera, en el laboratorio de Ingeniería Civil a cargo del Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro.

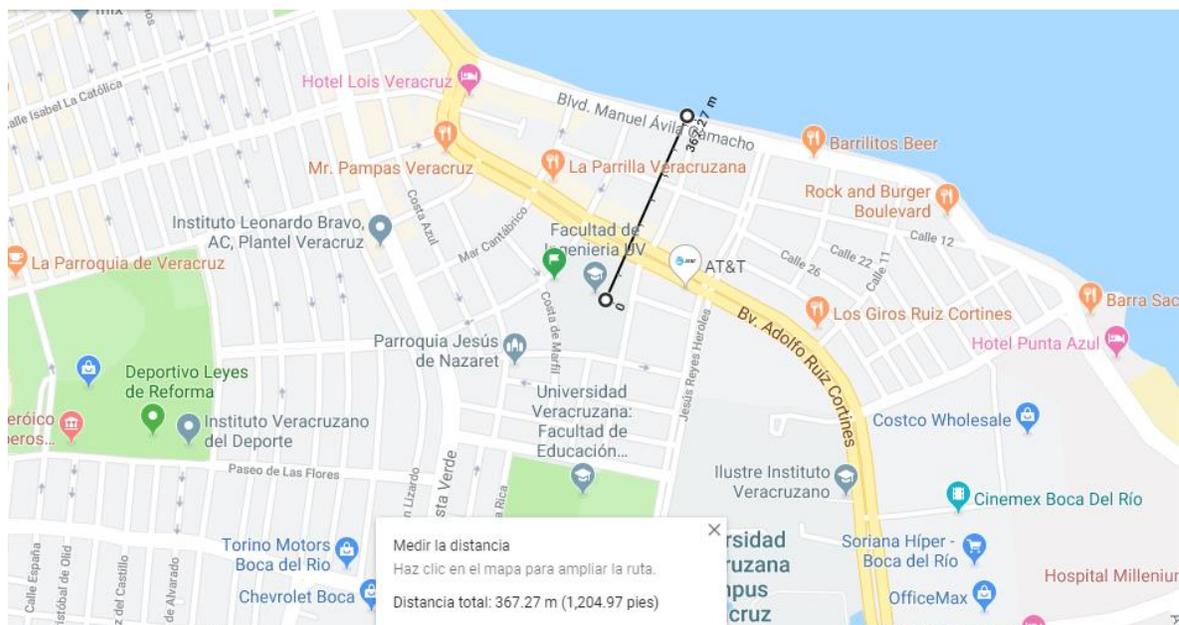


Figura 3. 66 Ubicación de la zona de exposición y distancia a la costa



Figura 3. 65 Facultad de Ingeniería Universidad Veracruzana, Campus Boca Del Río

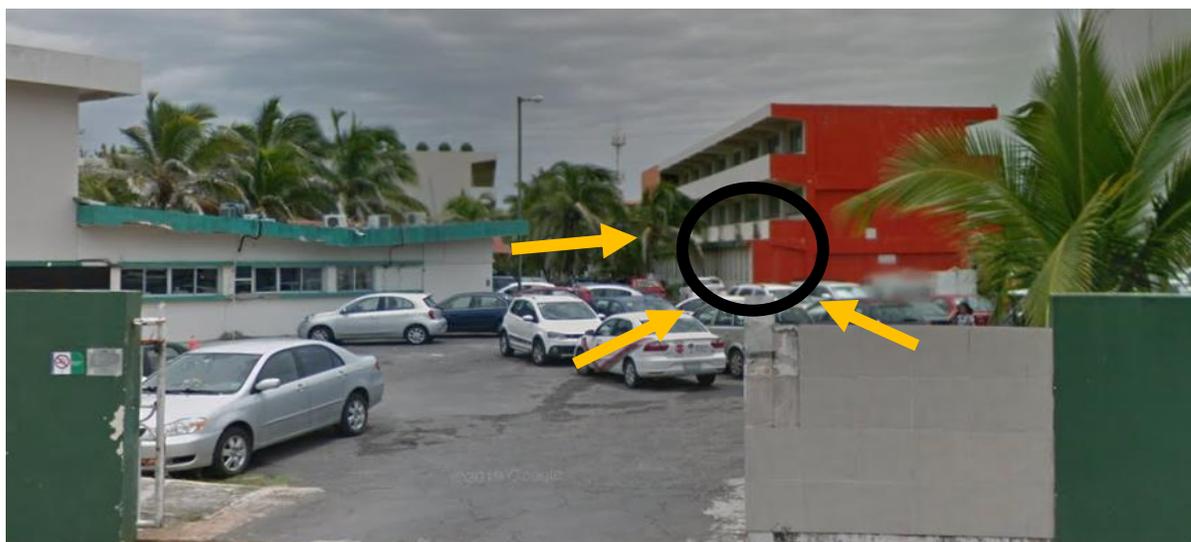


Figura 3. 67 Especificación de la posición de la zona de exposición

FICHA DE IDENTIFICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO

Nombre de la Estación:	Boca del Río
Código de la Estación:	BOC-01
Ciudad:	Boca del Río
Estado:	Veracruz
País:	México
Ubicación de la Estación:	Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana
Dirección de la Estación:	Av Juan Pablo II s/n entre Ruiz Cortines y Reyes Heróles Boca del Río, Veracruz, CP 294294
Fecha de Instalación de la Estación:	10/08/2018
Atmósfera Aparente:	Urbano Marina

Figura 3. 69 Ficha de identificación de la estación de monitoreo.

PARÁMETROS AMBIENTALES DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO BOCA DEL RÍO (BOC-01)

PERIODO		Agosto 2018 - Junio 2019
PARÁMETROS		Medición Promedio
Temperatura promedio (°C)	Avg Temp	25.31
Humedad relativa (%)	AvgRh	87.17
Tiempo de humectación	TDH	0.73
Precipitación pluvial (mm)	Rain	1516.23
Velocidad del viento (m/s)	WSK	5.52
Dirección del viento Azimut (°)	Dir	177.97
sensor de radiación solar (W/m2)	AvgSR	213.23
Emisiones de CO2 (PPM)	CO2	19.1

Figura 3. 68 Parámetros ambientales de la estación de monitoreo.

Exposición ambiental de probetas.

Se colocaron los especímenes en puntos estratégicos de la zona de estudio, en la figura 3.70 se observa la colocación de los especímenes de estudio mencionados, se decidió colocarlos en una azotea, para que la exposición fuera lo más homogénea posible, debido que a nivel del piso los edificios vecinos, vegetación u otros factores externos a la investigación podrían afectar de manera negativa los resultados.

De esta manera, ubicados en la azotea, los factores de intemperismo afectan a los especímenes de la forma más apegada a la realidad.



Figura 3. 70 Cilindros colocados en exposición ambiental

Distribuidos de esta manera se tiene la certeza de que los cilindros en todas las direcciones se verán afectados de la misma manera, aprovechando así totalmente el área del espécimen (Figura 3.70).

Las probetas de estudio se colocaron en zonas donde fuera un proceso natural de desgaste, debido a emisiones de gases de efecto invernadero, los factores de intemperismo, meteorización, además de considerar el tipo de clima en la zona de estudio, en especial el porcentaje de humedad relativa media anual, para el correcto aprovechamiento de las probetas, como se pudo observar en la Figura 3.70 se colocaron los especímenes en las azoteas de los edificios donde se lleva el control

Una vez colocados en exposición, los especímenes de cada mezcla se van a analizar en periodos de 2 meses, donde, mediante la prueba de medición de la profundidad de corrosión se va a analizar el impacto del cambio climático en las estructuras de concreto.

III.I.VIII Pruebas a Concreto Endurecido

Pruebas de profundidad de carbonatación.

Como se estableció en la Revista Construcción y Tecnología de diciembre 2000 por parte del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. El concreto, con su ambiente altamente alcalino en un rango de pH de 12 a 13, protege al acero de refuerzo ahogado 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.

Cuando progresa la carbonatación hacia el acero de refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

Esto quiere decir que es muy importante identificar la presencia de concreto carbonatado antes que llegue al acero de refuerzo, pues el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, y se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero embebido. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el intervalo de ppm de cloruros para que inicie la corrosión es significativamente menor (100 ppm o menos).

Ahora bien, la prueba como tal es muy sencilla, también se tiene entendido que existen pruebas de mayor exactitud, como son Difracción De Rayos X (Xrd) O Microscopía Electrónica De Barrido (Sem).

Para fines de nuestra investigación, solo se realizará la prueba visual con un indicador colorimétrico a base de fenolftaleína al 1%, diluida con alcohol isopropílico en partes iguales, como ya se mencionó, es necesario equipo de laboratorio, para tener la seguridad

adecuada, pues se va a trabajar con sustancias tóxicas para la piel, así que son indispensables:

Material

- Guantes de látex
- Cubrebocas
- Bata de laboratorio
- Los recipientes adecuados
- Vernier.
- Fenolftaleína a 1%
- Alcohol etílico.
- Probeta de 500 ml



Figura 3. 71 Vernier



Figura 3. 72
Fenolftaleína al 1%

Procedimiento.

El proceso es bastante sencillo y el siguiente:

1. Se debe tener los especímenes con el interior expuesto y recién cortado, para que el ambiente no afecte nuestros datos.
2. Con un aspersor se rocía en la superficie recién expuesta del cilindro, esperamos unos segundos para que la solución acuosa actúe.
3. Se debe apreciar un cambio de tonalidad en el concreto, las partes color magenta, indican un concreto sano (con un pH mayor a 10), las partes que no cambie su coloración son sectores carbonatados del concreto, en los cuales el nivel de pH ha disminuido por acción de los agentes de intemperismo. En estas zonas, los cloruros han penetrado ya, dañando nuestro concreto.



Figura 3. 73 Concreto cortado para carbonatación.

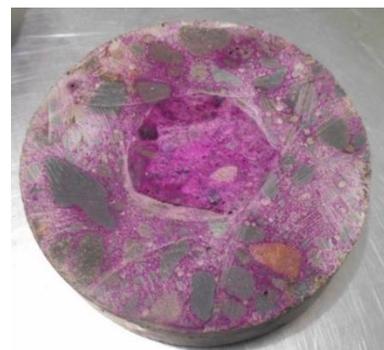


Figura 3. 74 Reacción de concreto a la solución.

4. Procedemos a tomar la medición con nuestro escalímetro, lo más aproximado a la exactitud donde se nota el cambio de coloración.



Figura 3. 75 Medición de carbonatación.

La fenolftaleína, de fórmula $C_{20}H_{14}O_4$, es un indicador de pH que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en disoluciones básicas toma un color rosado con un punto de viraje entre $pH=8,2$ (incoloro) y $pH=10$ (magenta). Esta es la razón por la cual se utiliza para la medición del pH en las pruebas de carbonatación, así, el concreto sano, que aún conserva el pH igual o mayor a 10, se torna de color magenta, y las zonas carbonatadas, se mantiene incoloro, indicando que el concreto en esa zona se ha vuelto ácido, ha perdido su alcalinidad natural.

Capítulo IV

IV.I RESULTADOS

IV.I.I Carbonatación

En las primeras mediciones, se pudo notar que en las probetas de Humo de Sílice se presenta una resistencia a la carbonatación a lo largo de la probeta, esto indica que el nivel de pH se mantiene en todo el cilindro de concreto, muy diferente a las probetas de control, que se ven mayormente afectadas en la zona alta, es decir, la parte donde no está en contacto con el suelo tiene una tendencia mayor a carbonatarse, esto se explica por qué está en mayor contacto con el ambiente.

Periodo agosto 2018 – septiembre 2018

Es el primer periodo de análisis, como ya se estableció en la matriz de experimentación, los datos de la profundidad de carbonatación serán medidos en mm. Podemos observar en la figura 4.1 que desde el primer periodo se presentaba un deterioro en las probetas debido a la carbonatación y el agresivo ambiente en el que se encuentran expuestas, cabe



Figura 4. 1 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre agosto 2018 – septiembre 2018

resaltar que la profundidad de carbonatación es acumulativa, pues se exponen probetas por periodos de tiempo.

Periodo octubre 2018 – noviembre 2018

En el segundo periodo, como se muestra en la figura 4.2, de análisis las tendencias en los resultados se mantienen igual que en el periodo anterior, pues la mezcla de HUMO DE SÍLICE es la menor afectada por la carbonatación, la mezcla de CONTROL es un parteaguas entre los tres resultados, y esa era la función de la probeta, servir de comparativa entre las mezclas experimentales, lo que quiere decir que los resultados son los esperados hasta el momento, aún es pronto para adelantar conclusiones, porque debemos recordar que el potencial de la mezcla de HUMO DE SÍLICE y la CBCA se detona meses después del curado.



Figura 4. 2 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre octubre 2018 – noviembre 2018

De la misma manera que en el periodo pasado, la mezcla menos afectada es la de HUMO DE SÍLICE, y aumenta su resistencia a la carbonatación. La probeta de CBCA tuvo un

cambio significativo comparado con el periodo anterior, pues se ve menormente afectada por la carbonatación, pasando al segundo lugar en la tabla de mediciones, demostrando así que se detona el potencial de la mezcla adicionada con CBCA meses después de la fecha de curado y exposición.

La mezcla de control está cumpliendo su función dentro de la investigación, pues sirve de referente comparativo, entre las mezclas experimentales, se nota un progresivo aumento de la carbonatación mes con mes, es decir, tiene un decrecimiento en su resistencia a la carbonatación.

Periodo diciembre 2018 – enero 2019

Es el tercer periodo de exposición de especímenes correspondiente al bimestre diciembre 2018 – enero 2019, nos encontramos a la mitad del periodo de exposición de probetas.

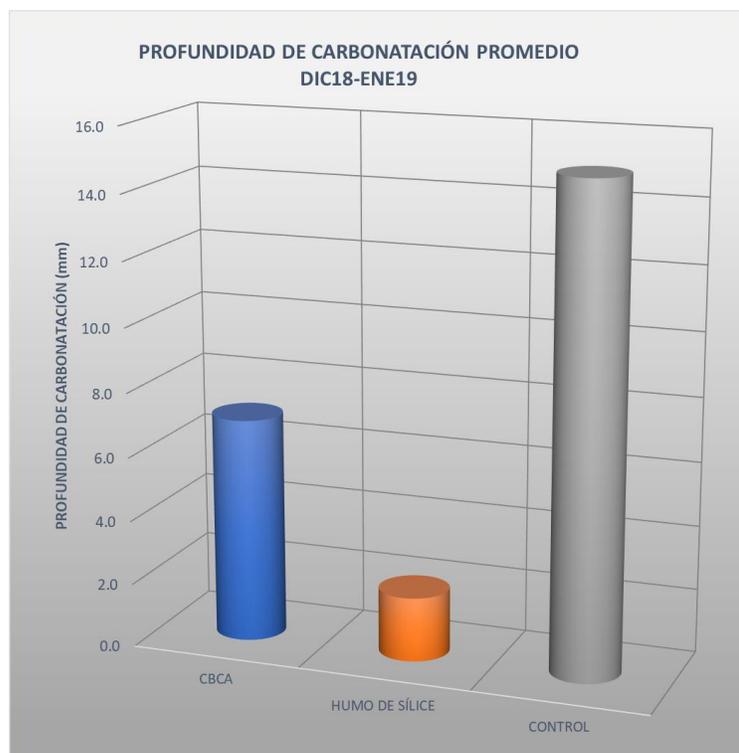


Figura 4. 3 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre octubre 2018 – noviembre 2018

Como se puede observar en la figura 4.3 las tendencias de la profundidad de carbonatación se mantienen igual que el bimestre anterior, la probeta de HUMO DE SÍLICE es la que mejor resiste la carbonatación, con una muy marcada ventaja respecto a las otras dos mezclas, la mezcla de CBCA, resiste mejor que la mezcla de CONTROL la carbonatación, pero no tanto como la de HUMO DE SÍLICE.

Análisis a 6 Meses. Periodo agosto 2018 – enero 2019

Los resultados preliminares a la mitad del proyecto tienen resultados interesantes, se decidió poner en comparativa los avances del proyecto para notar el avance de los resultados. Los datos de las probetas localizadas en Boca Del Rio que se observan en la figura 4.4 y muestran el promedio de la profundidad de carbonatación desde el inicio del proyecto, definidos en el periodo agosto 2018 – enero 2019.

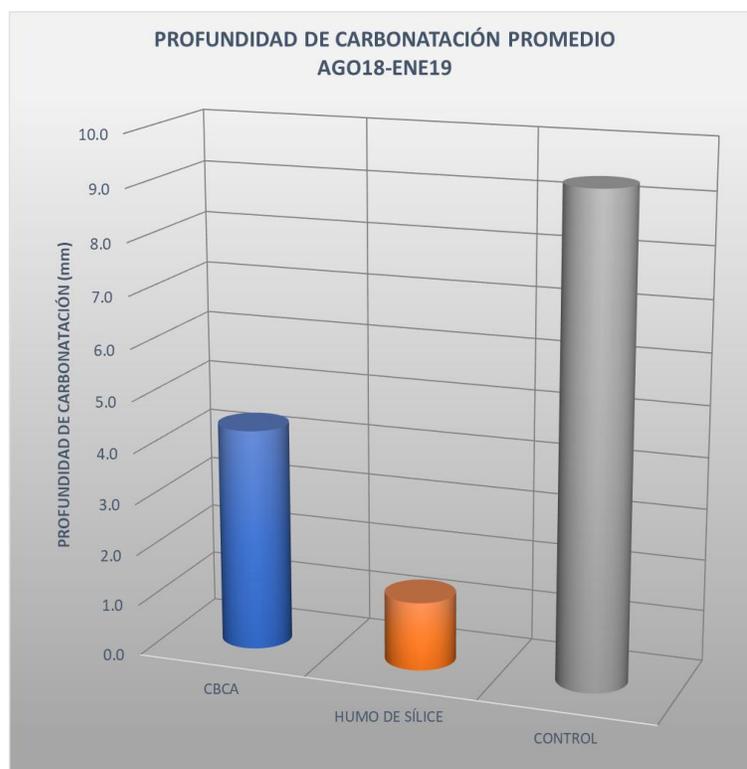


Figura 4. 4 Reporte de pruebas de carbonatación periodo agosto 2018 – enero 2019

En las probetas de CBCA se presenta una resistencia a la carbonatación a lo largo de la probeta, esto indica que el nivel de pH se mantiene constante en todo el cilindro de concreto, presentando un comportamiento similar a las probetas de control, aunque comparados con resultados de otras investigaciones, la resistencia a la carbonatación del concreto (control), se espera que decrezca con el paso del tiempo, mientras que la mezcla de CBCA va a desarrollar una mayor resistencia con el tiempo.

El desempeño de la mezcla de HUMO DE SÍLICE, es el que más llama la atención, pues presenta una resistencia mayor a la carbonatación desde las primeras semanas de vida y un crecimiento de la resistencia a la carbonatación en los primeros meses de elaboración del concreto, lo cual concuerda con investigaciones previas de otros autores, como Diana V. Vida, en 2014, donde podemos observar que el potencial de la mezcla de HUMO DE SÍLICE se detona desde las primeras semanas de elaboración de la probeta, y aumenta su resistencia a la carbonatación en los primeros meses de exposición, mientras en la mezcla de control se detona inmediatamente después del curado y la exposición, para después disminuir a lo largo de la vida útil del concreto.

Periodo febrero 2019 – marzo 2019

Los resultados de la cuarta medición bimestral mantienen las tendencias de potencial de carbonatación de los ensayos anteriores, la mezcla más afectada por este efecto es la de concreto convencional, mientras que la mezcla de humo de sílice presenta el mejor desempeño de las 3 mezclas, marcando una tendencia a lo largo del periodo de captura de resultados.

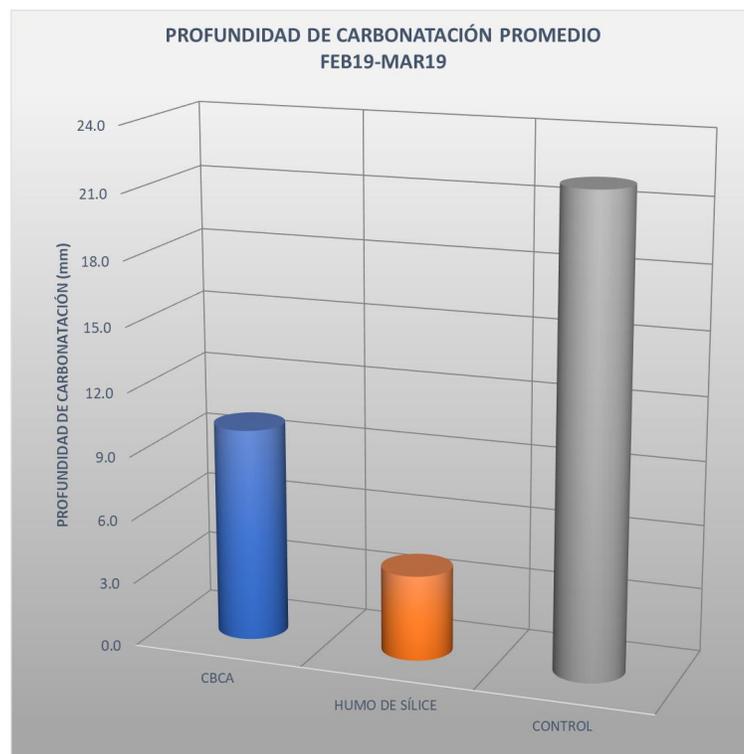


Figura 4. 5 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre Febrero-Marzo 2019

En la figura número 4.5 se observan claramente la evolución de las probetas; el espécimen de CBCA (Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar) presenta una carbonatación hasta los 10 mm, superior a la medición de 4 mm que presenta la probeta de humo de sílice, pero no tan marcada como la probeta de control.

Cabe recordar que en la figura se muestra una medición promedio de cada mezcla debido a que en cada ensaye de profundidad de carbonatación se toman mediciones en tres puntos de la probeta, superior, inferior y en el centro, para tener un control lo más detallado y exacto posible.

Periodo abril 2019 – mayo 2019

Para la quinta medición en el periodo abril – mayo del 2019, los resultados ya son los esperados, mejor desempeño de la mezcla con sustitución de humo de sílice, una media

en el desempeño señalada por la mezcla CBCA y un marcado deterioro en la mezcla de control, aunque se puede notar un aumento en la profundidad de carbonatación comparado con el promedio bimestral, lo anterior se puede comprobar en la figura 4.6 que a continuación se presenta.

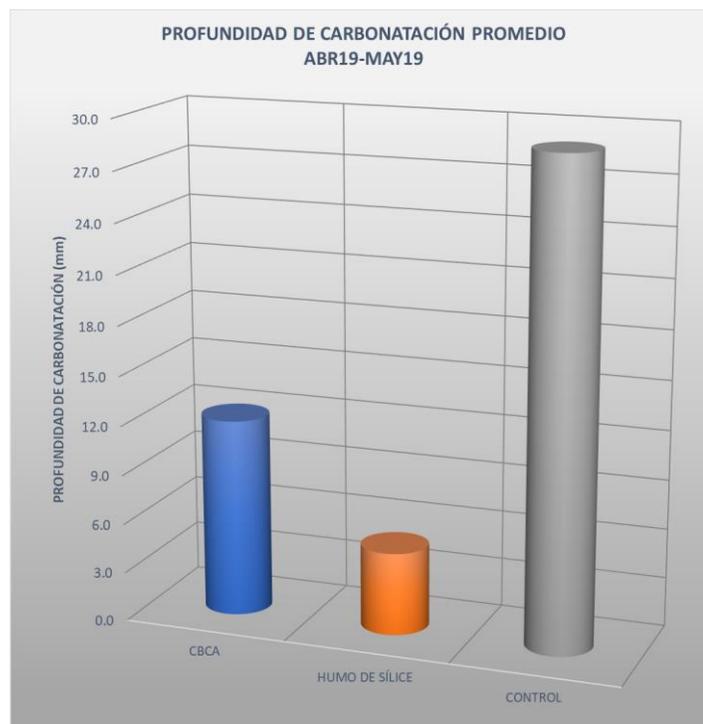


Figura 4. 6 Reporte de pruebas de carbonatación bimestre Abril-Mayo 2019

Para esta, la quinta medición ocurrió el registro de una patología tratada en la problemática de la presente investigación, pues al tomar las mediciones de la probeta de control, en la zona superior (que no está en contacto con el suelo), la probeta se carbonató por completo, hasta llegar al corazón del cilindro, de haber tenido acero de refuerzo, ya no tendría ninguna protección contra los cloruros y sulfatos del ambiente agresivo en el que se encuentran expuestos los cilindros, por lo que el proceso de corrosión y oxidación en el acero embebido daría inicio, y se comprometería sustancialmente la vida útil de la estructura, cosa que se pretende solucionar con la investigación.

Evolución de las probetas de CBCA en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

El comportamiento de la mezcla de CBCA es el esperado dentro de la investigación y comparado con investigaciones externas de otros autores, ha tenido un progresivo aumento en la profundidad de carbonatación, aunque no constante, debido a que, como veremos en el apartado dedicado a climatología, las condiciones climáticas que contribuyen a la carbonatación y al deterioro de las estructuras, varía en el periodo de exposición, teniendo bimestres en los que el análisis era diferente con el promedio esperado dentro de la captura de resultados.

Por parte de la presente investigación, puede observarse en la figura 4.7 que en los primeros meses de exposición, las probetas presentaban un ligera resistencia a la carbonatación, pues apenas era un par de milímetros lo que lograba carbonatarse, para concluir con 12 mm de carbonatación, esto quiere decir, que la mezcla podría funcionar así tal cual, pues en el reglamento de construcciones para el Distrito Federal, y en el manual de durabilidad de estructuras de concreto en México (IMCYC), se establece que los recubrimientos mínimos para el acero de refuerzo, en ambientes agresivos, como lo es una zona urbano-marina, son de 5 cm.

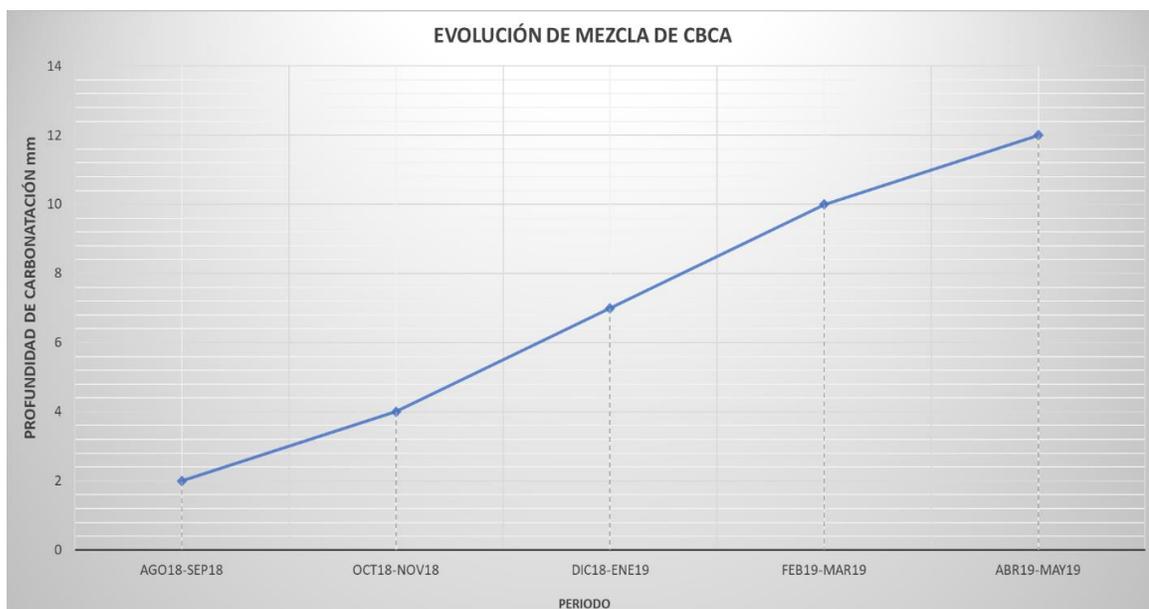


Figura 4. 7 Evolución de las probetas de CBCA en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Evolución de las probetas de HUMO DE SÍLICE en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

El desempeño de la mezcla de HUMO DE SÍLICE se observa en la figura 4.8, ya es un hecho dentro de la captura de resultados que es la mezcla que mejor se desempeña en la investigación.

Desde los primeros meses de exposición marcó la tendencia que se seguiría a lo largo de la fase de exposición, mantuvo una resistencia mayor a las otras dos mezclas en cada una de las evaluaciones de profundidad de carbonatación.

Y es que tiene un desempeño increíblemente mejor que las demás mezclas, pues en los primeros 4 meses de exposición se mantuvo prácticamente igual, apenas era apreciable la carbonatación en los especímenes, con el paso del tiempo su deterioro se hizo notorio, pero nunca fue tan marcado como en las probetas de control.



Figura 4. 8 Evolución de las probetas de Humo de Sílice en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Ya se analizarán las condiciones climatológicas, pero aquí se puede apreciar que en los bimestres de febrero 2019 – marzo 2019 y abril 2019 – mayo 2019, se nota un ligero incremento en la profundidad de carbonatación, debido a que en los meses de marzo y abril las condiciones climáticas como la humedad o las emisiones de CO₂ favorecen la impregnación de estas partículas en la superficie de las probetas y su introducción en los poros de estas.

Evolución de las probetas de CONTROL en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Los resultados obtenidos en la mezcla de control, que recordemos son especímenes elaborados con concreto convencional, son los esperados, pues es bien conocido dentro de la industria de la construcción el daño por la carbonatación a las estructuras de concreto, mayormente, en un ambiente agresivo como lo es la zona costera.

Desde el inicio del periodo de exposición, la mezcla de control tuvo un deterioro mayor que las mezclas experimentales y la tendencia se mantuvo a lo largo de la captura de datos, pues bimestre tras bimestre en las pruebas de carbonatación, las probetas de control eran las más afectadas y por mucho.

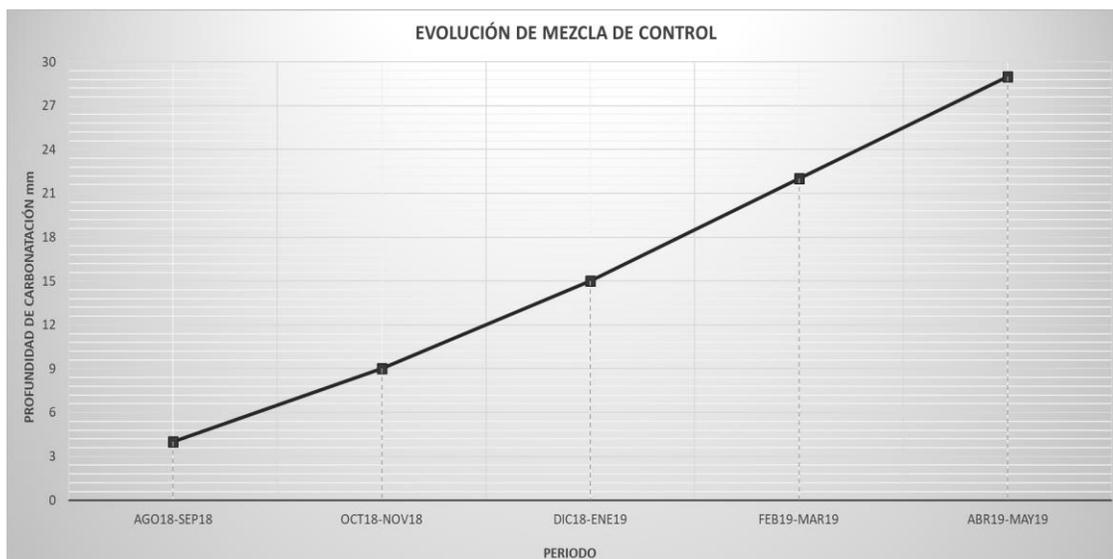


Figura 4. 9 Evolución de las probetas de Control en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Hasta llegar al punto donde, como se observa en la figura 4.9, en el periodo abril 2019 – mayo 2019, la carbonatación alcanzó un punto crítico, pues la parte superior del espécimen (que no está en contacto con el suelo), se carbonató por completo llegando al corazón del espécimen.

En una estructura real, aun no se tendrían afectaciones en el acero de refuerzo, pues como se ha mencionado, los espesores mínimos para el recubrimiento del acero embebido son de 5 cm, claro está, si se construye de acuerdo a la normativa vigente, de no ser así, bueno, pues e riesgo es mayor.

Evolución de las probetas de experimentación en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Después del periodo de exposición ambiental de los especímenes, y recolección de datos, al analizar el comportamiento de las tres mezclas juntas, es fácil percatarse del desempeño de las mismas y compararlo con las otras, pues como se estableció en la matriz de experimentación, la mezcla de control iba a servir como punto de partida y como comparación de las otras dos mezclas con las cuales se va a experimentar.

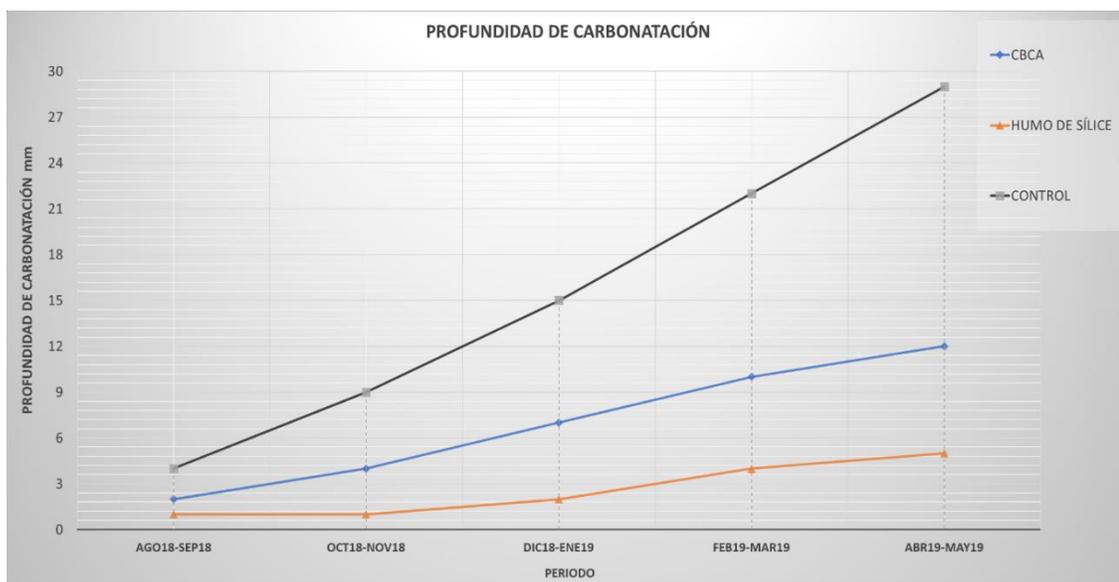


Figura 4. 10 Evolución de las probetas de CBCA, Humo de Sílice y Control en el periodo agosto 2018 – mayo 2019

Después de observar la gráfica de la figura 4.10 es evidente que la mezcla de control es la más afectada, y la mezcla de humo de sílice es la que mejor se desempeña, mientras que la mezcla de CBCA se mantiene en una media.

Ahora hay que analizar los distintos parámetros climáticos, para establecer una relación entre el fenómeno de la carbonatación y el cambio climático.

IV.I.II Pronóstico de velocidad de carbonatación

Los resultados que tenemos son a corto plazo, apenas 1 año de exposición, para obtener datos a medio y largo plazo es necesario hacer uso de la siguiente ecuación, la cual relaciona la edad del concreto con la profundidad de carbonatación para obtener un factor K, necesario para realizar una proyección de años, y calcular así la velocidad de carbonatación en un concreto.

$$X_{co2} = K_{co2} \sqrt{t}$$

Ecuación 4. 1 Profundidad de carbonatación (mm)

X_{co2} = Profundidad de la carbonatación, mm

K_{co2} = Constante de carbonatación, mm. año-05

t = tiempo en meses

$$K_{co2} =; t = \left(\frac{e_c}{K_{co2}} \right)^2$$

Ecuación 4. 2 Velocidad de Carbonatación

Tabla 4. 1 Pronóstico de carbonatación

TIPO DE MUESTRA	DATOS DEL ESPECIMEN		DATOS DEL ENSAYE			PRONÓSTICO (cm)		
	DIAMETRO (cm)	EDAD "t" (años)	vt	PROF. DE CARBONATACION N (mm)	FACTOR K (años)	2	3	5
CBCA	10.50	0.83	0.91	7.00	7.67	0.07	0.15	0.43
MICROSÍLICE	10.50	0.83	0.91	2.60	2.85	0.49	1.11	3.08
CONTROL	10.50	0.83	0.91	15.80	17.31	0.01	0.03	0.08

Con los resultados obtenidos hasta el momento es posible realizar un pronóstico tentativo del desempeño a mediano y largo plazo de las probetas de estudio y por consiguiente de los concretos con los que estamos experimentando, mediante una relación de la edad de las probetas con la profundidad de carbonatación. Los resultados esperados se muestran en la siguiente gráfica.

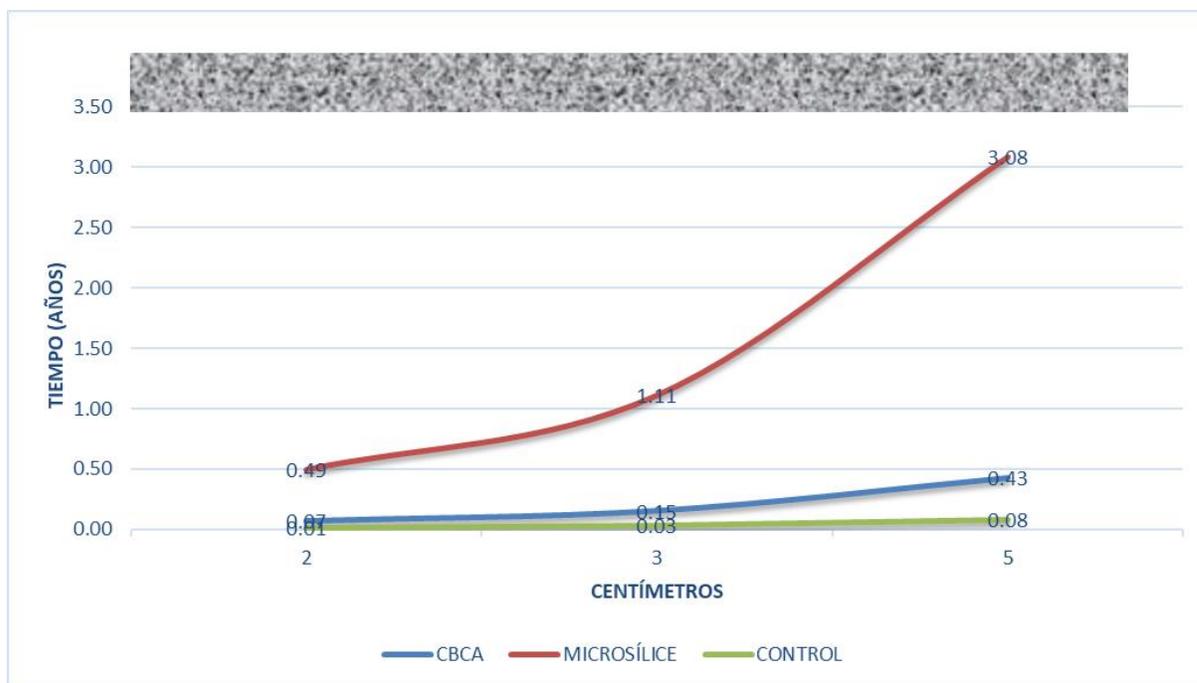


Figura 4. 11 Velocidad de Carbonatación

En la figura 4.11 podemos observar la velocidad de la carbonatación en las tres mezclas que la matriz de experimentación propone comparar, y los resultados obtenidos tras realizar este pronóstico, son claros, a un mediano plazo que comprende un periodo que va desde el primer año hasta los 2.2 años de vida útil del concreto.

La mezcla de CBCA, que como recordamos tiene un aditivo natural, la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar, tiene un desempeño ligeramente mejor que el del concreto simple (control), pues desde las primeras semanas de exposición de la probeta, presentaba un

mejor potencial para resistir la carbonatación, lo cual fue comprobado en la gráfica en la Tabla 4.1, de velocidad de carbonatación, pues presenta el desempeño de las 3 mezclas.

La mezcla de control presenta un desempeño ya conocido dentro de la investigación, pues el concreto común, (sin ningún aditivo) presenta una resistencia mínima a la carbonatación en las primeras semanas, pero al paso de los primeros meses tiene un ligero aumento en cada mes, marcando una media en la gráfica.

Por último, la mezcla adicionada con HUMO DE SÍLICE (desecho de la industria metalúrgica) es la que mejor se desempeña de las tres mezclas con las que se experimenta en la presente investigación, desde el inicio de la exposición, en las primeras semanas, presentó una resistencia mayor a la carbonatación comparado siempre con las otras mezclas de la investigación, esto se debe principalmente al tamaño de las partículas, pues como menciona el sitio QuimiNet, en 2005: El tamaño promedio de partícula está por debajo de 0.5 micras, lo que significa que cada micro esfera es 100 veces más pequeña que un grano de cemento promedio. En una mezcla típica, con dosificación de 10% de Humo de Sílice, habrá entre 50, 000 y 100, 000 partículas de Humo de Sílice por grano de cemento. Es decir, al ser más pequeñas las partículas de Humo de Sílice, se reduce el tamaño de los poros en el concreto y prácticamente se eliminan las oquedades, lo cual dificulta el ingreso de CO_2 al concreto, aunado a esto, la excelente actividad puzolánica de la Humo de Sílice (recordemos que es del 90%), lo cual lo hace el sustituto perfecto del cemento.

El paso siguiente será aumentar los porcentajes de Humo de Sílice y disminuir los de cemento, para identificar hasta que porcentaje es factible sustituir el cemento convencional, con Humo de Sílice, y realizar una comparativa con la parte económica.

IV.I.III Parámetros climáticos

Para el desarrollo y la comparación de datos climáticos de la zona costera de Veracruz, se obtuvieron datos bimestrales a 5 años, incluyendo:

- Temperatura máxima, mínima y media anual.
- Velocidad del viento.
- Humedad
- Precipitación

Toda esta información recopilada de los portales del IPCC, Weather Spark y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

De los cuales, para la mejor comprensión de las mismas se presentarán en gráficas.

Temperatura

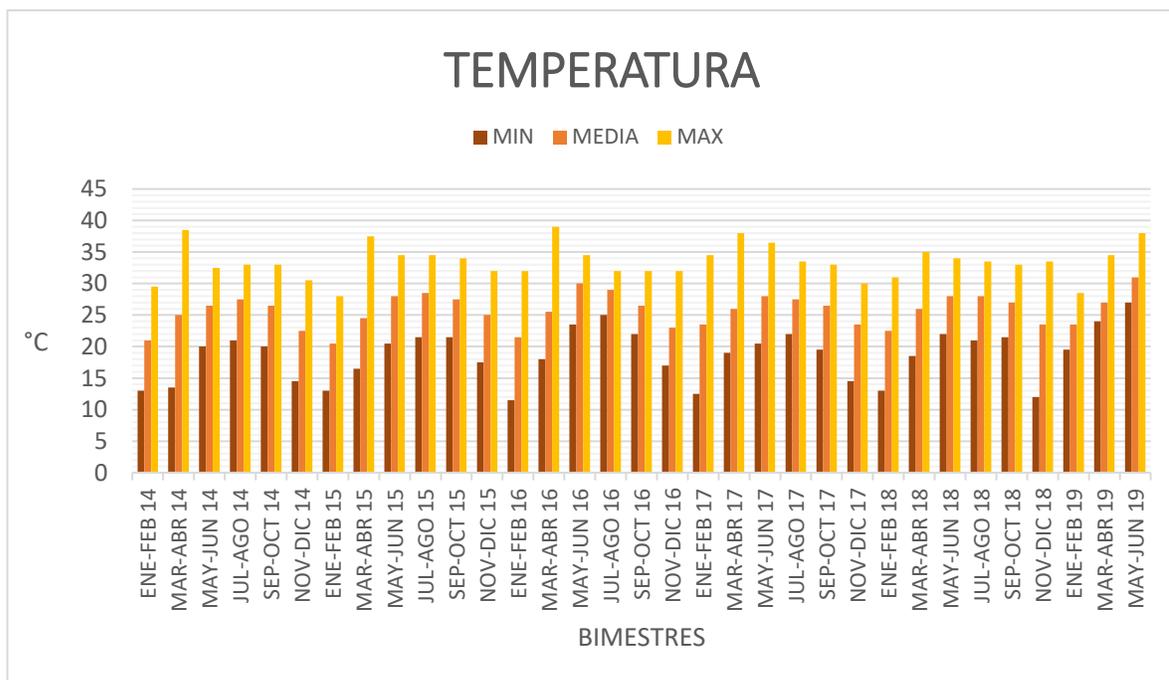


Figura 4. 12 Temperatura máxima, mínima y media de los últimos 5 años

Como se puede apreciar en la figura 4.12 el periodo con mayor índice de temperatura máxima fue en el bimestre Marzo-Abril de 2016 con un registro de 39°C, junto con el

mismo bimestre, pero del año 2014 y el mismo registro en centígrados, mientras que bimestres como lo son Marzo-Abril de 2015, Marzo-Abril de 2017 y Mayo-Junio de 2019 registran una temperatura de 38°C, igualando por un 1°C a la temperatura más alta. Para concluir con el análisis de temperatura alta, podemos agregar a periodos como Mayo-Junio de 2015, Julio-Agosto de 2015, Mayo-Junio de 2016, Marzo-Abril de 2018 y Marzo-Abril de 2019; comparten una temperatura de 35°C, posicionándose aún en las temperaturas más altas, mientras que auténticamente solo en bimestre de Mayo-Junio de 2017 posee la temperatura de 37°C.

Un caso que se podría considerar en relativa curioso es el periodo Enero-Febrero de 2017 donde se registra una temperatura máxima de 35°C, justo cuando en los 4 años distintos la temperatura máxima oscila entre los 33°C y los 29°C, siendo una temporada incluida en la estación Invernal.

Es así como el periodo de Marzo-Abril (de los últimos 5 años) se muestra con líder en altas temperaturas.

Respecto a las temperaturas bajas, el bimestre Enero- Febrero de 2016 y Noviembre-Diciembre de 2018 con una temperatura de 12°C, mientras que los periodos de Enero-Febrero de los años 2014, 2015, 2017 y 2018 están a 13°C, eso nos lleva a que el bimestre de Enero-Febrero se posiciona como el más frío, con todos sus años como líderes.

Ahora bien, hablando de la temperatura media Enero-Febrero de 2016 se encuentra como el periodo con menos temperatura con 13°C y el periodo de Mayo-Junio del presente año se muestra con mayor temperatura con 27°C.

Velocidad del viento

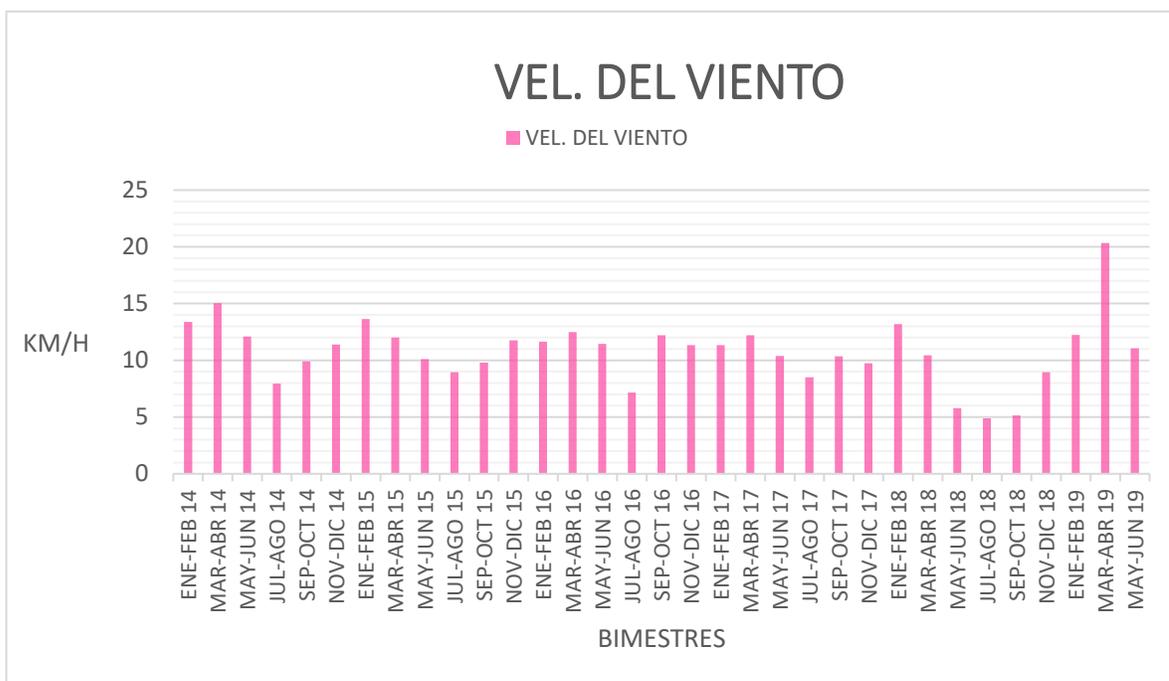


Figura 4. 13 Velocidad del viento promedio Veracruz

La velocidad del viento nos dará un índice importante relacionado con la velocidad a la que los cloruros se mueven a través del ambiente, esto interferirá con la velocidad de carbonatación.

Según la figura 4.13 indica que el bimestre con un índice alto de velocidad es de Marzo-Abril del presente año, con una velocidad promedio de 20 km/hr. Mientras que el periodo con menor movimiento es Julio-Agosto y Septiembre-Octubre ambos de 2018, con una velocidad de 5 km/hr.

La velocidad media registrada deberá ser entonces de 12.5 km/hr, y los periodos más cercanos a la media son Mayo-Junio de 2014, Marzo-Abril y Noviembre-Diciembre 2015, Enero-Febrero y Septiembre-Octubre de 2016, con Marzo-Abril de 2017 y Enero-Febrero de 2019 con una velocidad de 12 km/hr.

Así pues, considerando estos datos podemos definir a los periodos de Marzo-Abril como los más demandantes; tanto por la posición líder del registro de velocidad más alto, como la frecuencia presentada del mismo periodo en los demás año entre la velocidad media y a velocidad máxima.

Humedad

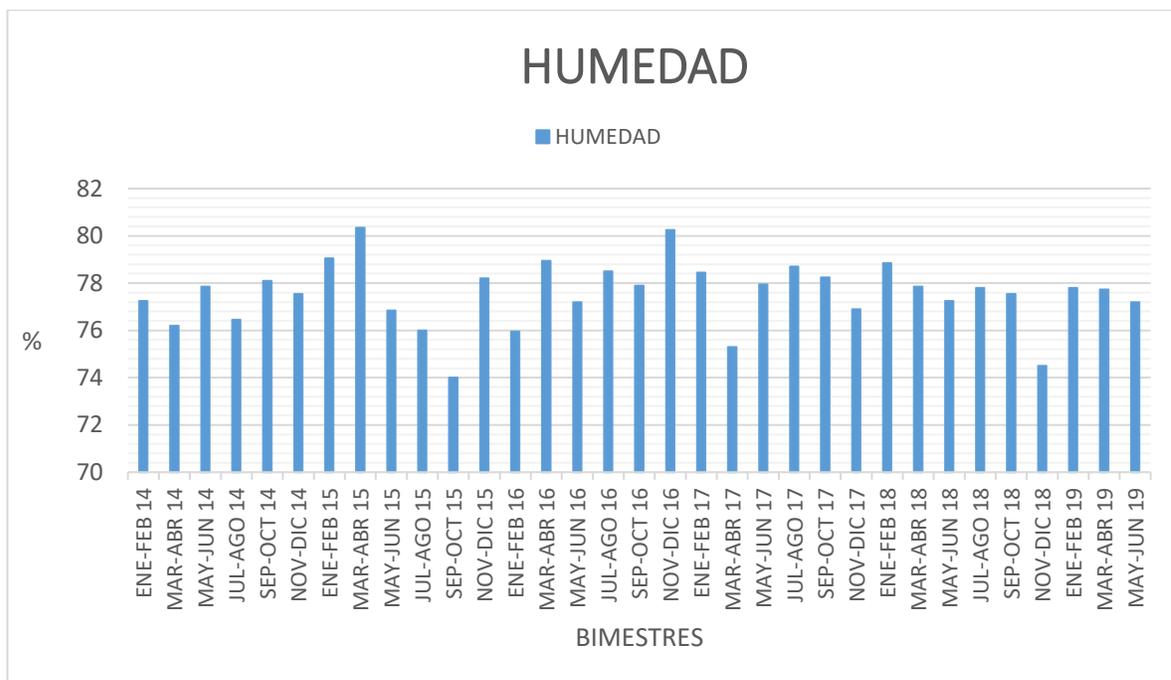


Figura 4. 14 Humedad relativa

La humedad relativa (Figura 4.14). presenta una condicional importante pues nos indicará la forma en la que el ambiente de la costa puede interferir en una estructura de concreto específicamente, como ya se ha mencionado se tiene que una pequeña comparativa acerca de la manera en la que el concreto trabaja en diferentes ambientes, resaltando los dos más importantes en el estado (costero, montañoso), como ya se apreció en la tabla 3.2, la humedad trasciende a un 100% en la costa, mientras que zonas montañosas solo tiene hasta un 35% como máxima de humedad. Así, tomando en cuenta que tenemos la zona con mayor humedad representativa, se ejerce el siguiente análisis.

Según la figura el porcentaje de humedad más alto se encuentra en el periodo de Marzo-Abril de 2015 y Noviembre- Diciembre de 2016 con un 80% de humedad. Mientras que el porcentaje más bajo se sitúa en Septiembre- Octubre de 2015 con un 74%.

Nuevamente el periodo de Marzo-Abril se encuentra con posiciones muy altas, donde, fuera del año 2015, el resto también cuenta con porcentajes que oscilan entre los 75 y 79

Precipitación

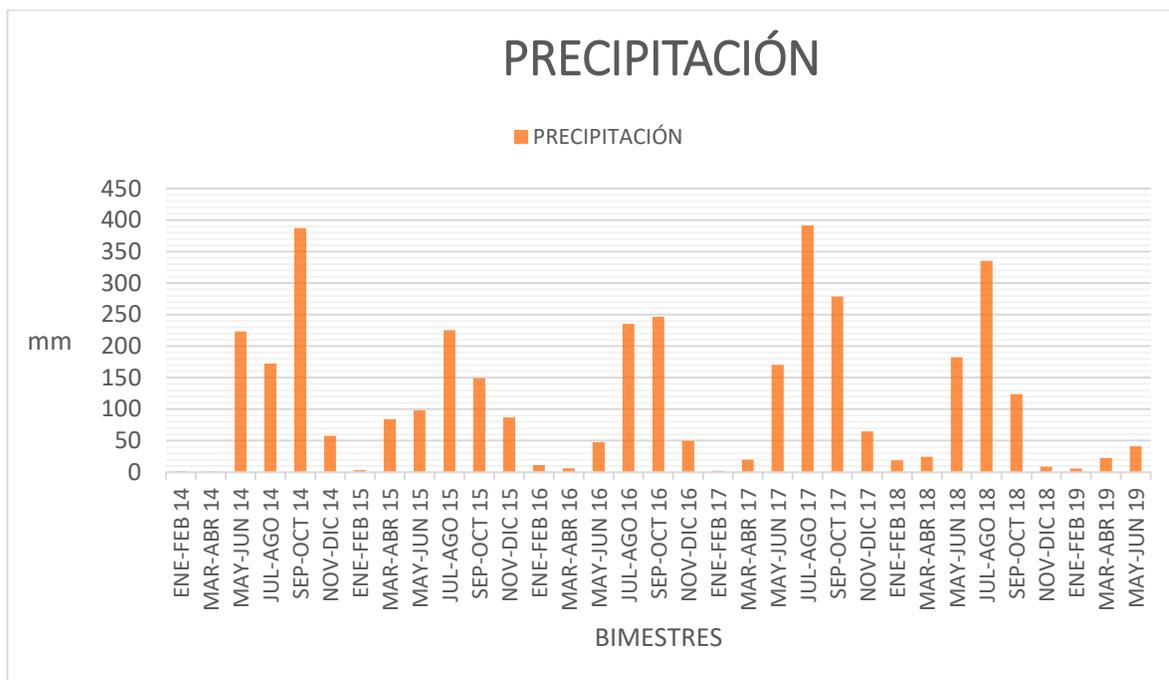


Figura 4. 15 Precipitación media anual

La precipitación se conjuga con humedad para una producción mayor de cloruros y la velocidad del viento es participe en la reproducción de estos, así como la temperatura. Así bien, entonces tenemos datos a 5 años donde la precipitación, como se muestra en la figura 4.15, provoca periodos de escasas, donde los datos no son relativos.

La precipitación se mide en mm, y en base a esto reconocemos al bimestre de Julio Agosto de 2017, como el periodo con mayor precipitación con 391.28 mm por m². Mientras que el periodo con menor precipitación se encuentra en el año 2014 en Marzo-Abril con 1.40 mm por m².

Sin embargo, un dato interesante es que el bimestre de Septiembre Octubre del mismo año (2014) posee una precipitación de 387.48 mm por m², teniendo la segunda mayor precipitación registrada en 5 años, lo que indicaría un cambio radical en un lapso de 2 meses de intermedio. La precipitación media se encuentra en el año 2018 en el periodo Mayo-Junio con 182.62 mm por m²

Niveles de dióxido de azufre y dióxido de carbono

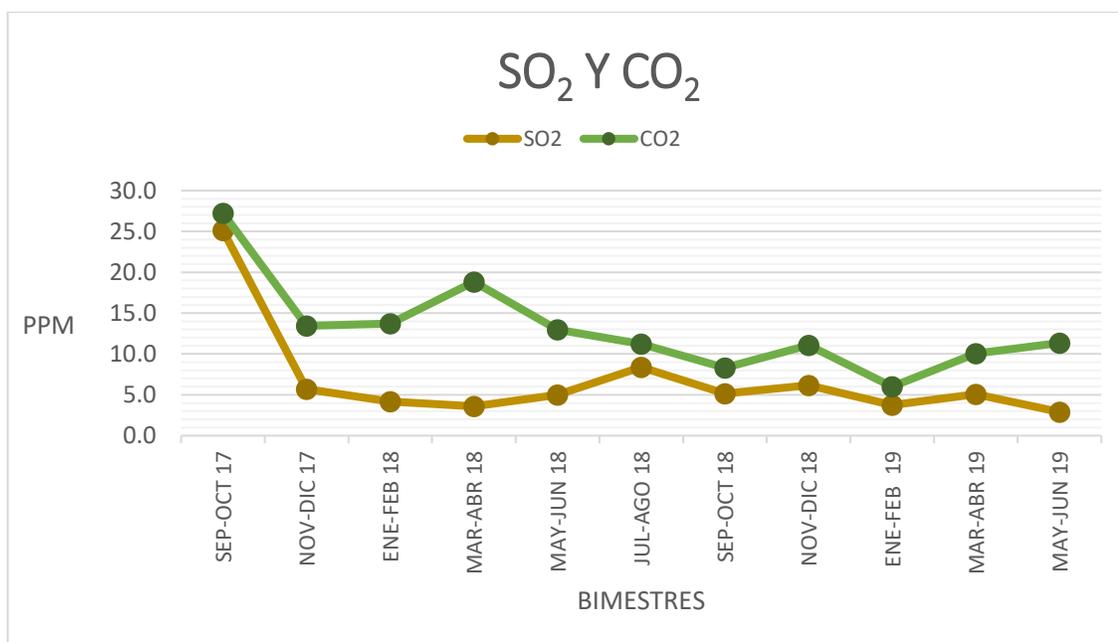


Figura 4. 16 Niveles de SO₂ y CO₂

Según datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero no hay registro de datos del periodo previo a Julio del 2017, así pues se trabajará con los registros presentados de Julio de 2017 a la fecha, sin embargo, también se presentan situaciones donde algunos días de los meses donde sí hay registro presentó un nivel de 0 o simplemente no se capturó.

Como se muestra en la figura 4.16 fue en el mes de Julio donde los niveles de ambos gases estaban por arriba de 25.1 ppm para SO₂ y 27.3 ppm para CO₂, siendo los de mayor valor, por lo cual se podría predecir que en meses anteriores se tuvieron medidas que prevalecían en niveles altos.

Si se hace enfoque a solo el CO₂ podemos notar un cambio radical a lo largo de los dos años y medio registrado, donde las fechas más altas se encuentran en los bimestres de Julio-Agosto de 2017, Enero-Febrero y Septiembre Octubre de 2018 y Mayo-Junio de 2019, con 27.3, 18.8, 11.11 y 14.5 respectivamente.

IV.I.IV Análisis conjugado de factores climáticos.

Para el análisis completo de todos datos recopilados con respecto a los parámetros presentados simplemente se resaltarán las gráficas del clima conjugadas a los parámetros de SO₂ y CO₂, así como carbonatación.

Temperatura combinada con CO₂ y SO₂

Para poder tener una comparativa de los parámetros climáticos y poder correlacionarlos con los resultados obtenidos por parte de la carbonatación, es necesario hacer uso de la combinación de gráficos de los parámetros climatológicos más ligados al fenómeno de la carbonatación, para la imagen de la figura 4.17, se observan los niveles de emisiones de CO₂ y SO₂, en periodos bimestrales, como es común agrupar los datos en la investigación para analizarlos de manera detallada.

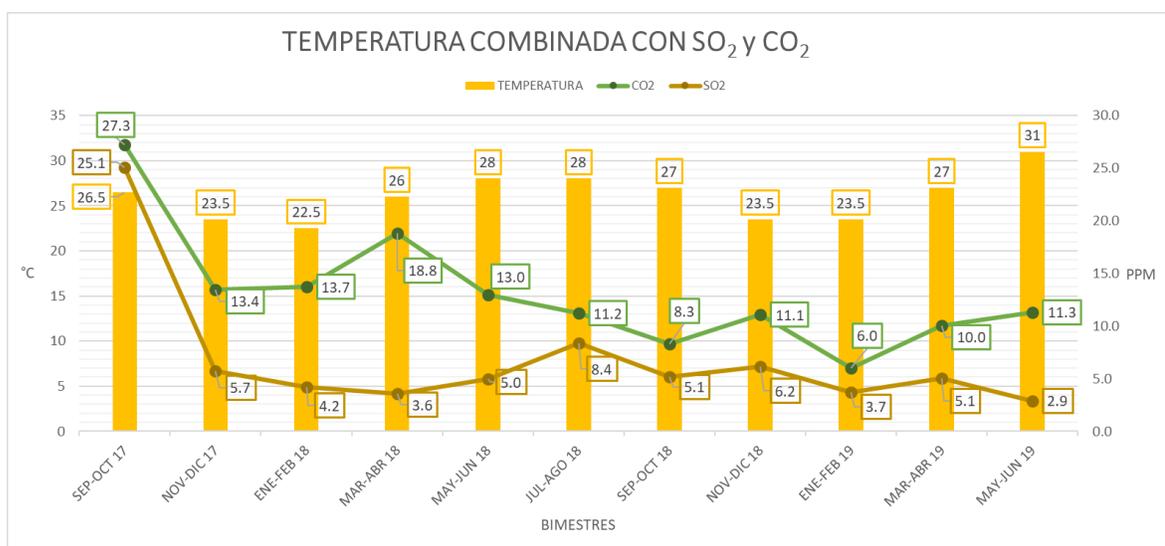


Figura 4. 17 Temperatura combinada con CO₂ y SO₂

A simple vista se pueden obtener inferencias empíricas, como lo son temporadas de calor y frío, marcadas por las estaciones del año, pues en la investigación, se abarcan las cuatro estaciones del año, aunque la ciudad donde se exponen los especímenes tiene un clima caluroso, las temperaturas mínimas no bajan de 22°C, y pudiendo alcanzar un pico elevado como ocurre en el periodo de mayo - junio que se registró una temperatura promedio en la estación de 31°C.

Así mismo, aunque no tan marcadas, se observa un patrón en las líneas de CO_2 y SO_2 , temporadas de mayor emisión, y algunas, por debajo del promedio, esto se observa que coincide con las temporadas vacacionales, pues hay que recordar que la ciudad donde se encuentra la estación de monitoreo es un atractivo turístico, por lo que en temporadas vacacionales el afluente vehicular es mayor.

También se observa que los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero mantienen una relación entre sí, pues cuando las emisiones de CO_2 disminuyen, de la misma manera decrecen las emisiones de SO_2 .

Se continuará analizando la correlación que existe entre los parámetros climatológicos, para finalizar con una correlación con los datos obtenidos de la medición de carbonatación.

Humedad combinada con SO₂ y CO₂

La humedad es uno de los principales factores climáticos que intervienen en el proceso de carbonatación, recordemos lo establecido en el marco teórico de la presente investigación, la humedad relativa en el ambiente debe oscilar entre el 50% y 80%, para que los cloruros puedan disolverse y penetrar entre los poros del concreto endurecido.

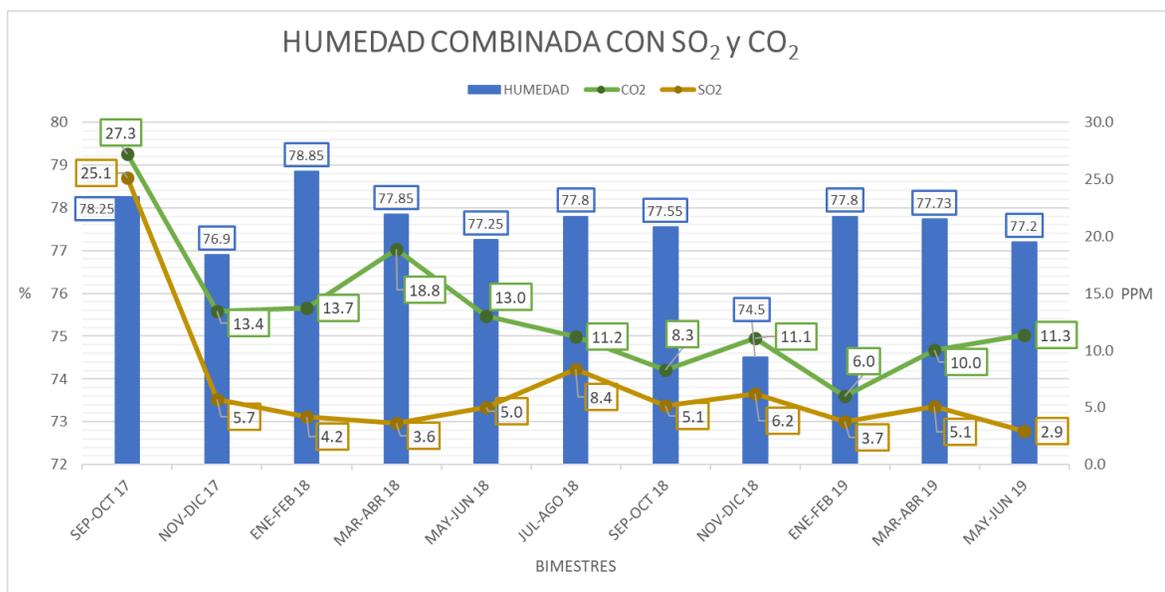


Figura 4. 18 Humedad combinada con SO₂ y CO₂

En la figura 4.18 se puede observar la relación de la humedad con los principales GEI que contribuyen al proceso de carbonatación, también se observa un patrón marcado a lo largo del año de exposición, pues en la ciudad donde se encuentra la estación de control, las temporadas climáticas son muy marcadas, en el clima de la zona se distinguen mas bien 3 temporadas al año, no tanto las 4 estaciones del año, sino una temporada de lluvias, temporada de calor y temporada de huracanes y frentes fríos, como se dijo en la metodología.

Cabe señalar que, en todo el año de exposición, la humedad siempre se mantuvo dentro del parámetro establecido para que ocurra la carbonatación, por esta razón que en cada medición bimestral de carbonatación se tuviera un aumento considerable en la medición, en comparación con el bimestre anterior.

Velocidad de viento combinada con SO₂ y CO₂

La velocidad y dirección del viento también es de importancia en la investigación, pues con estos parámetros, podemos calcular el desgaste por fricción en las caras del espécimen, es decir, como los especímenes se encuentran en una zona costera, el viento acarrea partículas de arena, las cuales se impactan en los especímenes, provocando un desgaste, que facilita la entrada de partículas al interior del cilindro.

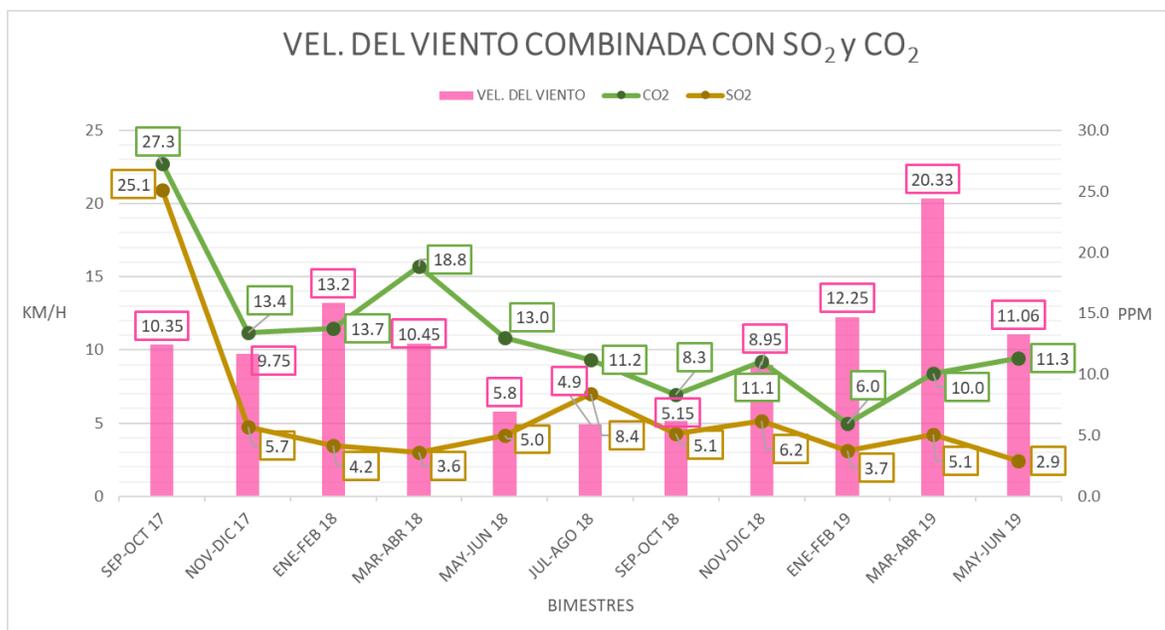


Figura 4. 19 Velocidad de viento combinada con SO₂ y CO₂

En la figura 4.19 se observa el patrón ya establecido de las emisiones de GEI, aunque pareciera que la velocidad del viento no aporta demasiado al gráfico, sus datos son interesantes, pues tiene picos elevados, por ejemplo, el periodo marzo-abril- del 2019, que se registró una velocidad promedio de 20.33 km/hr, corroborando datos anteriores, pues coincide con mediciones por encima del promedio por parte de la carbonatación, esto quiere decir que la velocidad del viento también influye en el desgaste de las probetas.

De esta manera, se puede establecer que la velocidad del viento, tanto como su dirección también influyen en la impregnación de cloruros en la superficie de los especímenes, y coadyuvan en el fenómeno de carbonatación.

Precipitación combinada con SO₂ y CO₂

La precipitación es uno de los factores climáticos que nos ayuda a disminuir los efectos de la carbonatación, pues si la humedad es relativamente alta, se produce precipitación, y la precipitación limpia la superficie de los especímenes de cloruros y sulfatos que aún no se introducen en los poros del concreto.

Así mismo, en la figura 4.20 se puede observar algunos picos elevados, principalmente en las marcadas temporadas de lluvias y torrenciales, llegando a precipitarse más de 335 mm de lluvia en promedio en el periodo de julio – agosto de 2018, aunque no es posible establecer su relación con los resultados de la presente investigación, pues apenas se comenzaban a recabar datos del bimestre agosto – septiembre de 2018, por lo que sería apresurado sacar conclusiones de meses anteriores.

También podemos observar que lo que va del año en curso, ha sido mayor la temporada de estiaje, pues no se comparan los mm de precipitación del 2019 con los registrados en el 2018, siendo el periodo con menos lluvias en enero – febrero de 2019, en lo que va del periodo de observación.

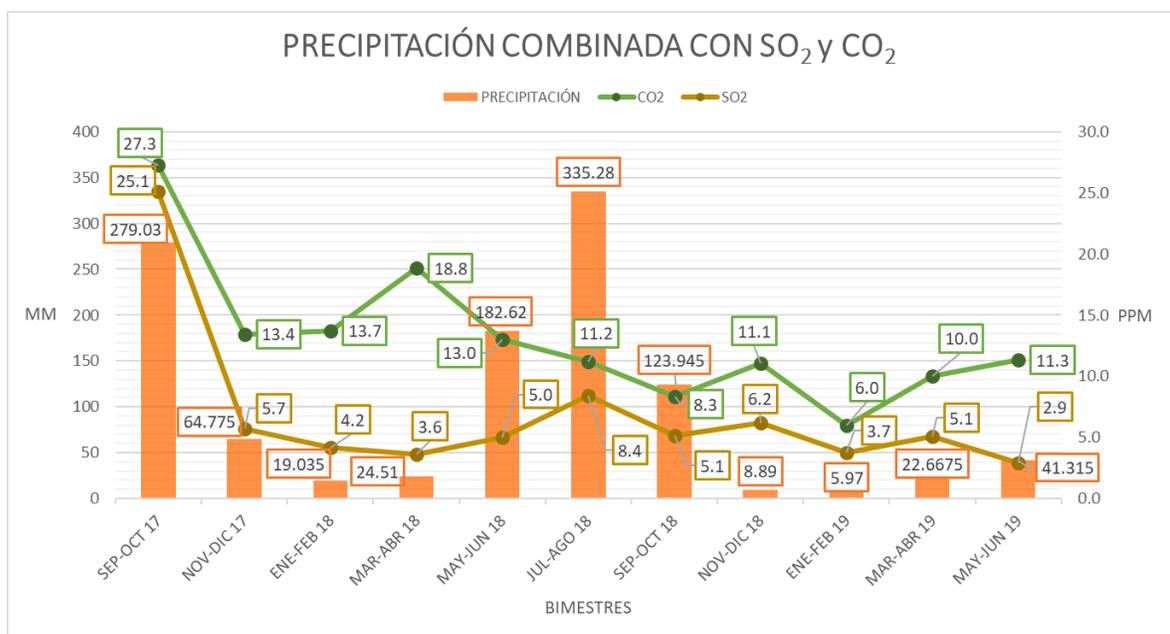


Figura 4. 20 Precipitación combinada con SO₂ y CO₂

IV.I.V Análisis conjugado de factores climáticos con carbonatación.

Profundidad de carbonatación combinada con Temperatura

La relación entre la temperatura ambiental y la profundidad de carbonatación es menos significativa que la humedad, es tan mínima, que no se podría establecer que la temperatura influye en la carbonatación directamente.

La temperatura en la figura 4.21 se observa que mantiene un patrón, con temperaturas bajas en los meses de diciembre, enero y febrero, mientras que el resto del año es elevado, alcanzando en algunos puntos los 28°C en el mes de agosto, que es el mes más cálido en el periodo de observación.

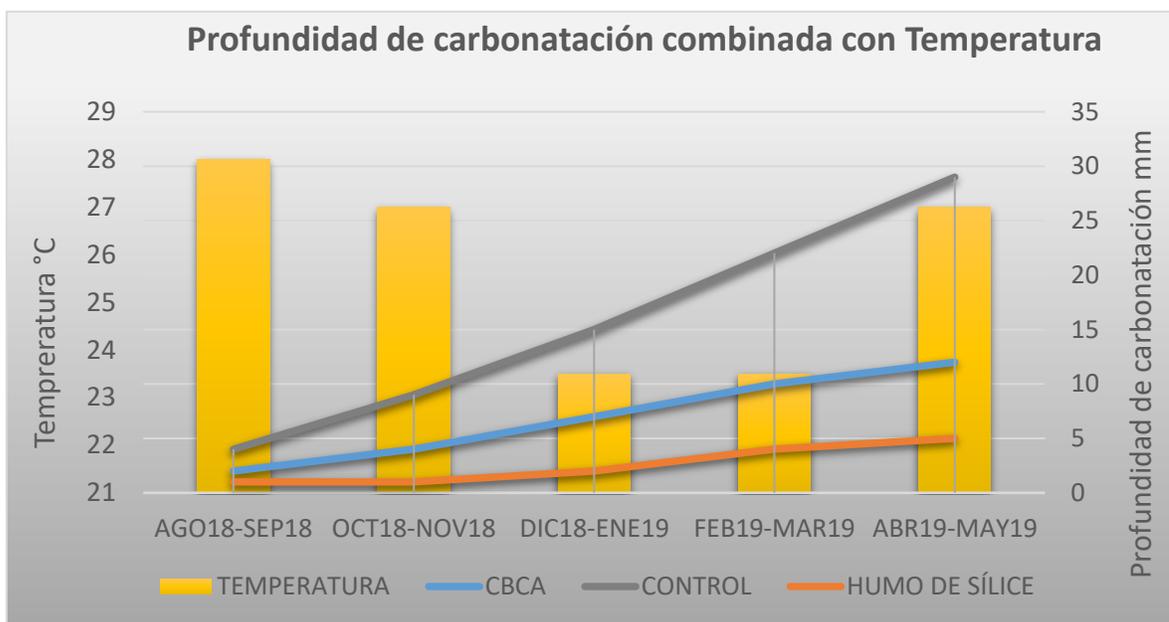


Figura 4. 21 Profundidad de carbonatación combinada con Temperatura

Profundidad de carbonatación combinada con Humedad

La humedad como se mencionó en la sección de parámetros climáticos es el factor ambiental que está relacionado de manera directa con el fenómeno de carbonatación, pues se debe mantener un nivel entre el 50% y el 80% de humedad en el ambiente para que puedan introducirse los cloruros en los poros del concreto.

En la figura 4.22 se puede observar la relación entre estos factores de investigación, hay picos elevados de altos índices de humedad, como en el bimestre octubre – noviembre de 2018, donde el porcentaje de humedad alcanzó un 80%.

Lo más sobresaliente de la gráfica anterior es que en todo el periodo de observación de los datos climatológicos, el porcentaje de humedad siempre se mantuvo dentro del parámetro en el cual la carbonatación es efectiva.

Esto corrobora datos obtenidos en la medición de carbonatación, pues en cada medición bimestral se tenían mediciones mayores a la respectiva anterior, ahora se entiende, que es porque los niveles de humedad eran óptimos para la penetración de cloruros en los poros del concreto.

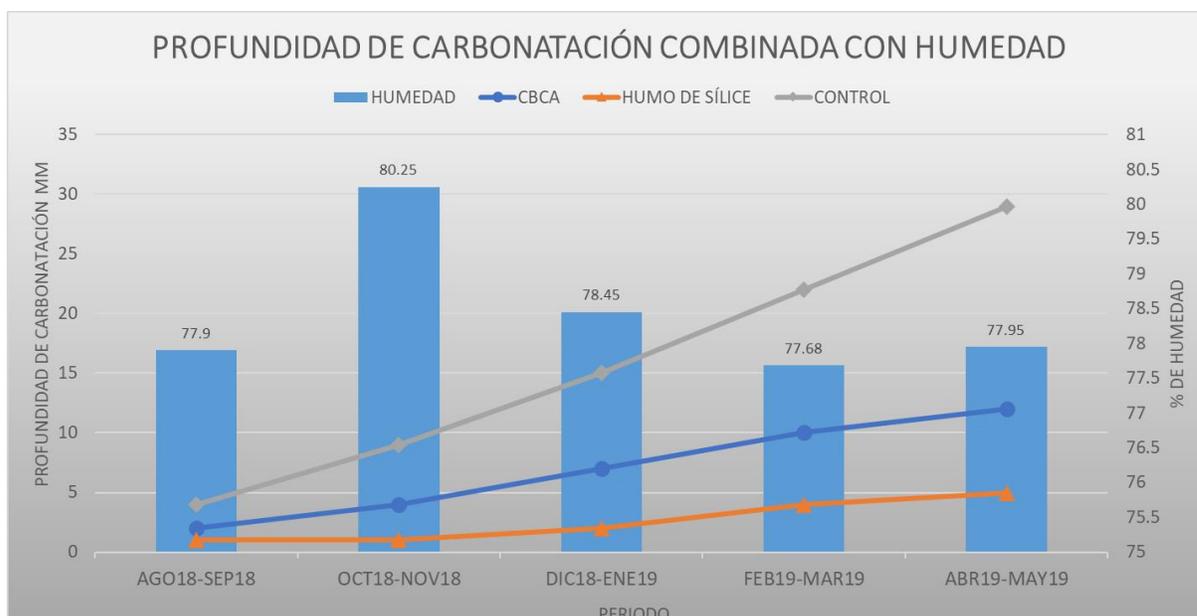


Figura 4. 22 Profundidad de carbonatación combinada con Humedad

Profundidad de carbonatación combinada con velocidad. de viento

La velocidad del viento desgasta la capa superficial de los especímenes facilitando la entrada de cloruros, por lo que relacionar la velocidad del viento con los resultados de carbonatación es indispensable para los efectos de esta investigación.

Las temporadas de ciclones y huracanes es lo que afecta las velocidades del viento, lo cual se puede observar en la figura 4.23 en el bimestre abril – mayo de 2019, la velocidad promedio registrada fue de casi 20 km por hora.

Los bimestres donde se registra una disminución en la carbonatación comparado con el promedio, es igualmente donde la velocidad del viento fue menor, dicho lo anterior, se puede establecer que la velocidad del viento influye de manera directa en el fenómeno de carbonatación

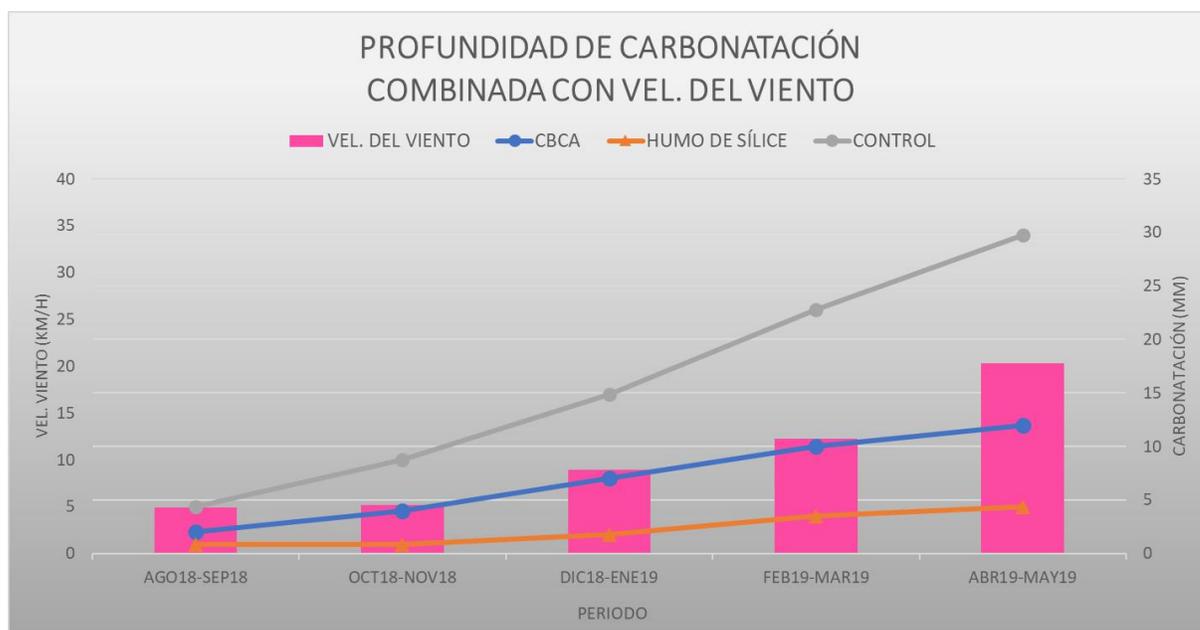


Figura 4. 23 Profundidad de carbonatación combinada con velocidad de viento

Profundidad de carbonatación combinada con Precipitación

La correcta cantidad de precipitación puede ser benéfica para los concretos sometidos a exposición ambiental, pues ayudan a limpiar la superficie de los especímenes de los cloruros y partículas que aún no se introducen en los poros del concreto, de aquí la importancia de comparar los datos de carbonatación con la precipitación promedio.

En la figura 4.24 se puede observar la relación de la carbonatación con la precipitación, se observa claramente que en la temporada de lluvias es cuando abunda las precipitaciones torrenciales, como lo es el periodo de agosto – septiembre de cada año donde se alcanzaron los 340 mm de precipitación promedio, pues son los meses más lluviosos en la región.

Las mediciones de carbonatación coinciden con las mediciones de precipitación, es decir, mantienen una estrecha relación, pues cuando baja la cantidad de lluvia, la carbonatación aumenta respecto al promedio general, dependiendo del bimestre que se observe, por ejemplo, en febrero – marzo de 2019 se registró la menor cantidad de lluvia, y la carbonatación registró un aumento en las mediciones, respecto al promedio de las mediciones generales

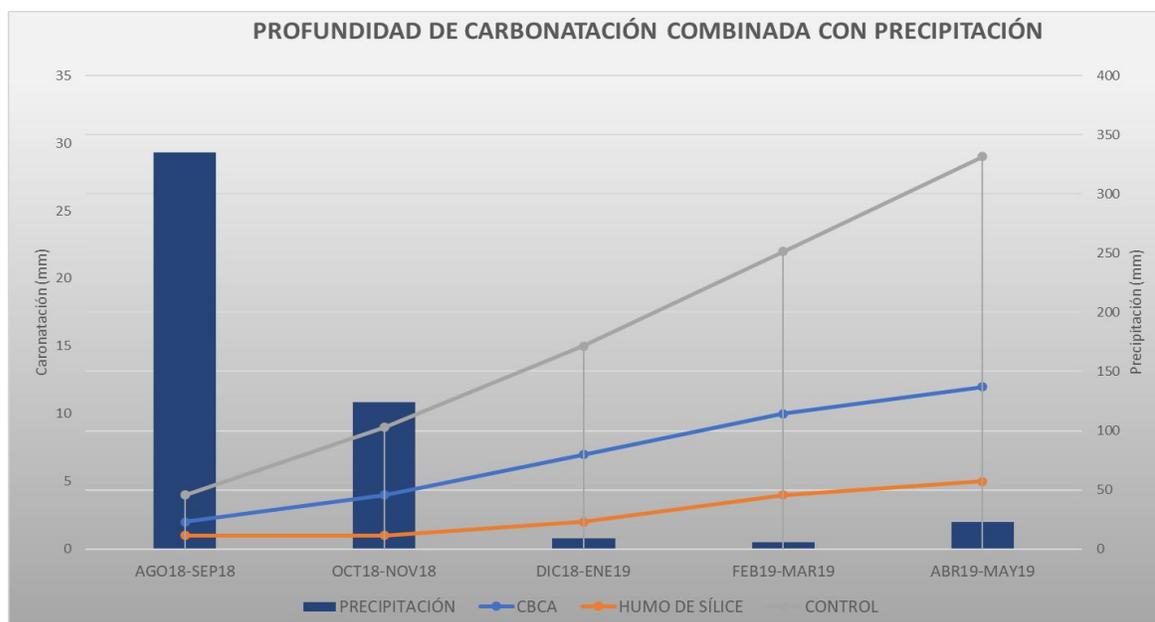


Figura 4. 24 Profundidad de carbonatación combinada con Precipitación

Profundidad de carbonatación combinada con SO₂ y CO₂

Las emisiones de GEI son la principal causa de la carbonatación, pues al introducirse en los poros del concreto, provocan su despasivación, bajando los niveles de pH y desencadenando una serie de patologías en el concreto que culminan con la disminución de la vida útil de las estructuras de concreto.

Puede observarse en la figura 4.25 una estrecha relación entre las emisiones de SO₂ y CO₂ y la carbonatación, en los picos como en el bimestre diciembre 2018 – enero 2019, las emisiones de GEI aumentó con lo registrado en bimestres anteriores, y se aprecia que las mediciones de carbonatación aumentaron también, corroborando datos donde se menciona la relación entre ambos factores.

Por último, se puede establecer que al final del periodo de recopilación de resultados, las probetas estaban demasiado desgastadas, después de meses de exposición ambiental por lo que la más mínima cantidad de SO₂ y CO₂ iba a penetrar fácilmente, pues la carbonatación en el concreto llegó hasta el corazón de la probeta, estado sano únicamente unos cm² del corazón del espécimen.

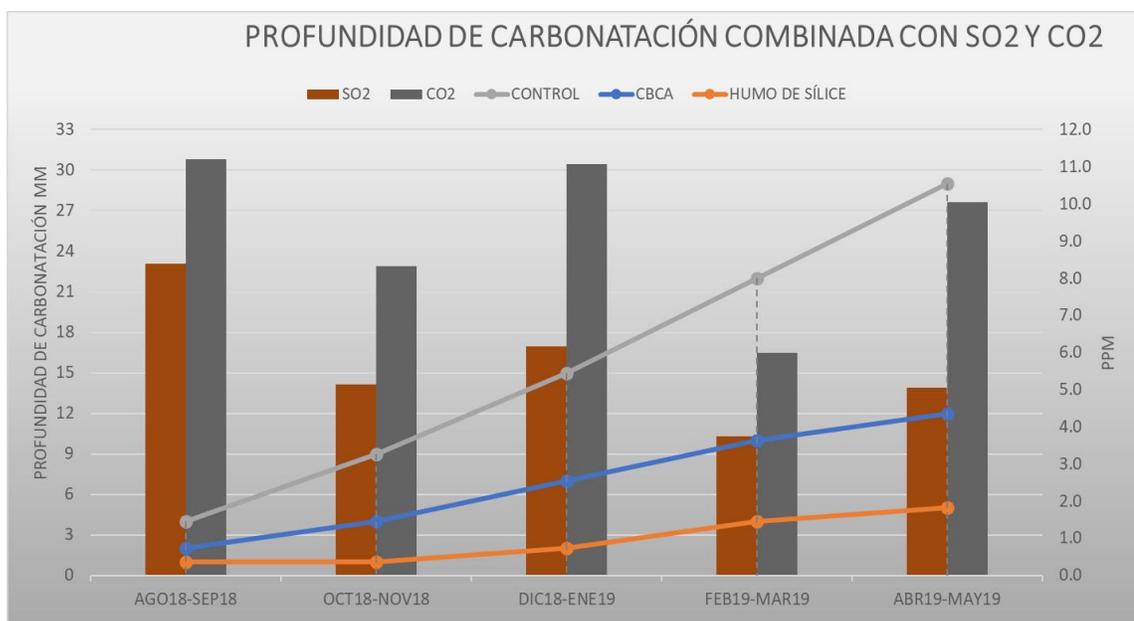


Figura 4. 25 Profundidad de carbonatación combinada con SO₂ y CO₂

Capítulo V

V.I CONCLUSIONES

Para el análisis final de la investigación desarrollada a lo largo del año investigativo, se necesita la conjugación de las variables empleadas a un principio de esta misma, así pues, tenemos:

- ✓ Gases de efecto Invernadero.
- ✓ Profundidad de carbonatación.
- ✓ Parámetros climáticos.

Los cuales fueron conjugados con valores de carbonatación resultantes bimestrales de las mezclas de

- ✓ CBCA
- ✓ Humo de Sílice
- ✓ Control

Según las gráficas presentadas con anterioridad, podemos empezar exponiendo la mezcla de Humo de Sílice como la mezcla que tiene mejor interacción con el ambiente, ante la presencia de los factores climáticos, mostrando una menor carbonatación ante los índices más altos de temperatura, humedad, velocidad del viento, así como la presencia de SO_2 y CO_2 .

Ésta podría posicionarse como el concreto sustentable más viable para ser una alternativa ante el cambio climático radical observado en los últimos 5 años, donde por consiguiente hay un ambiente con mayor impacto de agentes agresivos, ante el cual el Humo de sílice tiene el mejor desarrollo.

La mezcla de CBCA sí presenta un mejor avance contra la fórmula original del concreto, aunque, no fue la proyección que se esperaba considerando que se especulaba que llegaría a los mismos niveles que la mezcla de Humo de sílice. Sin embargo, sigue siendo un recurso más económico en adquisición, siendo este un punto a favor de los concretos modificados con CBCA, así bien, si se proyectara como alternativa a la producción del

concreto a nivel mundial se podría establecer una conexión medioambiental, donde los ingenios azucareros sean partícipes otorgando un recurso a la industria de la construcción y así se fomenta el uso de recursos agroindustriales, donde se reduce el consumo del cemento mientras se reciclan los desechos industriales.

El uso de residuos como sustitutos en el cemento y que alcancen las características de los concretos convencionales en cuanto a resistencia, resulta de suma importancia para el área ingenieril. Queda de manifiesto que al realizar concretos modificados como los evaluados en este estudio se reduce el impacto de explotación a las canteras de donde se extraen los agregados necesarios para ser introducidos al horno a altas temperaturas, con ello disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero. La contribución de este proyecto a la sustentabilidad se ve en la disminución del porcentaje del uso del cemento y así el desarrollo de infraestructura que cumpla las expectativas de la sociedad actual, también dejando conciencia de que la economía se verá mejorada al desarrollar concretos sustentables.

Tomando en cuenta el estado actual del clima, concluimos que la fórmula original del concreto convencional no tiene resistencia alguna, mientras que la mezcla de Concreto con un 20% de Humo de sílice es la alternativa más confiable (de las 3 analizadas) para sobrellevar el cambio climático y el ataque de cloruros pertenecientes a la zona costera de Veracruz. Sin embargo, con un contraste de factores económicos y medioambientales, la mezcla de Concreto con un 20% de CBCA puede llegar a ser una alternativa con mayor valor comercial. Mientras que el cambio climático se proyecta a cambios radicales a futuro, donde se precisará de una mejora en la fórmula original del concreto, evitando daños en las estructuras, aumentando la vida útil de las estructuras y el riesgo de la vida humana.

Por último, se tienen algunas recomendaciones por si se quisiera continuar con la investigación a nivel maestría, o profundizar en el tema.

Las estaciones meteorológicas no tienen datos a largo plazo constantes, existen muchos vacíos en meses que afectan la proyección y la interpretación de las mismas. Esto será un problema para investigaciones futuras donde se siga analizando el problema ambiental, el cual es de suma importancia en épocas actuales donde se empiezan a presenciar contingencias climáticas en el país.

También resultaría interesante y de gran aporte a la investigación el poder realizar pruebas microscópicas al concreto, la microscopía óptica aplicada al estudio del concreto es una herramienta muy poderosa a la hora de analizar y entender el comportamiento estructural de este material, así como su estado, descripción de sus componentes, causas del deterioro, idoneidad respecto a las especificaciones del proyecto y posible comportamiento futuro. En este sentido, autores como Ingham (2009) han utilizado la microscopía óptica para evaluar los daños producidos por el fuego en el concreto, encontrando que a través de la petrografía se puede establecer con precisión la profundidad e intensidad del daño. Algunos investigadores (Zerbino & Glaccio, 2014; Jówiak-Niedwiedzka, et al., 2015; Lukschová, Pr̃ikryl, & Pertold, 2009; Katayama, 2010) han empleado esta técnica de caracterización para evaluar la reacción álcali-agregado en concretos, mostrando que la reacción se puede propiciar con la presencia en la mezcla de agregados de sílice reactiva o de carbonatos; ellos han encontrado que con esta técnica se pueden definir bien las grietas producto de esta reacción, el material que está reaccionando y el producto que se forma de la reacción para cuantificar la extensión del daño.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, A. A. T. (2017). “Estudia IMT durabilidad del concreto en México”. Consultado el 5 de octubre de 2018
2. Adam Neville. (2001). “Mantenimiento y durabilidad de las estructuras”. American Concrete Institute.
3. Adamec K., Palmer, R. N., Polebitski A. (2010). “Climate Change Evaluation of Climate Change Impacts to Reservoir Operations within the Connecticut River Basin”. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change: 92-100.
4. Ali S., Behzad T., Reza K. K. (2018). “Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete”. Magazine of Concrete Research 70 (10), pp. 519 – 532
5. ASTM C-125. Terminología Referente Al Concreto Y Agregados Para Concreto.
6. ASTM C-29. Método de ensaye estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados.
7. ASTM C-33. Especificación Normalizada de Agregados para Concreto.
8. ASTM D-422. Determinación Del Análisis Granulométrico.
9. ASTM D-448. Clasificación estándar para tamaños de agregados para construcción de carreteras y puentes.
10. Babak Ahmadi, Jafar S., Mohammad S. y Meysam N. (2014). “Transport properties of ternary concrete mixtures containing natural zeolite with silica fume or fly ash” Magazine of Concrete Research. 66 (3), pp. 150 – 158
11. Berga. (2012). “Cambio climático”. Consultado el 26 de octubre de 2018.
12. Calidad del Aire del Estado de Querétaro, CeMCAQ. (2017). “Dióxido de Azufre”. Consultado el 12 de junio de 2019.
13. Calleja, J. (1972). “Cuestiones que plantea el empleo del cemento” pp 22.
14. Campos Cisneros Ronald (2009). “Capítulo II: Agregados”. Manual de Agregados para el concreto.
15. Carcaño, Moreno, C. B. (2005). “Gastos en la Industria”.
16. Chang, R. (2007). “Química” Cuarta Edición, McGraw-Hill

17. Comisión Nacional Forestal (2010). “Bloque 1: Conceptos básicos sobre el cambio climático” pp 1-30
18. Del, A., Moreno, V., López, T. P., y Madrid, M. M. (2001). “El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto. Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano Del Transporte”, (182), pp 75.
19. Domínguez, J., González, A., El, R., y Técnica, V. (2015). “Valoración técnica del deterioro de las edificaciones en la zona costera de Santa Fe”
20. Downie Andrew (2008). “The World's Worst Traffic Jams”. Consultado el 20 de junio de 2008.
21. E. Vidaud (2013) “De la historia del cemento”. Construcción y Tecnología del concreto. Pp 20-24
22. E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks (2001). “Aditivos naturales”.
23. G. C. Cordeiro, R. D. Toledo, Filho L. M. Tavares, and E. M. Rego Fairbairn. (2008) “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars” Cement and concrete research, 39,
24. Gillis, Justin (2015). “Short Answers to Hard Questions About Climate Change”. The New York Times.
25. Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L., & Segura, G. (2012). “Efecto de la variación agua/cemento en el concreto”. Tecnología En Marcha, 25(2), 80–86
26. Henry Benavides B. y Gloria León A. (2007). “Información Técnica Sobre Gases De Efecto Invernadero Y El Cambio Climático”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM
27. Hernández-Castañeda, O., y Mendoza-Escobedo, C. J. (2006). “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”. INGENIERÍA Investigación y Tecnología VII.
28. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, IMCYC. (2012). “Posibilidades Del Concreto”. Construcción y Tecnología En Concreto.
29. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2015) “Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero”. Gobierno de México.

30. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2008). “Cambio climático y salud humana: riesgos y respuestas”. Washington, D.C
31. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2012). “Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático”. Washington, D.C
32. Mann, Michael E. (2014). “Earth Will Cross the Climate Danger Threshold by 2036”. Scientific American. Consultado el 30 de agosto de 2016.
33. Martínez María Del Pilar (2017). “Producción de azúcar repuntará en ciclo 2017-2018”. El economista. Consultado el 19 de Junio de 2018.
34. Monower Sadique, Hassan Al-Nageim, William Atherton, Linda Seton y Nicola Dempster (2012). “A laboratory study for full cement replacement by fly ash and silica fume”. Magazine of Concrete Research 64 (12), pp. 1135 – 1142
35. NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la Construcción – Agregados para Concreto – Análisis Granulométrico – Método de Prueba
36. NMX-C-122-ONNCCE-2018. Industria De La Construcción- Agua Para Concreto-Especificaciones.
37. NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco.
38. NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción- Concreto hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco.
39. NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo.
40. NMX-C-160-ONNCCE-2010 Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto.
41. NMX-C-296-ONNCCE-1999. Industria De La Construcción-Concreto-Determinación Del Sangrado-Método De Prueba.
42. NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria De La Construcción-Cementantes Hidráulicos -Especificaciones Y Métodos De Ensayo.
43. QuimiNet (2005) “Micro sílice: producción y uso”. Consultado el 18 de agosto de 2019.

44. Rajendra K. Pachauri y Andy Reisinger (2008). “Cambio climático 2007. Informe de síntesis” IPCC.
45. Rick Montani. (2010). “La carbonatación, enemigo olvidado del concreto”. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, IMCYC.
46. Robert B. Marks, “Los orígenes del mundo moderno: una nueva visión”, Editorial Crítica Madrid, 1ª edición, 2007, ISBN 9188484329305
47. Rómel G. Solís Carcaño¹, Éric Iván Moreno², P. C. B. R. (2005). “Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera”. Durabilidad En La Estructura De Concreto De Vivienda En Zona Costera, 9(14), 18.
48. Sajad Shariati Rad. (2018). “Technical and economical assessment of applying silica nanoparticles for construction of concrete structures”. Computers and Concrete, 22; 117-122
49. Schackelford, J. F. “Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros”, 6.ª ed., 2008
50. Shaikh Ph. D (2015) “Effect of ultrafine fly ash on the properties of concretes containing construction and demolition wastes as coarse aggregates”. Structural Concrete. 17 (1); pp. 116-122
51. Soto, M. (2013). “Contexto físico de Veracruz. Biodiversidad de Veracruz”,. 39.
52. Tejada Silva, M. A. (2016). “Influencia De La Humo de Sílice Y El Aditivo Superplastificante En El Concreto De Alta Resistencia,” 160.
53. Vidal Diana V., Janneth T. (2014). “Ceniza de bagazo de caña para la elaboración de materiales de construcción: estudio preliminar”. Revista Física, No. 48E.
54. Weather Spark. “El clima promedio en Veracruz México”. <https://es.weatherspark.com/>. Consultado el 12 de noviembre de 2019
55. Yáñez A. Alejandro. (2013). “Cambio climático, manejo costero y pesca: desafío integral”. Instituto de Ecología.