



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA



“ACONDICIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE HUMIDIFICACIÓN PARA UNA CÁMARA DE  
CARBONATACIÓN EN EL ESTUDIO DE CORROSIÓN EN CONCRETO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTAN:

Ángel Iván Mateos Ortega

María José Rodríguez Barranco

Director:

Dr. Luis Daimir López León

Codirector:

Dr. Francisco Javier Olguín Coca

MINERAL DE LA REFORMA, HGO., JUNIO DE 2016.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Área Académica de Ingeniería**  
*Engineering Department*

**M. en A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**  
**DE LA UAEH**  
**PRESENTE**

Por este medio le comunico que después de la revisión por parte de los sinodales del trabajo: **“Acondicionamiento de un sistema de control de humidificación para una cámara de carbonatación en el estudio de corrosión en concreto”** realizado por los pasantes de Licenciatura en Ingeniería Industrial, **Ángel Iván Mateos Ortega y María José Rodríguez Barranco**, se ha decidido autorizar la impresión del mismo.

A continuación firman de conformidad los integrantes del jurado:

- PRESIDENTE: Mtro. Cesar Alfonso Arroyo Barranco**
- PRIMER VOCAL: Dr. Luis Daimir López León**
- SEGUNDO VOCAL: Mtro. Sergio Blas Ramírez Reyna**
- TERCER VOCAL: Dr. Francisco Javier Olguín Coca**
- SECRETARIO: Mtra. Lidia Ramírez Quintanilla**
- PRIMER SUPLENTE: Mtro. Gustavo Erick Anaya Fuentes**
- SEGUNDO SUPLENTE: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola**

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE**  
 “Amor, Orden y Progreso”  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo a 30 de mayo de 2016.

  
 M. en E. Lidia Ramírez Quintanilla  
 Coordinadora de la Licenciatura en Ingeniería Industrial



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts. 4000 y 4001, Fax 2109  
 aai\_icbi@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

## **Agradecimientos**

Este trabajo de tesis, directa o indirectamente han participado distintas personas, apoyando, opinando, corrigiendo, alentando de muchas maneras, acompañando en los momentos de crisis y de felicidad, me permito dar gracias en este apartado.

En primer lugar al creador de todas las cosas, el que me ha dado las fortalezas y me ha prestado la vida, por encomendarme en cada una de mis etapas buenas o malas y no dejarme vencer, por ello con toda la humildad que de mi corazón pueda emanar, doy gracias primeramente mi trabajo a Dios.

A mis honorables padres, que siempre me han apoyado, guiado y orientado que sin sus grandes consejos y ejemplos he aprendido el amor a o lo que hago. Gracias por su confianza Norma y Miguel.

A mi hermano, por esas sabias palabras en el momento correcto, por darme esa confianza y apoyarme siempre, gracias por ser un ejemplo de superación y esfuerzo.

A mi familia, principalmente a mis abuelos, Felipe, Rosa, Miguel y Ana (QEPD) que son una gran inspiración y me brindan siempre una sonrisa.

A mi director de tesis Dr. Daimir y codirector Dr. Francisco por la orientación y ayuda brindada para la realización de nuestra tesis, por su apoyo y amistad que nos permitieron junto con mi compañera María José, para aprender más que lo estudiado en el proyecto.

A mis maestros que a lo largo de la carrera me vieron crecer, gracias por ser tolerables y pacientes, por ser un ejemplo, especialmente a la Mtra. Lidia Ramírez por apoyarnos en los objetivos planteados y no dejarnos solos.

Por último, pero no menos importante, a mis amigos, que han estado en todo momento y que hicieron de la carrera algo más grato, que con esfuerzo y dedicación se logran tus sueños, por compartir todos esos momentos de confianza y apoyo.

Ángel Iván

## **Agradecimientos**

A Dios por guiarme a lo largo de mi vida, por ser el camino a seguir, la luz que merece la pena encender, por la paciencia y entendimiento, por ser mi fortaleza en todo momento.

A mi mamá por ser mi motor, mi guía, mi ejemplo, mi maestra de vida por cada consejo, por cada desvelo, por impulsarme a ser siempre lo mejor, gracias por la oportunidad de realizar una carrera universitaria.

A mi hermana por su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios, por ser un ejemplo de estudio y de desarrollo profesional, gracias por ser mi maestra a lo largo de toda mi educación. Gracias tequitqui.

A mi familia porque sin ustedes este sueño no sería una realidad, gracias por su apoyo incondicional en todo momento, Abue Nicho, Abue Coco, Tía Tere, Tía Bety, Tía Gris, Tío Loth, Tío Joaquín, Tío Esteban, hermanitos Juan y Andrea.

A mi director de tesis Dr. Daimir gracias por permitirme la oportunidad de desarrollar este trabajo junto a mi compañero Iván, por sus enseñanzas y consejos, por haber creído en mí.

A mis maestros en este largo camino de la carrera por ser pacientes con un aprendiz que se ha convertido en ingeniero, especialmente a usted Mtra. Lidia Ramírez por cada consejo que he recibido de usted, ha sido un ejemplo a lo largo de mi estancia en la universidad gracias.

A mis amigos por confiar y creer en mí y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare, gracias por todo lo compartido a lo largo de estos años.

¡Ya soy ingeniera, lo logramos!

María José

## Dedicatorias

Dedico a Dios por permitirme llegar a esta etapa para poder compartirla con personas especiales, que con mucho esfuerzo y dedicación fue logrado, gracias familiares, amigos, maestros, y sinodales que sin su apoyo y confianza nada de esto sucedería.

Norma Ortega González	Jhaziel Peralta Rojas
Miguel Ángel Mateos González	Alma Verónica Real García
Cesar Alberto Mateos Ortega	Edgar Michele Martínez Vargas
Rosa Muñoz González	Erandi Hernández Espinoza
Felipe Ortega Ortiz	Marco Antonio Vázquez Meléndez
Ana María González Peña	María José Rodríguez Barranco
Miguel Ángel Mateos González	Dr. Luis Daimir López León
Adriana Ortega González	Dr. Francisco Javier Olguín Coca
Estrella Montserrat Zetina Ortega	Mtra. Lidia Ramírez Quintanilla
Johanna Malinalli Zetina Ortega	Mtro. Sergio Blas Ramírez Reyna
Jessica Queletza Zetina Ortega	Mtro. Cesar Alfonso Arroyo Barranco
Farah Luraí Domínguez Francisco	Mtro. Gustavo Erick Anaya Recio
Renata Abigail Mateos Medina	Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola
Cesar Gael Gutiérrez Palma	

Ángel Iván

## **Dedicatorias**

Dedico este trabajo principalmente a Dios pues sin el nada soy.

A mi madre, hermana y toda mi familia que me apoyan a lo largo de mi vida personal y profesional.

A León, Olaf, Luis Ángel, Alba, Iván, Montoya, Marco y Eder.

A cada uno de mis sinodales que compartieron su saber y su tiempo con nosotros para hacer de este un mejor trabajo.

A mi director y codirector de tesis que me brindaron el apoyo y tiempo para lograr este proyecto.

A la Universidad por permitirnos desarrollar en sus instalaciones nuestras creaciones.

Y de manera especial quiero dedicar este trabajo a cada estudiante que en su camino puede encontrar la dificultad, no se rindan ni pierdan la fe, entre más difícil sea el camino mucho mejor será la recompensa.

María José

# ÍNDICE

	Pág.
Introducción.....	10
Capítulo 1. Antecedentes.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Estado del arte.....	13
1.3 Justificación.....	15
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Objetivos.....	16
1.5.1 Objetivo general.....	16
1.5.2 Objetivos particulares.....	17
Capítulo 2. Conceptos Básicos.....	18
2.1 Concreto.....	18
2.1.1 composición.....	21
2.2 Corrosión.....	22
2.2.1 Clasificación.....	22
2.2.2 Corrosión de concreto.....	24
2.3 Carbonatación.....	27
2.4 Humedad relativa.....	30
2.5 Humidificadores.....	31
2.6 Instrumentación y control para la humedad.....	32
2.7 Fenolftaleína.....	34
2.8 Cámara de carbonatación.....	34
Capítulo 3. Metodología.....	38
3.1 Habilidad de la cámara de carbonatación.....	38
3.2 Parámetros experimentales.....	45
3.3 Elaboración de los sistemas de humidificación.....	47
Capítulo 4. Pruebas y Resultados.....	62
4.1 sistemas de humidificación en la cámara de carbonatación.....	62
4.2 Pruebas de los sistemas de humidificación.....	64
4.3. Pruebas de carbonatación.....	68

4.3.2 Calculo de pH.....	72
4.3.3 Fenolftaleína.....	73
Conclusiones .....	79
Recomendaciones .....	80
Referencias .....	81
Bibliografía.....	81
Anexos.....	84
Anexo 1. IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto). La carbonatación en el concreto reforzado. ....	85
Anexo 2. Coeficiente de carbonatación .....	92
Anexo 3. Concentración de CO <sub>2</sub> .....	93
Anexo 4. Prueba pHmetro. ....	94
Anexo5. Especificaciones del Agua desionizada .....	95
Anexo 6. Glosario .....	97

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1 Humidificador de aire. ....	14
Fig. 2 Rango de porciones de materiales utilizados en concreto por volumen absoluto. ....	19
Fig. 3 Celda electroquímica .....	23
Fig. 4 Criterios de Corrosión. ....	24
Fig. 5 Proceso de carbonatación. ....	29
Fig. 6 Poro seco. ....	27
Fig. 7 Poro saturado de agua. ....	29
Fig. 8 Poro parcialmente lleno. ....	30
Fig. 9 Funcionamiento DAT. ....	32
Fig. 10 Cámara de Carbonatación .....	36
Fig. 11 Esquema del sistema de una cámara de carbonatación. ....	37
Fig. 12 Recipiente de plástico resistente a la temperatura. ....	38
Fig. 13 Nebulizador con compresor. ....	39
Fig. 14 Prototipo 3. ....	39
Fig. 15 Humidificador. ....	40
Fig. 16 Cuerpo principal con conexión PVC .....	41
Fig. 17 Corte trasversal del humidificador. ....	41
Fig. 18 Colocación del tubo de aire al sistema y al compresor .....	42
Fig. 19 Kit humidificador explosionado. ....	43
Fig. 20 Tecnología de atomización directa .....	43
Fig. 21 Esquema de la Cubierta lateral de la cámara de carbonatación con la adaptación de los sistemas de humidificación. ....	44
Fig. 22 Termohigrómetro digital con sonda. ....	45
Fig. 23 Pruebas preliminares. ....	46
Fig. 24 Ensamble del kit humidificador al cuerpo principal. ....	62
Fig. 25 Instalación del Kit humidificador a la cámara de carbonatación. ....	63
Fig. 26 Cámara de carbonatación con sistema de humidificación. ....	64
Fig. 27 Medición del agua desmineralizada. ....	64
Fig. 28 Humidificador llenado a su máxima capacidad. ....	65
Fig. 29. Primera lectura del termohigrómetro al iniciar la prueba de humedad. ....	65
Fig. 30 Interior de la cámara de carbonatación con sistema de humidificación encendido .....	67
Fig. 31 Corte trasversal de cilindro de concreto. ....	68

Fig. 32 Especímenes de concreto dentro de la cámara de carbonatación en funcionamiento.....	69
Fig. 33 Monitoreo de flujo de CO <sub>2</sub> .....	69
Fig. 34. Cilindro 1 sin exposición dentro de la cámara.....	70
Fig. 35. Cilindro 1 con exposición en la cámara (18 h). ....	70
Fig. 36. Cilindro 2 sin exposición dentro de la cámara.....	71
Fig. 37. Cilindro 2 con exposición en la cámara (18 h). ....	71
Fig. 38. Muestra pulverizada en solución buffer 7.01.....	72
Fig. 39. pHmetro. ....	73
Fig. 40. Cilindro 1 sin exposición dentro de la cámara.....	74
Fig. 41. Cilindro 1 con exposición en la cámara.....	75
Fig. 42. Cilindro 2 sin exposición en la cámara.....	76
Fig. 43. Cilindro 2 con exposición a la cámara.....	77

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Sistemas de medición de humedad y punto de rocío.....	33
Tabla 2 Indicador de pH.....	34
Tabla 3 Materiales a utilizar.....	47
Tabla 4 Lista de piezas por cada humidificador.....	48
Tabla 5 Monitoreo del % de RH por minuto.....	66
Tabla 6 Monitoreo del % de RH cada 10 minutos.....	66
Tabla 7 Monitoreo del % de RH por hora.....	66
Tabla 8 Monitoreo del % de RH cada 30 minutos con intervalos de descanso.....	67
Tabla 9 Parámetros de los especímenes de concreto.....	68
Tabla 10 Prueba de pH en el concreto.....	72

## INTRODUCCIÓN

El concreto es el resultado de la mezcla de materiales granulares finos y gruesos (gravas, rocas trituradas y arenas), unidos por un elemento aglutinante. El concreto hidráulico es una combinación de cemento Portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos, para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente. (Maccormac, 2002)

Importante es señalar que las continuas fallas estructurales encontradas en edificaciones, son provocadas por los altos niveles de salinidad y humedad con los que cuenta el ambiente. Debido a que el concreto tiene poros intercomunicados y es penetrado por elementos corrosivos como el agua, oxígeno, iones de cloro, dióxido de carbono y otros gases, se produce un contacto con el acero y comienza la corrosión. (Camacho, 2009)

Aunque el concreto hidráulico es un material rígido y altamente resistente, no se encuentra a salvo de agentes ambientales que dañen sus propiedades físicas y químicas, acortando su vida útil para la cual fue diseñada la estructura que lo contiene. El principal agresor es la corrosión en el concreto y al cual se le ha dado la importancia que se merece, en cambio la carbonatación en el concreto es un problema serio que ocasiona grietas y oquedades en la estructura y que a la vez es la puerta de entrada para que se inicie la corrosión en el acero de refuerzo y no se le ha dado su debida importancia. (Montani, 2000)

La carbonatación del concreto es un proceso cotidiano, es el resultado de la reacción de los hidróxidos de calcio presentes en los poros del concreto con el bióxido de carbono presente en el ambiente en condiciones óptimas de humedad, tanto en el ambiente como en el concreto. En esta reacción ocurre un cambio de potencial de hidrogeno en los poros del concreto, el hidróxido de calcio que tienen un pH alto al reaccionar con el bióxido de carbono del ambiente forman un carbonato de calcio que posee un pH más neutral lo cual afecta bastante al acero de refuerzo ya que la varilla empieza a corroerse con valores de pH 9.5 o menores. (Moreno E. , 2005)

El proceso de la carbonatación se da de forma natural al igual que los factores que intervienen en su rápida o lenta penetración, también son naturales o propios del concreto,

los factores que más resaltan son la humedad y la permeabilidad del concreto. Existen condiciones de humedad en las cuales la carbonatación se propaga rápidamente que es alrededor del 50 % de humedad relativa. En el caso de la permeabilidad, se carbonata más rápido el concreto permeable, del mismo modo el concreto mal vibrado o que presenta huecos en su interior proporcionará un rápido esparcimiento. (Moreno E. , 2005)

Existen algunas estrategias para reparar o prevenir los daños causados por la carbonatación del concreto, el uso de impermeabilizantes es una de ellas pero el costo y constante mantenimiento son una limitante para asegurar el buen estado de las estructuras de concreto. Existen otros métodos que se enfocan más a la corrosión como lo son protecciones catódicas y uso de acero inoxidable pero estas técnicas son muy costosas, sería mucho mejor prevenir la carbonatación ya que el concreto en buen estado es el que protege al acero de refuerzo. (Montani, 2000)

El porcentaje de humedad en proporción a la cantidad total que el aire puede retener cuando está saturado se denomina humedad relativa. El punto de saturación dependerá de su temperatura. Cuando más caliente este el aire, más humedad contendrá antes de estar saturado o de alcanzar el punto de rocío, en el cual la humedad empieza a caer o desprenderse de aire. El humedecimiento por la adición de humedad al aire, puede realizarse por medio de chorros muy finos de agua o a través de chorros de vapor.

La presión de vapor o más comúnmente presión de saturación es la presión a la que a cada temperatura las fases líquidas y vapor se encuentran en equilibrio; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas. En la situación de equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado. (Ceballos , 2006)

Para realizar pruebas de carbonatación en el concreto es importante que se produzca la corrosión de manera acelerada, es decir, que no se tenga que esperar ciertos años a que una muestra pueda estar carbonatada de manera notable esto debido a que los factores ambientales dañan el concreto poco a poco; para acelerar este proceso existen cámaras especiales donde se pone a exposición de los agentes ambientales el concreto, ya sea

reforzado o no, de manera que la penetración tanto de humedad como de  $\text{CO}^2$  sea constante pudiendo acelerar la carbonatación de tres años a dieciocho horas.

El presente trabajo se enfoca en la adición de humedad a una cámara de carbonatación acelerada que permitirá realizar pruebas de corrosión en el concreto en un futuro a alumnos e investigadores pertenecientes al área académica de ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

La humidificación es una operación que consiste en aumentar la cantidad de vapor presente en una corriente gaseosa; el vapor puede aumentar pasando el gas a través de un líquido que se evapora en el gas. Esta transferencia hacia el interior de la corriente gaseosa tiene lugar por difusión y en la interface hay, simultáneamente, transferencia de calor y de materia. (Ceballos , 2006)

La carbonatación es la pérdida del pH en el concreto, es una corrosión química por medio de  $\text{CO}^2$  y humedad cuando el hidróxido de calcio se convierte a carbonato de calcio. Para comprobar los niveles de pH se realizan pruebas, como la de la fenolftaleína y la del pHmetro, las cuales mostraran el nivel y zona carbonatada en las muestras de concreto.

Este trabajo de investigación tiene la finalidad de acondicionar a una cámara de carbonatación acelerada un sistema de humidificación que satisfaga los niveles de humedad para que pueda presentarse el efecto de la carbonatación en muestras de concreto y concreto reforzado.

La realización del sistema de humidificación está bajo los parámetros necesarios para la cámara de carbonatación, el sistema cuenta con cuatro dispositivos de humedad y un termohigrómetro para la lectura de humedad y temperatura durante las pruebas de carbonatación.

El desarrollo de este trabajo muestra la versatilidad que se puede encontrar en un ingeniero industrial, enfocándose a la producción de nuevos productos y siguiendo las especificaciones del cliente junto con la normativa existente, creando prototipos y logrando un funcionamiento comprobable por medio de pruebas que garantizan la calidad del nuevo diseño.

# **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo cuenta entre sus laboratorios de ingeniería, con una cámara de carbonatación que permite hacer pruebas al concreto y al concreto reforzado, sin embargo, para que este fenómeno suceda de manera acelerada se requiere que exista de manera constante no solo un porcentaje de CO<sub>2</sub> sino también de humedad.

Se encuentra cómo una problemática el hecho de que no exista un sistema de humidificación que abastezca la humedad relativa requerida para que pueda presentarse el fenómeno de la carbonatación de manera acelerada.

De esta manera, se pretende implementar un sistema de humidificación con el fin de adecuar la cámara de carbonatación acelerada para que tenga un funcionamiento óptimo que permita el estudio de este fenómeno.

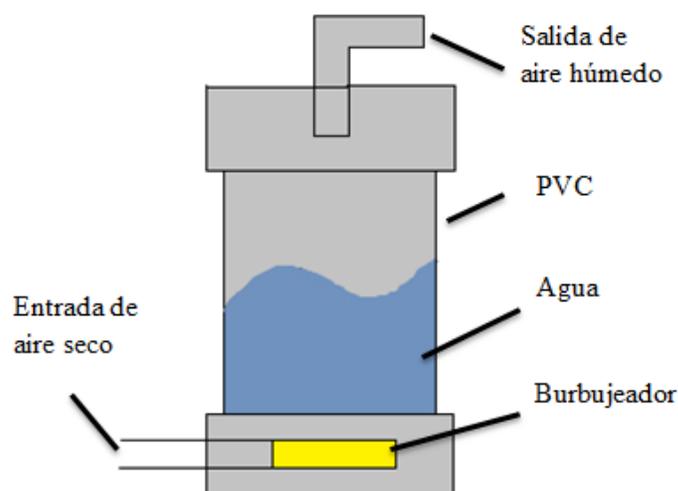
Para hacer la implementación de dicho sistema se evaluarán las necesidades y se trabajara el diseño asistido por computadora para posteriormente elaborar y adaptar el sistema de humedad haciendo pruebas pertinentes para asegurar el funcionamiento del sistema de humedad relativa.

## **1.2 ESTADO DEL ARTE**

A lo largo del tiempo el estudio de la corrosión has sido más especializado como se sabe, un agente importante para que se dé esta situación es la humedad, entre más húmedo este el ambiente menor será el tiempo de estudio; esto quiere decir que se busca la manera de agilizar las pruebas acondicionando sistemas de humedad a los equipos que permiten realizar las pruebas de corrosión. Dichos sistemas han sido variados de acuerdo a cada equipo al que son instalados sin embargo su finalidad es la misma para todos, proporcionar la humedad requerida para el estudio de deterioro.

Los humidificadores fueron creados por el inventor estadounidense Benjamin Franklin, estos aparatos sirven para aumentar la humedad relativa en el medio ambiente y pueden aplicarse a una amplia variedad de lugares dependiendo de lo que se requiera.

Para un estudio de carbonatación en el concreto con relación del agua/cemento publicado por la revista académica de ingeniería, el sistema de humidificación que se adaptó fue un recipiente de PVC (tubo vertical) cerrado, con agua, que cuenta con dos orificios: uno situado en un costado en la parte inferior y el otro en la parte superior, y también cuenta con un burbujeador en el interior (Moreno et al., 2004) como se muestra en la figura 1.



**Fig. 1** Humidificador de aire. (Moreno et al., 2004)

En otro artículo publicado por la Universidad de Zulia Venezuela (Linares & Sánchez, 2003), haciendo referencia a la construcción de una cámara de carbonatación acelerada menciona que la torre de humidificación consiste solamente en un recipiente en el cual se hace burbujear aire a través de un lecho de empaques que está completamente cubierto por agua. Se escogió fabricar dicha torre, utilizando materiales transparentes, para tener un control visual exterior del nivel de líquido dentro de la misma. El recipiente se

construyó de plexiglás de base cuadrada 18x18cm, con una altura máxima de columna de agua de 60 cm. Aunque para propósitos prácticos de mantener una humedad relativa de  $65\% \pm 5\%$  a un caudal de flujo establecido según balance de masa de 1250 ml/min, fue suficiente con mantener una altura efectiva constante de 7, 8 cm de agua. El aire seco entra por el fondo de la torre a una presión suficiente para vencer la caída de presión de la columna de líquido, burbujea a través de unos difusores, y sale por el tope de la misma a la humedad requerida.

Existen en el mercado humidificadores, tanto de uso industrial, así como de uso doméstico que ayudan a mantener un nivel de humedad en alguna habitación, estos principalmente son usados en las temporadas de calor o para un uso más especializado como por ejemplo mantener en un ambiente fresco medicamentos o algunas sustancias químicas.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La alta alcalinidad del concreto, que promueve la formación de una capa de óxidos pasivantes sobre el acero, es debida principalmente a la portlandita formada durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y a los hidróxidos de sodio y potasio presentes. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto en valores entre 12 y 14, en el extremo más alcalino de la escala de pH. El descenso de la alcalinidad se produce principalmente por reacción de los compuestos de carácter básico de la fase acuosa del concreto, hidróxidos de sodio, potasio y calcio, con los componentes ácidos de la atmósfera, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de azufre ( $\text{SO}_2$ ), para formar carbonatos, sulfatos y agua. Puesto que el  $\text{CO}_2$  se encuentra en mayor proporción en el aire que el  $\text{SO}_2$ , este proceso de descenso de la alcalinidad se denomina genéricamente 'carbonatación'. Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y a compresión de las zonas afectadas, así como a tensiones y microfisuración.

Al inhibir la carbonatación en el concreto se puede dar una garantía de que el concreto resistirá el periodo de vida para el cual fue diseñado, así de esta manera, el acero ahogado en el concreto estará a salvo de agentes ambientales que lo puedan afectar, por lo

cual es importante elaborar dispositivos que permitan monitorear y acelerar los fenómenos que afectan al concreto.

La cámara de carbonatación permite reproducir un ambiente apropiado para que se logre la carbonatación en un proceso acelerado con una alta concentración de CO<sub>2</sub>. La humedad requerida dentro de la cámara es importante, así como su monitoreo constante de esta para tener un control de los parámetros experimentales que permitan acelerar el fenómeno de la carbonatación.

Para hacer de manera más agilizada el estudio y entendimiento de la corrosión que permitan dar alternativas a los tratamientos tradicionales de la corrosión se pretende implementar un sistema de humidificación a la cámara de carbonatación con la que cuenta la Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo (UAEH) empleada para acelerar corrosión en concreto y concreto reforzado.

## **1.4 HIPÓTESIS**

La adición de los dispositivos de humidificación e instrumentos de control en la cámara de carbonatación permite acelerar y monitorear el comportamiento del fenómeno de la carbonatación bajo los criterios establecidos en la norma UNE-EN\_13295:2005.

## **1.5 OBJETIVOS**

### *1.5.1 OBJETIVO GENERAL*

Diseñar, elaborar y adaptar un sistema de humedad en una cámara de carbonatación, con un dispositivo de monitoreo y control de humedad, mediante una manufactura convencional que cumpla los parámetros establecidos por la norma UNE-EN\_13295:2005, para realizar estudios de corrosión en concreto.

### *1.5.2 OBJETIVOS PARTICULARES*

- Realizar el análisis de información enfocada en la norma UNE-EN\_13295:2005 para identificar y aplicar los parámetros del sistema de humidificación.
- Diseñar dispositivos para humidificar la cámara de carbonatación usando un diseño asistido por computadora (CAD)
- Mantener y controlar el paso de humedad mediante un temporizador que permita una humedad constante.
- Instrumentar la cámara de carbonatación por medio de un termohigrómetro para el monitoreo del porcentaje de humedad relativa.
- Verificar el funcionamiento del equipo mediante pruebas en especímenes de concreto para asegurar el funcionamiento de sistema de humedad.

# CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS

## 2.1 CONCRETO

Un buen trabajo en concreto se traduce en estructuras duraderas, de apariencia agradable y que necesita poco mantenimiento (Love, 2006)

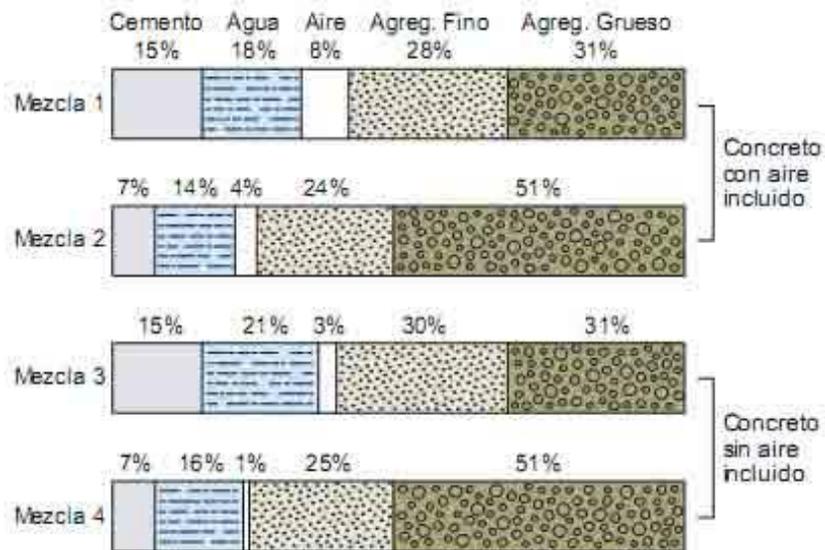
El concreto, un material de construcción fuerte y duro, es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta en una matriz de cemento o mortero.

Los agregados son normalmente compuestos de arena y grava, o piedras estrujadas y escoria de alto horno molida y granulada. Los agregados son generalmente divididos en dos grupos: finos y grueso. Los finos consisten de arenal natural o producido, con tamaño de partículas hasta 10 mm; los agregados gruesos con tamaño hasta 150 mm, pero los más utilizados tienen un tamaño de 20 mm.

La pasta consiste de cemento Portland, con o sin materiales adicionales, agua y aire. La pasta, que actúa como pegamento se endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua, además, junta los agregados en una masa tipo roca, que es conocida como concreto.

La pasta es habitualmente compuesta de materiales cementantes, agua y aire (atrapado o total del cemento. El volumen absoluto de los materiales cementantes es habitualmente entre 7 y 15% y el agua entre el 14 y 21%. El contenido de aire atrapado en el concreto varía entre 4 y 8% del volumen total del concreto.

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y de los agregados, así como de la unión entre estos dos componentes. En un concreto producido apropiadamente, cada partícula del agregado es completamente recubierta con pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados son completamente rellenos con pasta, como muestra la figura 2; las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de tamaño pequeño. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados de tamaño grande. (Raichev, Veleva, & Valdez, 2009)



**Fig. 2** Rango de porciones de materiales utilizados en concreto por volumen absoluto. (Raichev, Veleva, & Valdez, 2009)

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos: a) de origen arcilloso, obtenido de arcilla y piedra caliza, en proporción 1:4; b) de origen puzolánico (de origen orgánico o volcánico). Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, propiedades de resistencia y durabilidad, y, por lo tanto, por sus destinos y usos. Desde el punto de vista químico, se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido es finamente molido y una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definirlos.

El tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del concreto, es el cemento Portland. La fabricación de este tipo de cemento se da en tres fases: (1) Preparación de la mezcla de las materias primas; (2) Producción del *clinker* Portland y (3) Preparación del cemento. Las materias primas para su producción son minerales que contienen: óxido de calcio (44%), óxido de silicio (14.5%), óxido de aluminio (3.5%), óxido de hierro (3%), y óxido de manganeso (1.6%). El cemento obtenido tiene una

composición del tipo: 64% CaO; 21% SiO<sub>2</sub>; 5.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4.5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2.4% MgO; 1.6% sulfatos y 1% de otros compuestos como el agua.

Como aglomerante, el clinker Portland es hidráulico, por lo que necesita agua para fraguar misma que amasado no se espora, sino pasa a ser parte de él una vez endurecido. Así mismo, en el clinker puede fraguar, aunque se encuentre inmerso en agua. El cemento Portland se obtiene al mezclar el clinker, yeso (u otro retardante de fraguado) y aditivos que se dosifican según el uso que vaya a tener. Además del clinker Portland, también se usa el aluminato cálcico, aunque es menos común debido a que acarrea a varios problemas de calentamiento, porosidad y menor resistencia del concreto, reacción con el agua salada, etcétera.

Cuando el cemento de Portland es mezclado con el agua, el producto solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un periodo de varias semanas. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaO, "C<sub>3</sub>A"), formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato tricálcico (SiO<sub>2</sub>.3CaO, "C<sub>3</sub>S"), formando una estructura amorfa, llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos amados, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio (SiO<sub>2</sub>). Las tres reacciones son exotérmicas. Con el agregado de materiales particulados al cemento calcáreo se obtiene el cemento plástico, que fragua más rápidamente y es más fácil de trabajar. Ese material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150. Los principales productores mundiales de cemento Portland son Francia ("Lafarge"), Suiza ("Holcim") y México ("CEMEX").

### *2.1.1 COMPOSICIÓN*

Los ingredientes esenciales del concreto son el cemento y el agua, los cuales reaccionan químicamente en un proceso de hidratación para formar otro material más fuerte (Love, 2006). El cemento y los agregados representan un 25% y 65% del concreto formado respectivamente, aunque esto puede variar según el uso y destino del concreto. De esta manera, las propiedades químicas y físicas del concreto dependerán de gran medida de las propiedades que presenten estos materiales y del grado en que el cemento se hidrate. Una hidratación pobre de cemento conduce a una porosidad alta en el concreto final. (Fontes Guirado, 1994)

Sin embargo, esta pasta de cemento requiere de una serie de agregados para ser utilizada en grandes cantidades debido a que la mezcla de cemento y agua se contrae excesivamente al endurecer; para esto se utilizan los materiales de relleno inerte que son la arena, la piedra y la grava. La pasta es el medio cementoso que une las partículas de agregado en una masa sólida (Love, 2006).

Como los agregados ocupan un gran volumen del concreto formado, su calidad es de gran importancia, ya que no solo pueden afectar la fortaleza del concreto, sino también su durabilidad y su resistencia al ataque de ácidos y sulfatos. El uso del agregado es visto en muchos casos como un material inerte y económico, con el que se puede aumentar los volúmenes de pasta del concreto, sin embargo, también representa un buen material de construcción que no es totalmente inerte. Sus propiedades térmicas, físicas y algunas veces las propiedades químicas influyen las propiedades del concreto. (Fontes Guirado, 1994)

Lechada: es una mezcla de cemento Portland, cal, agregados finos y agua en proporciones tales que la mezcla sea fluida. (Love, 2006)

Mortero: es una mezcla de cemento Portland, cal, agregado finos y agua en tal proporción que la mezcla sea plástica. La proporción exacta y el tamaño máximo de la partícula de agregado se determinan según el propósito de la mezcla. (Love, 2006)

## 2.2 CORROSIÓN

La corrosión puede definirse como la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con su medio circundante con el consiguiente deterioro de sus propiedades. (Huerta, 2001) Es la destrucción de un cuerpo sólido causada por un ataque no provocado, que se inicia en la superficie.

De igual forma la corrosión se entiende como el deterioro de un material o sus propiedades, debido a la acción del medio ambiente que lo rodea ( Fontana, 1986), lo cual provoca una reacción química. Una reacción de oxidación, que da como resultado la pérdida del material.

La corrosión de los metales también puede ser considerada como el proceso inverso de la metalurgia extractiva. Muchos metales existen en la naturaleza en estado combinado, por ejemplo, como óxidos, sulfatos, carbonatos o silicatos. En estos estados, las energías de los metales son más bajas. En el estado metálico las energías de los metales son más altas, y por eso, hay una tendencia espontánea de los metales a reaccionar químicamente para formar compuestos. (Perry, 1998)

Una característica importante de los procesos de corrosión es que los eventos ocurren espontáneamente en la naturaleza, en términos termodinámicos, esto equivale a decir que la variación de energía libre ( $\Delta G_0$ ) de la reacción global es menor que cero.

La corrosión ordinaria, es un proceso redox por el cual los metales se oxidan por medio del oxígeno  $O_2$ , en presencia de humedad. El oxígeno en estado gaseoso es un agente oxidante, y la mayoría de los metales tienen potenciales de reducción menores que éste, por lo tanto, son fácilmente oxidables. (Enríquez García, 2015)

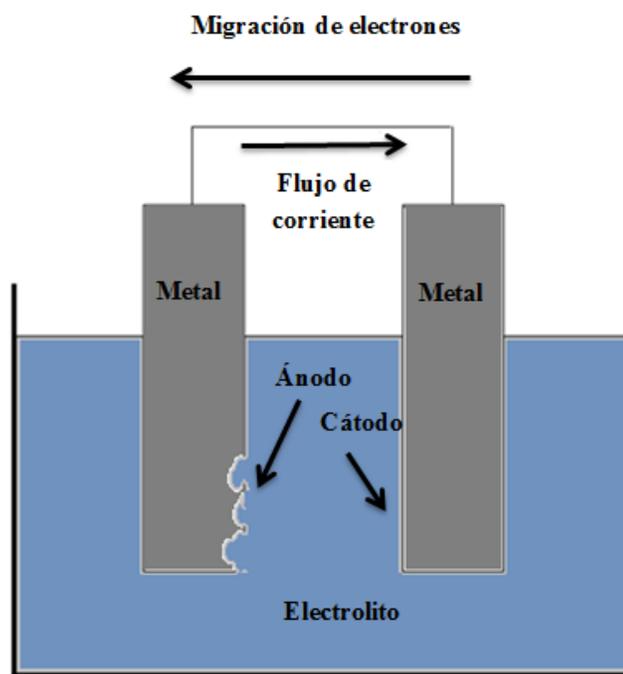
### 2.2.1 CLASIFICACIÓN

Cualquier proceso de corrosión transcurre a través de cualquiera de los dos mecanismos siguientes:

Corrosión electroquímica, que es la que se debe a la actuación de pilas electroquímicas, en las que el metal sufre disolución en las regiones anódicas. El proceso

como tal no afecta por igual a toda la superficie metálica, pues en las regiones catódicas no hay ataque. (Huerta, 2001)

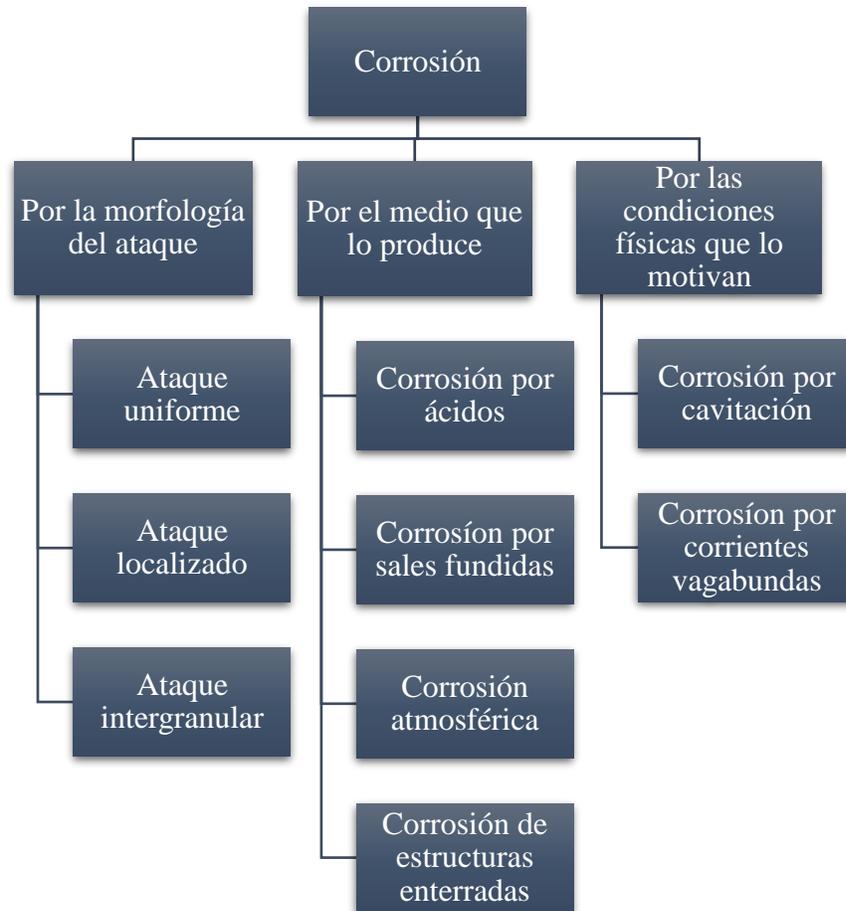
La corrosión electroquímica se da cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas, o la simple humedad de la atmosfera y de los suelos (figura 3). La presencia de moléculas de agua en la superficie es la condición necesaria para que ocurra corrosión electroquímica. (Huerta, 2001)



**Fig. 3** Celda electroquímica (Huerta, 2001)

Corrosión directa, este mecanismo se da cuando el material metálico opera a alta temperatura y por lo tanto no existe la posibilidad de que aparezca una película de humedad sobre la superficie metálica. Consiste en la reacción química heterogénea directa y un gas agresivo que generalmente es O<sub>2</sub>, con formación de películas de óxido. (Huerta, 2001)

De igual manera se puede clasificar la corrosión de acuerdo con Otero en tres criterios (figura 4):



**Fig. 4** Criterios de Corrosión (Elaboración propia).

### 2.2.2 CORROSIÓN DE CONCRETO

A diferencia de los metales, la degradación de los materiales inorgánicos es de carácter químico o fisicoquímico. Esta es la razón por la cual frecuentemente se utiliza el término resistencia química, en este tipo de materiales.

La resistencia química de los materiales inorgánicos se determina en base al cambio de su masa, volumen, propiedades mecánicas y composición química. Los materiales de silicatos naturales o artificiales, se degradan como resultado de la interacción entre el ambiente agresivo y los óxidos, que forman parte mayoritaria de su composición, o como resultado de factores físicos como cambios en la temperatura del ambiente, cristalización de sales en los poros de los materiales, efectos mecánicos tales como la erosión por parte del

ambiente o de partículas sólidas que contiene el ambiente, impacto de choques o vibraciones, etcétera. Por ejemplo, como resultado de cambios bruscos en la temperatura, que pueden producir grietas en el material, donde el agua y agentes químicos agresivos penetran y reaccionan con el material, acelerando el proceso de degradación química. Un efecto análogo lo tiene la cristalización de sales que penetran en los poros y grietas del material.

Los materiales cerámicos generalmente se clasifican en tres grupos según su composición, incluyen cerámicas vidriosas y vidrio, porcelana y fibras de cerámica entre otros materiales.

La resistencia química de estos en medios agresivos depende de su composición química y fases que contienen. Los materiales con contenido de SiO<sub>2</sub> en estado libre mayor de 55% son habitualmente resistentes en medios ácidos. Sin embargo, los materiales en cuya composición prevalecen óxidos básicos (CaO, MgO, etc.), son resistentes a medios alcalinos.

El dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) o cuarzo, es el componente principal de silicatos naturales o artificiales resistentes en medios ácidos. Con el aumento de su contenido la resistencia en estos medios se incrementa. Sin embargo, el SiO<sub>2</sub> no es resistente en ácido fluorhídrico (HF) y es ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) caliente (> 300°C). Los materiales inorgánicos que contienen SiO<sub>2</sub> libre (especialmente en estado amorfo), se degradan fácilmente en soluciones alcalinas, como, por ejemplo (Ecuación 1):

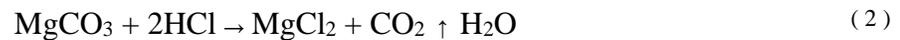


Y, el Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (silicato sódico) formado se disuelve bien en agua o en soluciones alcalinas.

El dióxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), es el segundo componente importante en la composición de la mayoría de los materiales cerámicos. Este se disuelve en ácidos minerales y en soluciones alcalinas. La alta resistencia en medios ácidos, después de la cocción del material, se explica por el hecho que el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a altas temperaturas forma, con el

SiO<sub>2</sub>, aluminosilicatos como la silimanita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y mulita (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>), que presentan muy alta resistencia en ácidos.

Los materiales, que contienen carbonato de magnesio o de calcio se degradan fácilmente en ácidos:



El MgCl<sub>2</sub> formado se disuelve bien en agua, ácidos y bases, mientras el yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) cristaliza en los poros del material aumentando su volumen, lo que provoca su destrucción mecánica.

Los óxidos, que forman parte de la composición de los silicatos y cerámicos, se pueden disponer en el siguiente orden en función de su solubilidad en ácidos:



La porosidad del material acelera el proceso de su degradación, ya que en este caso un área mayor está expuesta a la acción del medio agresivo. La degradación fisicoquímica de materiales porosos no solamente se realiza en la superficie, sino también en su profundidad. Si en los poros se forman compuestos con mayor volumen, surgen tensiones internas significativas que aceleran la degradación, induciendo la formación de microgrietas y fisuras internas. Sin embargo, si durante el proceso de degradación se producen compuestos no solubles puede ocurrir una compactación que demora su degradación.

La resistencia química de los materiales de silicatos y cerámicos depende también de su estructura. La resistencia de materiales con estructura cristalina es mayor que la

resistencia de materiales amorfos. Por ejemplo, el SiO<sub>2</sub> cristalino presenta relativamente buena resistencia en soluciones alcalinas, mientras el SiO<sub>2</sub> amorfo se disuelve fácilmente en éstas.

Los métodos para la evaluación de la resistencia química de cerámicas incluyen estudios en soluciones acidas y/o alcalinas. Por ejemplo, la norma ASTM C650 – 04 ("Standard Test Method for Resistance of Ceramic Tile to Chemical Substances"), se refiere al ensayo de muestras de azulejo (mosaico, barro cocido, tejas) en solución de 10% de HCl y en 10% de KOH, a temperatura de las soluciones y duración del ensayo de hasta una semana, basados en la experiencia obtenida con diferentes materiales cerámicos. La práctica ha demostrado que, si las muestras del material resisten en estos medios agresivos probablemente tendrán una buena resistencia al contacto y con otros medios ácidos o alcalinos (exceptuando al ácido fluorhídrico). Se definen varios grados de resistencia química, desde: no se observa ninguna alteración, leve variación del aspecto superficial, se nota claramente la acción química, pérdida parcial de la superficie y, finalmente, pérdida total del estado de superficie. (Raichev, Veleva, & Valdez, 2009)

Los elementos del concreto reforzado (varilla, cemento Portland, arena, grava y agua) le confieren propiedades excelentes a éste tales como: resistencia a la compresión y a la tensión. La elevada alcalinidad de concreto (pH entre 12.5 y 13.5) y resistividad eléctrica (en concreto sano de 100,000 Ohm-cm) proporcionan condiciones ideales para alcanzar la pasividad (protección) del acero. La corrosión del acero de refuerzo en concreto no se presenta, a menos que un agente externo al medio (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, CO<sub>2</sub> SO<sub>2</sub>) modifique el estado pasivo normal de ese medio alcalino. (Pérez Quiroz , 2001)

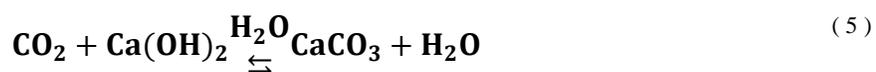
### **2.3 CARBONATACIÓN**

Otra forma de ataque por corrosión a la varilla de refuerzo es el fenómeno que comúnmente se le denomina 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. (Montani, 2000)

El CO<sub>2</sub> es un agente presente en la atmósfera; y puede actuar sobre el concreto formando CaCO<sub>3</sub>, que provoca la reducción de la alcalinidad del concreto (pH<12.5). La parte esencial del proceso la desempeña el CO<sub>2</sub>, por lo que éste recibe el nombre de carbonatación (Anexo 1). El dióxido de carbono reacciona con los iones alcalinos que conforman al concreto para producir carbonatos; el pH del medio se ve disminuido y se presenta la corrosión. La característica de este proceso es la aparición de una banda que representa dos zonas con valores de pH diferentes; por lo general, una zona de pH<9 (zona carbonatada) y otra de pH>12 (zona alcalina). (Pérez Quiroz , 2001)

Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y a compresión de las zonas afectadas, así como a tensiones y microfisuración. Asimismo, dado que durante la reacción el CO<sub>2</sub> atmosférico se fija de forma irreversible, la carbonatación del concreto es también muy importante desde el punto de vista medioambiental (García, 2011).

Inicialmente el CO<sub>2</sub> no es capaz de penetrar profundamente dentro del concreto, debido a que reacciona con el calibre del concreto superficial (Fig. 5) de acuerdo con la siguiente reacción:

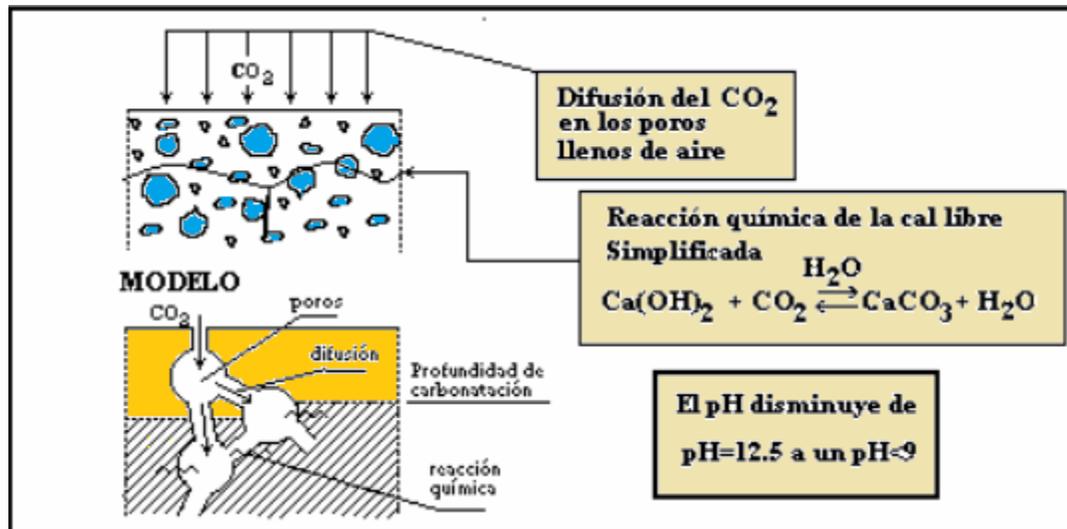


Dando como resultado un cambio en el pH:

$$\text{pH} = 12.5 \text{ a } 13.5 \rightarrow \text{pH} \cong 9$$

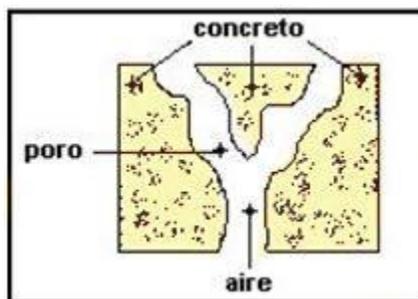
Aunque la porción de mezcla externa del concreto se carbonata rápidamente, el CO<sub>2</sub> continúa su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo es cercano a 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, dando paso a la corrosión del acero (Anexo 2).

A la profundidad que el CO<sub>2</sub> ha penetrado y por lo tanto que ha modificado el pH, generalmente se le llama “frente de carbonatación” (del Valle Moreno, Pérez López, & Maeríns Madrid, 2001).

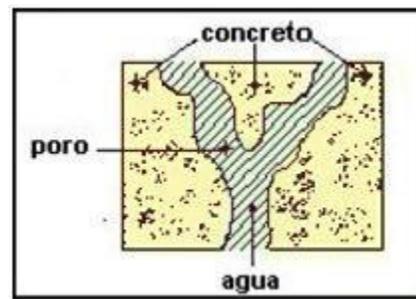


**Fig. 5** Proceso de carbonatación (Del Valle Moreno et al., 2001)

La existencia de carbonatación en los concretos se determina usando un indicador (fenolftaleína). La difusión del CO<sub>2</sub> (gas) es diferente tanto en agua como en aire; en el agua es 104 (Anexo 3), más lenta que en aire. Por tanto, si los poros están secos, el CO<sub>2</sub> (gas) difundirá rápidamente pero no reaccionará debido a la falta de agua (Fig. 6); si están saturados la difusión será muy baja (Fig. 7), y se presentará muy poca carbonatación; pero si los poros están parcialmente saturados (Fig. 8), la carbonatación ocurrirá fácilmente (Pérez Quiroz , 2001).



**Fig. 6** Poro seco (Pérez, 2001).



**Fig. 7** Poro saturado de agua (Pérez, 2001).

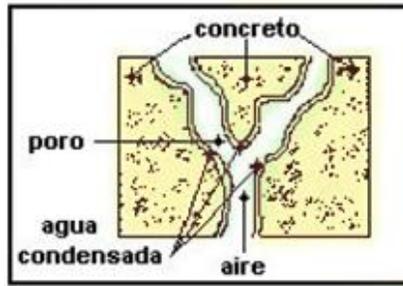


Fig. 8 Poro parcialmente lleno (Pérez, 2001).

## 2.4 HUMEDAD RELATIVA

La cantidad de humedad en el aire tiene un efecto definitivo en las condiciones de comodidad que ofrece un ambiente. Sin embargo, el nivel de comodidad depende más de la cantidad de humedad que el aire contiene ( $m_v$ ) respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura ( $m_g$ ). La relación entre estas dos cantidades se conoce como humedad relativa.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_g V}{R_v T}} = \frac{P_v}{P_g} \quad (7)$$

La humedad relativa es el cociente entre la presión parcial de agua a una temperatura  $t_0$  y la presión total del vapor a saturación y a la misma temperatura  $t_0$ . Equivale al porcentaje de humedad. (Creus, 2011)

A temperaturas por debajo de la temperatura crítica, a la fase gaseosa de una sustancia se le denomina frecuentemente como vapor. El termino vapor de acuerdo con Cengel y Boles, (2012) implica un estado gaseoso que se encuentra cerca de la región de saturación de la sustancia, lo cual incrementa la posibilidad de condensación de los gases durante el proceso.

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases. Normalmente, el aire en la atmosfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o

humedad) y se conoce como aire atmosférico. En contraste, el aire que no contiene vapor de agua se denomina aire seco. (Cengel & Boles, 2012)

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse de varias maneras. Es probable que la más lógica sea precisar directamente la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, a lo que se denomina humedad absoluta o específica.

En los sólidos, la humedad puede venir expresada en varias formas como lo indica Creus (2011):

Contenido de humedad, expresado en tanto por ciento, es la cantidad de agua existente en las sustancias sólidas por unidad de peso o del volumen del sólido seco o húmedo. El termino se aplica, con preferencia, en la relación al sólido seco, es decir, bien expresado en base seca.

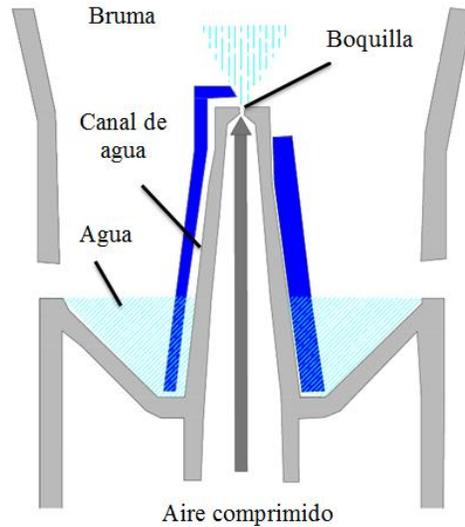
Contenido de humedad comercial. Contenido de humedad, expresado en kilogramo de agua por kilogramo de material, al salir este del proceso de secado.

## **2.5 HUMIDIFICADORES**

Las variables de Humedad y de punto de rocío son importantes en la industria y se utilizan en el acondicionamiento de aire, en atmósferas protectoras de tratamientos térmicos, en secadores, en humidificadores, en la industria textil, en la conservación de fibras, entre otros. (Creus, 2011) Para efectos del estudio se trabajarán los humidificadores.

Los humidificadores son aparatos diseñados para aumentar la humedad en el ambiente y se pueden encontrar tanto en frío (ultrasónicos) como en caliente (vaporización o electrodos).

Los Humidificadores son dispositivos que mantienen una humedad relativa por medio de agua posteriormente convertida en vapor. Este dispositivo funciona mediante una tecnología de atomización directa (DAT) como se muestra en la figura 9. El agua sube y se mezcla con el aire comprimido, el cual lo genera una bomba compresora, al agua se convierte en partículas finas y en rocío cuando entra en contacto con el aire comprimido. Por medio de un cabezal vaporizador que genera una presión negativa.



**Fig. 9** Funcionamiento DAT (Elaboración Propia).

## 2.6 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL PARA LA HUMEDAD

Pueden emplearse varios métodos en la determinación de la humedad en el aire, como se muestra en la tabla 1. Algunos de los más usados se explican a continuación.

Método del elemento del cabello (o nylon). Se basa en la expansión o contracción lineal que son características de los materiales sensibles a las variaciones de humedad.

Bulbo seco y bulbo húmedo. Este instrumento se basa en la captación de temperatura ambiente o seca y de la temperatura húmeda mediante dos termómetros. Uno seco y otro con su bulbo constantemente humedecido. (Creus, 2011)

Existen un instrumento de medición específico para evaluar la humedad relativa del aire atmosférico, este es el higrómetro, hoy en día existe una variedad en la presentación de este instrumento; existen dos tipos principales, el higrómetro de absorción en el cual se utilizan sustancias químicas que, luego de absorber, exhalan la humedad, según las circunstancias, y el higrómetro eléctrico el cual está constituido por dos electrodos arrollados en espiral.

El termohigrómetro es un instrumento de medición de temperatura y humedad del aire atmosférico. La unidad de medida se expresa en porcentaje (%).

**Tabla 1 Sistemas de medición de humedad y punto de rocío.**

Sistema		Precisión	Campo de medida	Ventajas	Desventajas	Aplicación
HUMEDAD	Cabello	3-5 %	15-95 % H.R.	Útil hasta 70%	Poca precisión	Aire
	Bulbo seco y húmedo	1-2 %	0-100 % H.R.	Útil hasta 100°C	Temperatura diferencial Bulbo húmedo	Gases
	Cloruro de litio	$\pm 2$ a $\pm 3$ %	5-95 % H.R.	Útil hasta 70%	Envejecimiento	Gases excepto SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ...
	Polímero	1-2 %	30-90 % H.R.	-	»	»
	Secado térmico	-	0-100 %	Patrón	Lentitud. No apto control	Método patrón en sólidos
	Conductividad	2-3 %	-	Simple Repetitivo	Estado superficie	Sólidos
	Capacidad	2-3 %	<25 %	Insensible a presión contacto	-	-
	Infrarrojos	$\pm 1$ %	0-100%	Sin contacto	Caro	Papel
	Radiación	$\pm 1$ %	0-100%	»	Caro, inspección. Seguridad.	Papel, materiales granulares
PUNTO DE ROCIO	Cámara de niebla	Método de niebla	-	-	-	Gases
	Cloruro de litio	$\pm 1$ %	-45 a 60°C	Barato	Lento. Envejecimiento no apto para SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ...	Gases excepto SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ...
	Espejo	$\pm 1$ %	-70 a 37°C	Rápido	Caros, gases limpios	Gases limpios
	Analizador infrarrojos	$\pm 1$ %	0-30 000 ppm	Rápido	Caro	Gases

Fuente: Creus, A. (2011). Instrumentación Industrial. México: Alfaomega.

## 2.7 FENOLFTALEÍNA

La fenolftaleína es un compuesto químico orgánico que se obtiene por reacción del fenol ( $C_6H_5OH$ ) y el anhídrido ftálico ( $C_8H_4O_3$ ) en presencia del ácido sulfúrico (Murcia, 2010)

La Fenolftaleína preparada en solución es incolora; cuando se le agrega una solución ácida permanece incolora y cuando se le agrega una solución básica (alcalina) cambia una tonalidad a rosa (tabla 2). Es por eso que se llama indicador ácido-base. Su punto de viraje ocurre alrededor del pH de 8.2-8.3, realizando la transición cromática de incoloro a rosado.

**Tabla 2 Indicador de pH**

Fenolftaleína (indicador PH)		
pH abajo de 8.2	pH entre 8.0 y 10.0	pH entre 10.0 y 12.0
incolora	rosa	carmín o roja

*Nota: Elaboración propia.*

El ensayo más común para la determinación del valor de pH del concreto es el test de la fenolftaleína. El test consiste en rociar un concreto recién fracturado (es decir, no expuesto anteriormente al aire) con una solución al 1% de fenolftaleína en hidro-alcohol (70% de alcohol y 30% de agua). Si el color del concreto vira a un púrpura intenso se interpreta como no carbonatado y si no cambia de color se supone carbonatado. (Fernández, 2014)

## 2.8 CÁMARA DE CARBONATACIÓN

La carbonatación del concreto de acuerdo con Sánchez et al. (2003), es un aspecto muy preocupante dadas las graves consecuencias que puede acarrear derivadas de la corrosión de las armaduras responsables por ejemplo, de las estructuras de las edificaciones.

Teniendo en cuenta que los procesos de corrosión del acero en el concreto armado pueden ser muy variados debido a que: el tiempo de aparición de una patología se puede

manifestar después de cinco o más años, la dificultad para estudiar el comportamiento de los materiales de construcción puestos en obra y además que la iniciación de la corrosión generalizada no puede evaluarse por simple inspección visual, por lo cual se requiere de un diseño y construcción de un sistema de penetración acelerada de CO<sub>2</sub> a nivel de laboratorio. (Ocampo, y otros, 2010)

Las pruebas de carbonatación acelerada requieren un sistema capaz de simular y mantener condiciones estables y constantes en el tiempo de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono que reaccione con el concreto, de manera que se puede estudiar el efecto sobre la armadura a dichas condiciones. Además, debe disponer de una fuente de aire comprimido, una torre de humidificación, un soporte para los especímenes, así como sistemas de control de flujo y presión, etc.

La cámara de carbonatación permite evaluar diferentes factores inherentes al diseño de la mezcla del concreto, como son: las relaciones de agua/cemento (a/c), tipos de agregado tanto fino como grueso (ajustados a las normas COVENIN 0263-78, COVENIN 0268-78, AASHTO T85, ASTM C29-91, ASTM C127-88(93), ASTM C128-93), cambios en el tipo de material cementante utilizado (ASTM C-150), así como también, la adición de aditivos químicos a la mezcla (ASTM C 618-98, ASTM C 1240-98).

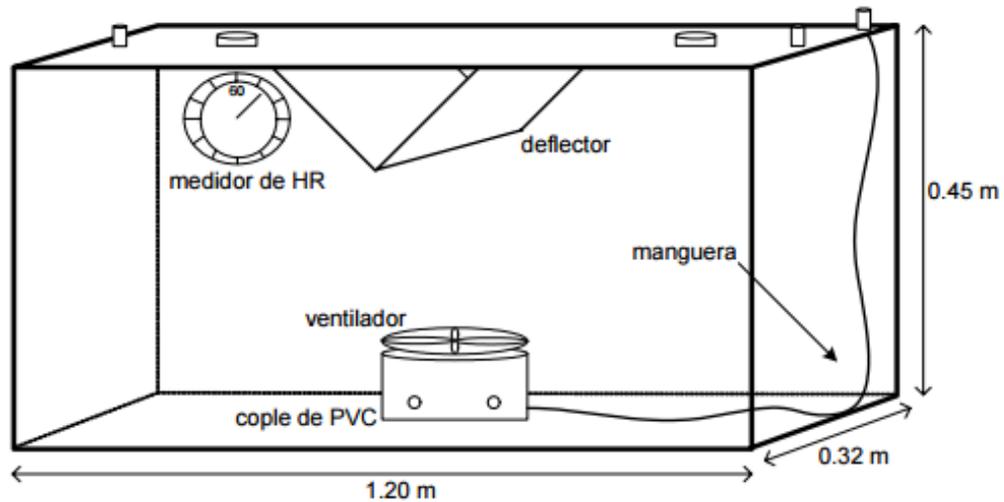
Una cámara de carbonatación de acuerdo con Galán (2011) es un dispositivo el cual simula un ambiente con altas concentraciones de dióxido de carbono, y así acelerar el proceso de carbonatación en el concreto. Maneja estándares de temperatura muy variados, dado que su finalidad es simular las condiciones de los distintos ambientes alrededor del planeta.

Las pruebas de carbonatación acelerada requieren un sistema capaz de simular y mantener condiciones estables y constantes en el tiempo de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono que reaccione con el concreto, de manera que se puede estudiar el efecto sobre la armadura a dichas condiciones (Sánchez et al., 2003)

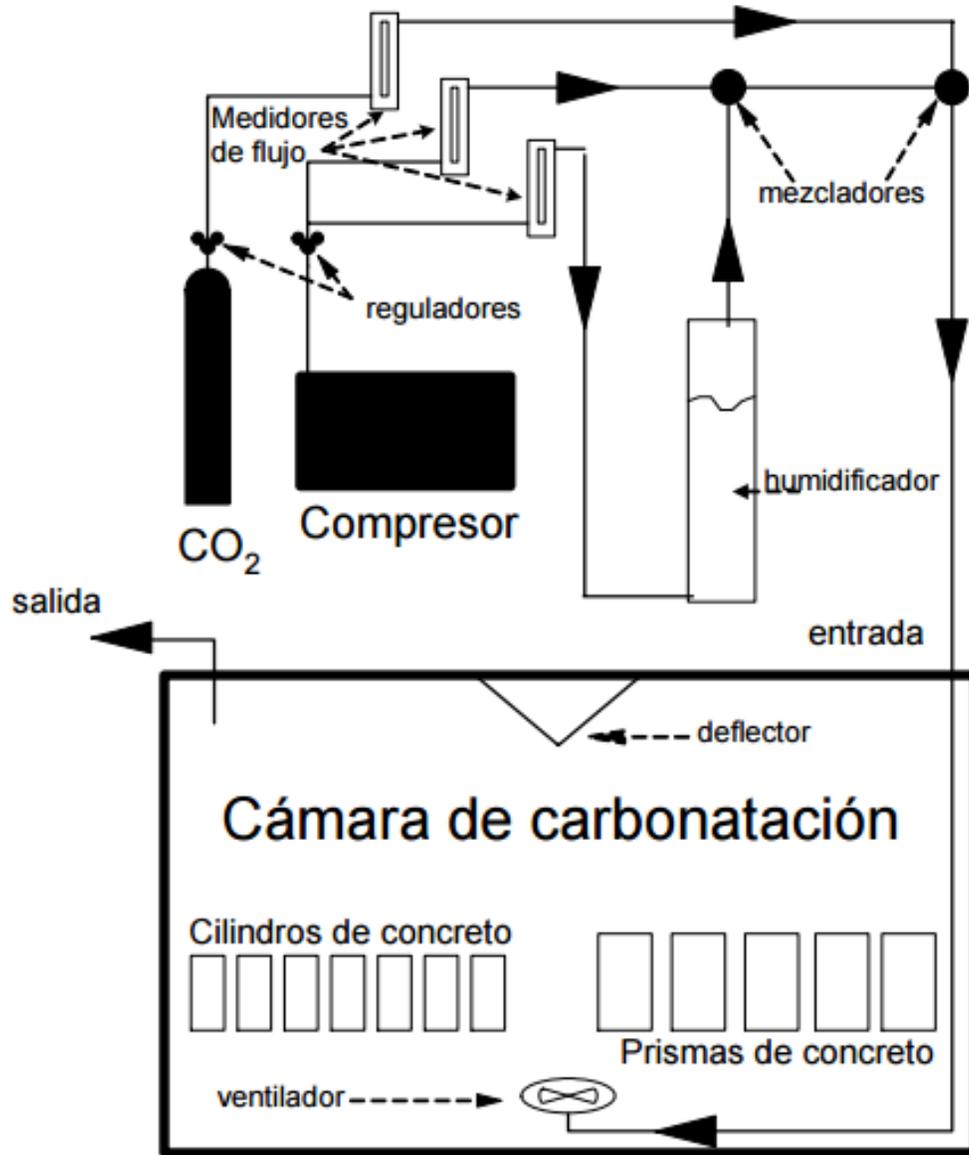
El diseño (incluyendo el tamaño) y la construcción detallada del aparato son únicos y dependen de los requerimientos en cada caso. Dado el desconocimiento de información en cuanto a este sistema de carbonatación, se tomó como referencia la norma NOM-021-

REC NAT-2000 que se aplica a cámaras de niebla salina UNE-EN\_13295:2005 que describe las condiciones de carbonatación (siendo esta una norma europea). Del mismo modo el material de construcción seleccionado debe ser resistente al medio corrosivo, y el tamaño de la cámara se establece en función del número y tamaño de los especímenes a ser probados (Sánchez et al., 2003).

La cámara de carbonatación debe de estar conformada por una recámara totalmente hermética y cuyo material interno sea resistente a la corrosión, será necesario que cuente con entradas para los fluidos (CO<sub>2</sub> y humedad). Además (figuras 10 y 11), debe disponer de una fuente de aire comprimido, una torre de humidificación, un soporte para los especímenes, así como sistemas de control de flujo y presión (López, 1997).



**Fig. 10** Cámara de Carbonatación (Moreno, Domínguez Lara, Cob Sarabia, & Duarte Gómez , 2004).



**Fig. 11** Esquema del sistema de una cámara de carbonatación (Moreno, Domínguez Lara, Cob Sarabia, & Duarte Gómez , 2004).

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 HABILITACIÓN DE LA CÁMARA DE CARBONATACIÓN

Para efectos de este trabajo se diseñó un sistema de humidificadores y medición de humedad que se adaptaron a una cámara de carbonatación, con fines prácticos para alumnos de ingeniería civil en laboratorios de la UAEH, con el propósito de crear un ambiente de humedad para realizar las pruebas de carbonatación acelerada en el concreto.

Para crear el sistema de humidificadores se realizaron diferentes pruebas que permitieron llegar a un diseño específico y práctico de utilizar. En función de las necesidades de la cámara de carbonatación se comenzaron las pruebas propuestas para poder definir un modelo de sistema de humidificación que pudiera ser adaptado a la cámara de carbonatación.

Prueba 1: consta de un recipiente de plástico con capacidad de 19 litros con tapa (Fig. 12) y una resistencia eléctrica de aluminio de 110 v para calentar agua. Para esta prueba se colocó agua en el recipiente hasta cubrir la resistencia, al calentar el agua y que esta comience su ebullición la humedad sube en forma de vapor sin embargo, es necesario cubrir el recipiente para no contaminar el agua y esto da como resultado el hecho de que el vapor no suba y salga por el orificio hecho en la tapa del recipiente por lo cual se rechaza la primera prueba que no cumple las necesidades requeridas para el sistema de humidificación.



**Fig. 12** Recipiente de plástico resistente a la temperatura.

Prueba 2: se sabe que los sistemas de los nebulizadores de uso médico convencionales generan, por medio de un compresor, partículas finas y mediante el rocío proporcionan la humedad. En este caso (fig. 13) se usa agua y un nebulizador con compresor para realizar la prueba siendo esta satisfactoria en cuanto a la obtención de la humedad sin embargo, la capacidad máxima del recipiente es insuficiente para los requerimientos de la cámara de carbonatación lo que origina que la prueba dos tampoco sea el sistema que se requiere originando una tercera prueba.



**Fig. 13** Nebulizador con compresor.

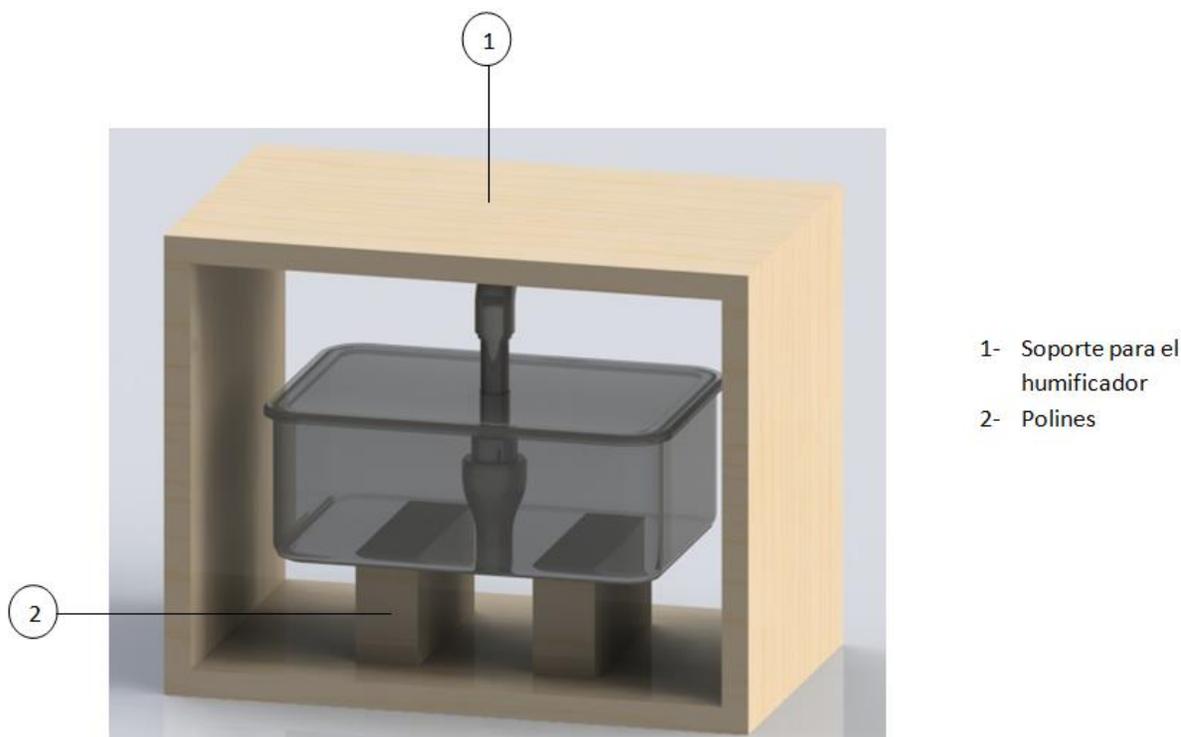
Prueba 3: se retoma la prueba dos haciéndole un cambio en el almacenamiento del agua, para esto se requiere un recipiente de mayor tamaño donde se pueda colocar en el interior el kit del nebulizador (altura mínima de 8 cm), en la fig. 14 se usa un recipiente de plástico de 21 cm de largo por 14 cm de ancho por 8 cm de alto con capacidad de almacenamiento de 2200 ml; para colocar el kit es necesario hacer una perforación al centro de la base del recipiente y otra al centro de la tapa donde van la conexión al compresor y la salida de humedad. Esta prueba cumple con los requerimientos de un sistema de humidificación pero es insuficiente su tamaño para toda la cámara de esta manera se deciden hacer cuatro humidificadores iguales.



**Fig. 14** Prototipo 3.

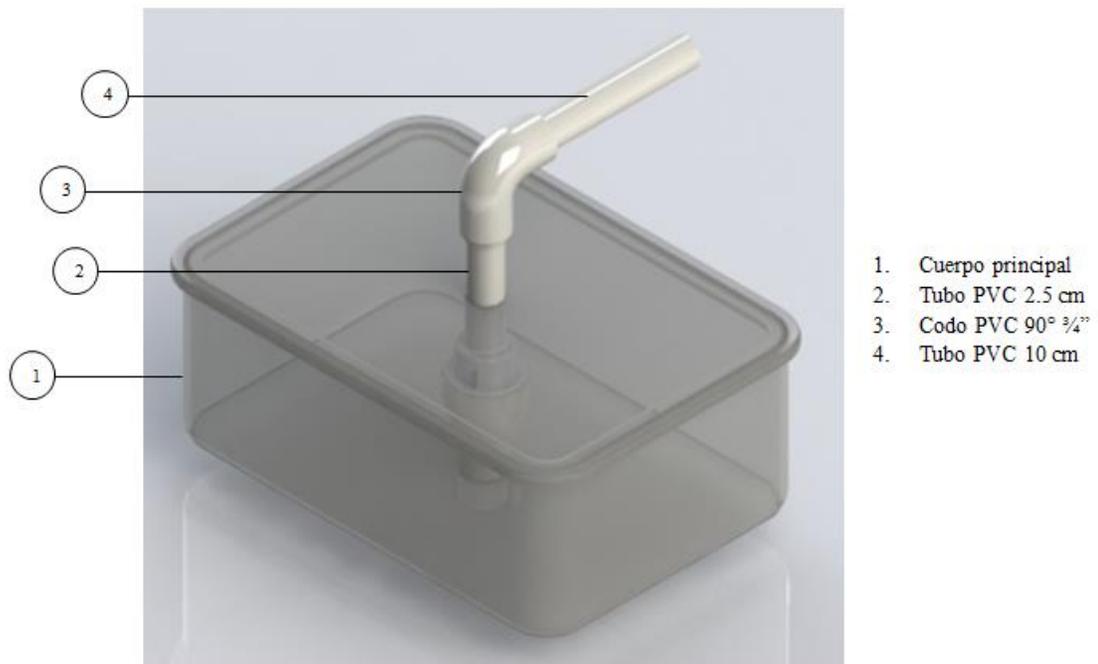
Es así como se define el prototipo final del sistema de humidificación para la cámara de carbonatación y se comienza a trabajar el diseño para el acondicionamiento a la cámara.

El diseño de del sistema de humidificadores (fig. 15) se realizó mediante Solidworks que es un software CAD (Diseño asistido por computadora) y la manufactura de estos por sistemas convencionales; consta de 4 humidificadores y cada uno de ellos formado de la siguiente manera:

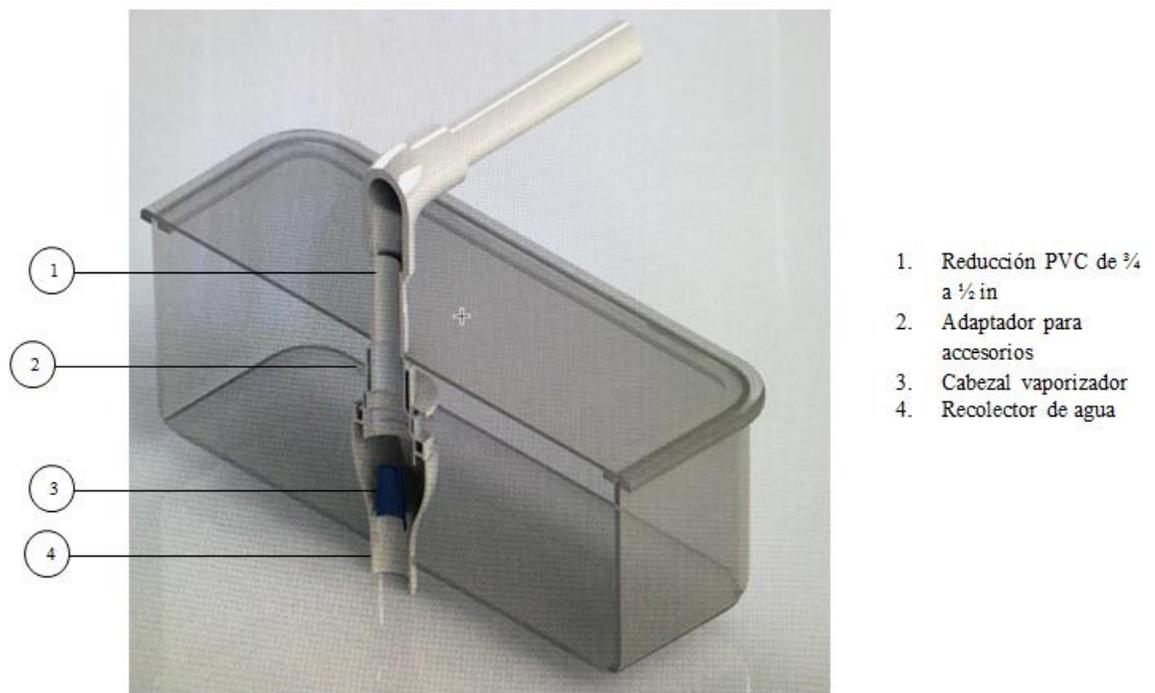


**Fig. 15** Humidificador (Elaboración propia).

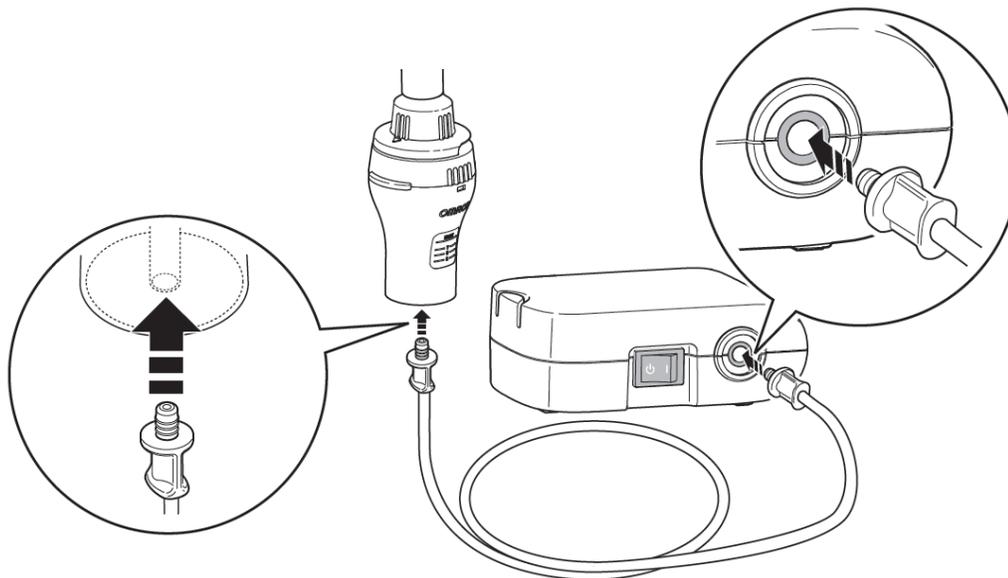
Un cuerpo principal (Figs.16-18), su finalidad es almacenar el agua necesaria para generar el vapor, un compresor con adaptador (Fig.18) CA 100 – 240V ~ 50/60 Hz a DC 6V y tubo de aire.



**Fig. 16** Cuerpo principal con conexión PVC (Elaboración propia).



**Fig. 17** Corte trasversal del humidificador (Elaboración propia).

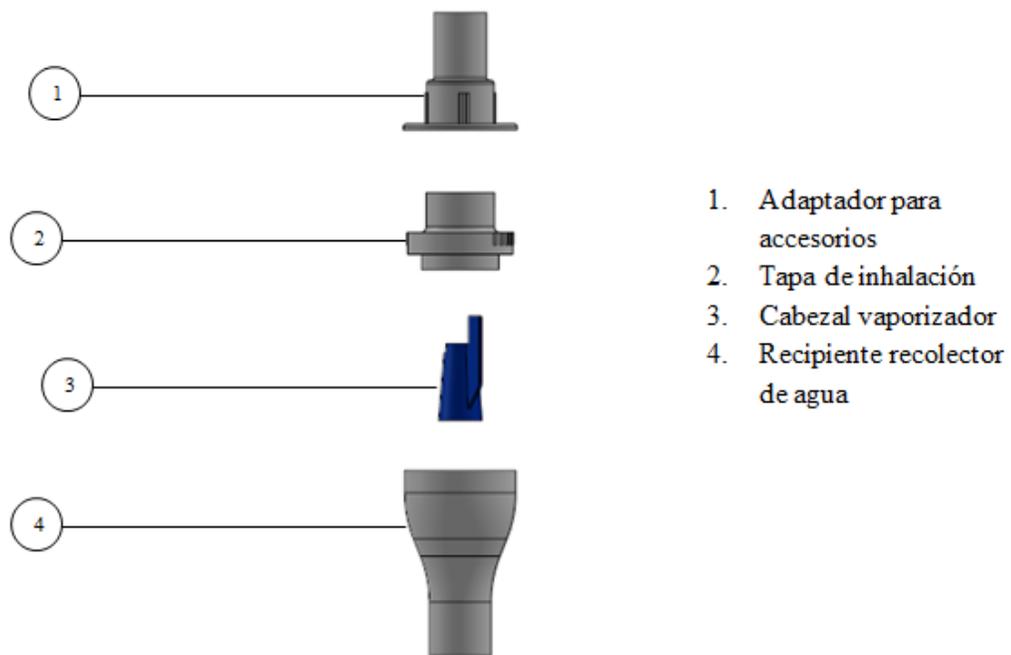


**Fig. 18** Colocación del tubo de aire al sistema y al compresor (Fuente: OMRON. (2013). *Manual de instrucciones NE-C802*, China).

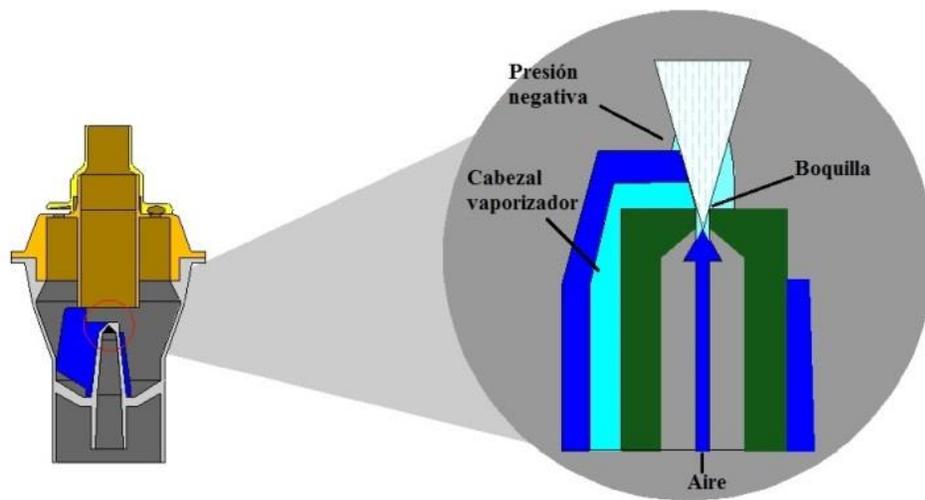
Un kit de humidificación (Fig.19) utilizando el funcionamiento de la tecnología DAT (Fig.20) con velocidad aproximada de 0.25 ml/min (por pérdida de peso) con un diámetro de masa media aerodinámica (MMAD) de 3  $\mu\text{m}$  en base a la norma UNE-EN13544-1:2007, con temperatura de funcionamiento +10°C a +40°C, humedad 30% a 85% RH y presión de aire 700 hPa a 1060 hPa.

La finalidad de utilizar cuatro humidificadores es para poder abastecer a un 100% la cámara de carbonatación y poder alcanzar una RH de 70%  $\pm 10$  que permitirá una rápida carbonatación.

La cámara de carbonatación tiene unas dimensiones de 118 cm de alto por 178 cm de ancho por 96 cm de profundidad, con capacidad para 20 especímenes de concreto en forma cilíndrica que ocupan un volumen de 9424.8  $\text{cm}^3$  (20cm de diámetro x 30 cm de altura) o de 4 vigas con un volumen de 13500  $\text{cm}^3$  (15cm x 15cm x 60cm). En promedio se establece que el volumen ocupado por el gas no debe ser menor de 2.5 veces el volumen del sólido.



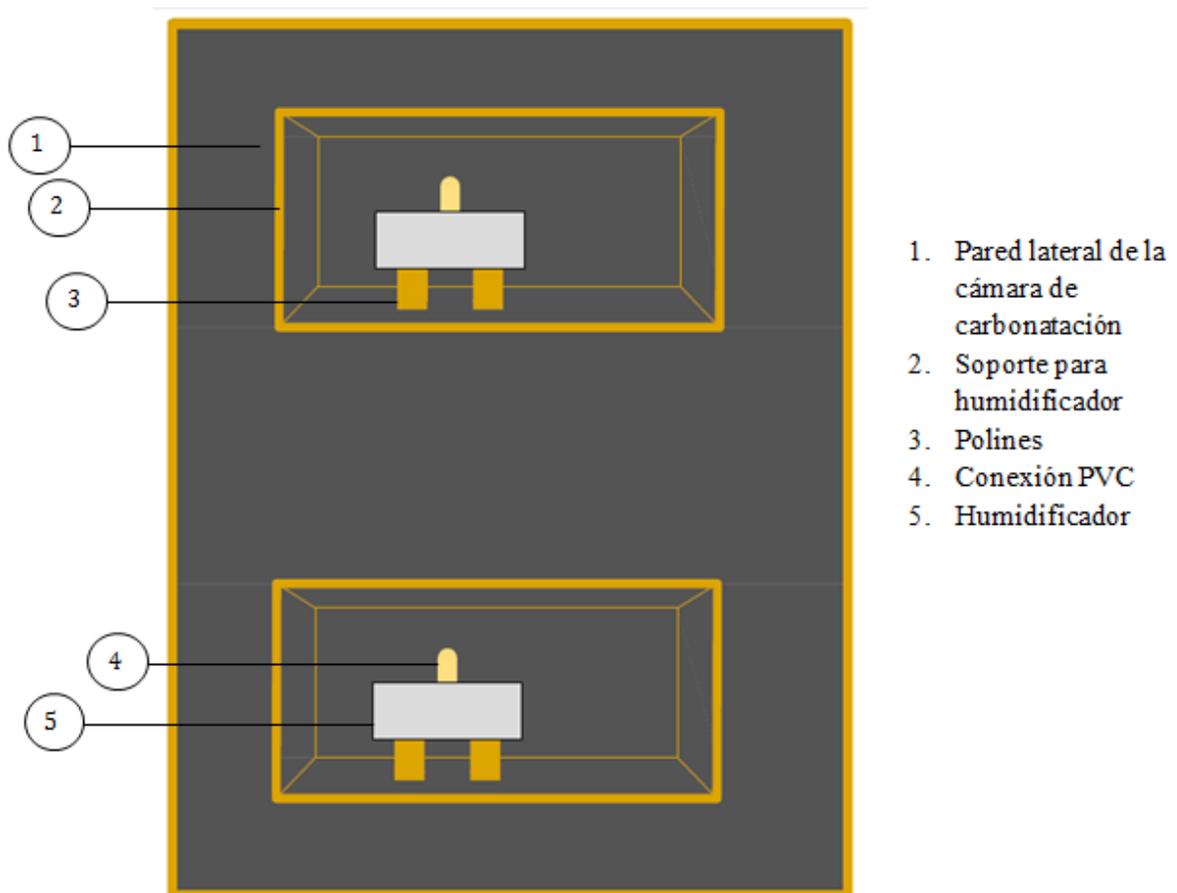
**Fig. 19** Kit humidificador explosionado.



**Fig. 20** Tecnología de atomización directa.

En sus cubiertas laterales se realizó la adaptación de las repisas que sostienen los sistemas de humidificación, uno sobre otro como se muestra en la figura 21, en donde por medio de unos orificios, en los cuales se introducen los tubos de PVC, se conectan a los humidificadores con la cámara de carbonatación. Estas adaptaciones se encuentran herméticamente selladas.

Cada dispositivo de humedad tiene un almacenamiento de agua con capacidad de 250 ml para un uso de 3 h.



**Fig. 21** Esquema de la Cubierta lateral de la cámara de carbonatación con la adaptación de los sistemas de humidificación (Elaboración propia).

Para el monitoreo de la temperatura y la humedad (fig. 22) se debe colocar un termohigrómetro digital con un rango de medición de 10%RH ~ 99% RH  $\pm 5\%$  y un rango de temperatura de  $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$  ( $-58^{\circ}\text{F} \sim +158^{\circ}\text{F}$ )  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 2^{\circ}\text{F}$ ), de dimensiones 48mm x 28.6mm x 15.2mm.



**Fig. 22** Termohigrómetro digital con sonda (dispositivo real).

### **3.2 PARÁMETROS EXPERIMENTALES**

Para llevar a cabo el acondicionamiento de la cámara y poder realizar las pruebas correspondientes para el funcionamiento de cada equipo de humidificación, utilizando los diagramas correspondientes de cada pieza, primero se realizó la adaptación y armado del kit humidificador con la finalidad de que pueda tener un almacenamiento de agua mayor, esto para que su funcionamiento continuo sea por más tiempo, después de esto se trabajó sobre la base principal de los humidificadores y se unieron las piezas sellándolas perfectamente para evitar fugas; es importante señalar que los recipientes deben de tener una salida de aire para evitar el efecto de vacío y el vapor que logra la RH pueda tener un mayor flujo.

Para probar el funcionamiento del sistema de humidificación (fig. 23) se realizó una prueba que garantizan el rendimiento del compresor y el buen funcionamiento del humidificador.



**Fig. 23** Pruebas preliminares (Dispositivos reales).

Se realizó un monitoreo de tres horas durante tres días. Los resultados obtenidos fueron de una duración de 3 horas continuas trabajando, esto quiere decir que a su máxima capacidad de fluido los humidificadores requieren ser abastecidos 3 horas después de haber iniciado su funcionamiento.

Una vez realizada la prueba preliminar se dio paso al sellado de todo el equipo para evitar cualquier tipo de fuga y poder ser instalado en la cámara de carbonatación.

Para la prueba se requiere utilizar agua pura (desionizada, llamada así por el proceso de purificación) ya que está se encuentra libre de minerales que pudieran alterar el resultado en los especímenes de concreto.

### 3.3 ELABORACIÓN DE LOS SISTEMAS DE HUMIDIFICACIÓN

La elaboración de los sistemas de humidificación no requiere de una gran cantidad de materia prima, esta se muestran a continuación en la tabla 3; cuando se trabajan los materiales se enumeran por número de pieza para llevar un control más exacto en los cursogramas analíticos que indican el armado de los humidificadores (tabla 4).

**Tabla 3 Materiales a utilizar**

Cantidad	Material	Especificaciones	Imagen
4	Recipiente transparente con tapa	Dimensiones: 22 x 15 x 8.5 cm (2200 ml)	
4	Nebulizador con compresor	Marca Omron NE-C802	
8	Reductor de PVC	Medidas 3/4" a 1/2"	
4	Codo PVC	Medidas 90° 3/4"	
1	Tubo PVC	Medidas 6 m largo 1/2"	

**Tabla 4 Lista de piezas por cada humidificador**

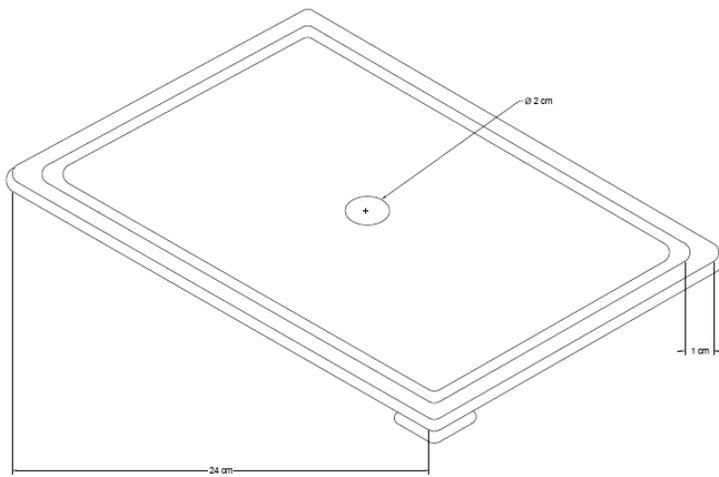
Pieza No.	Nombre	Cantidad/ Unidades	Material	Dimensiones	Fabricar o comprar
1	Cuerpo principal	1	Plástico	22 x 15 x 8.5 cm	Fabricar
2	Kit humidificador	1	Plástico	NA	Fabricar
2.1	Adaptador para accesorios	1	Plástico	NA	Comprar
2.2	Tapa de inhalación	1	Plástico	NA	Comprar
2.3	Cabezal vaporizador	1	Plástico	NA	Comprar
2.4	Recipiente recolector de agua (base)	1	Plástico	NA	Fabricar
3	Reductor	2	PVC	$\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ in	Fabricar
4	Codo	1	PVC	$90^\circ \frac{3}{4}$ in	Comprar
5	Tubo	1	PVC	10 cm	Fabricar
5.1	Tubo	1	PVC	2.5 cm	Fabricar

Para tener una ayuda visual de los sistemas de humidificación se elaboraron los siguientes planos para la manufactura y armado de los materiales así como los cursogramas analíticos que explican paso a paso el proceso de producción de los sistemas de humedad.

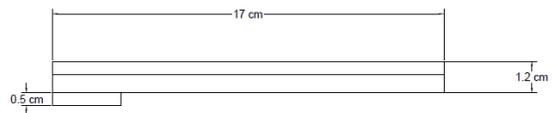
Para la fabricación del cuerpo principal solamente se requiere hacer dos perforaciones en el material, una en la base y otra en la tapa y ambas perforaciones deben de estar centradas. La herramienta a utilizar es el taladro junto con una broca y una muela abrasiva para lograr el diámetro de las especificaciones.

El Kit humidificador únicamente requiere dos cortes en la base donde se almacena el agua estos se hacen a la altura del medidor del líquido con la finalidad de ampliar el almacenamiento del agua, posterior a esto solamente es necesario armar el kit y colocarlo en las perforaciones del cuerpo principal.

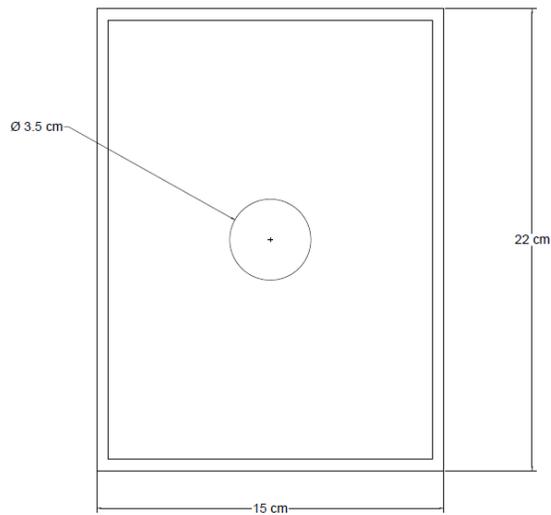
La conexión de PVC requiere que se corten los tramos de tubo PVC y posteriormente es pegado con cemento especial para material de PVC. Se puede utilizar un arco con segueta para realizar los cortes.



Tapa del cuerpo principal

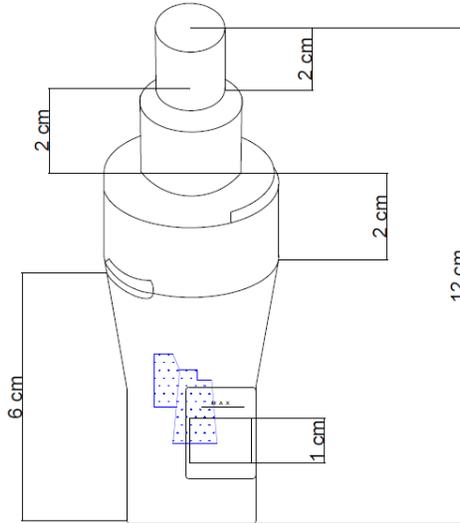


Vista frontal tapa

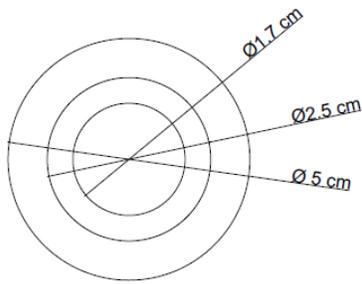


Vista superior del cuerpo principal

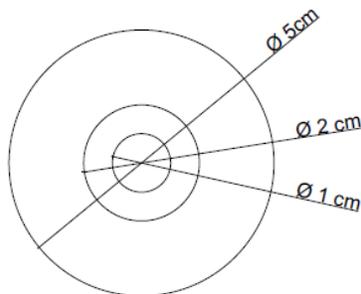
	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo		Hoja No.	1
			Escala	1:1
Nombre	Pieza 1 Cuerpo Principal		A4	
Elaboro	A. Ivan Mateos Ortega		Acotacion	cm
	Maria Jose Rodríguez Barranco			



Pieza 2 Kit Humidificador (dimensiones)

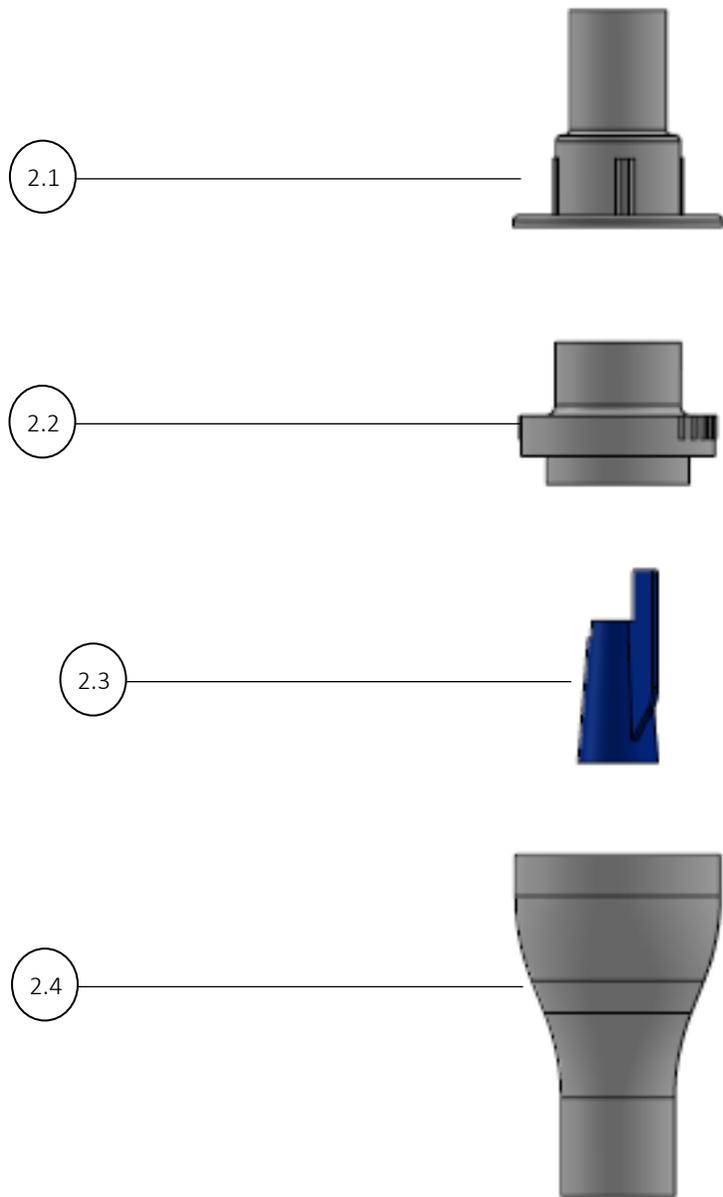


Vista superior del kit humidificador (dimensiones)

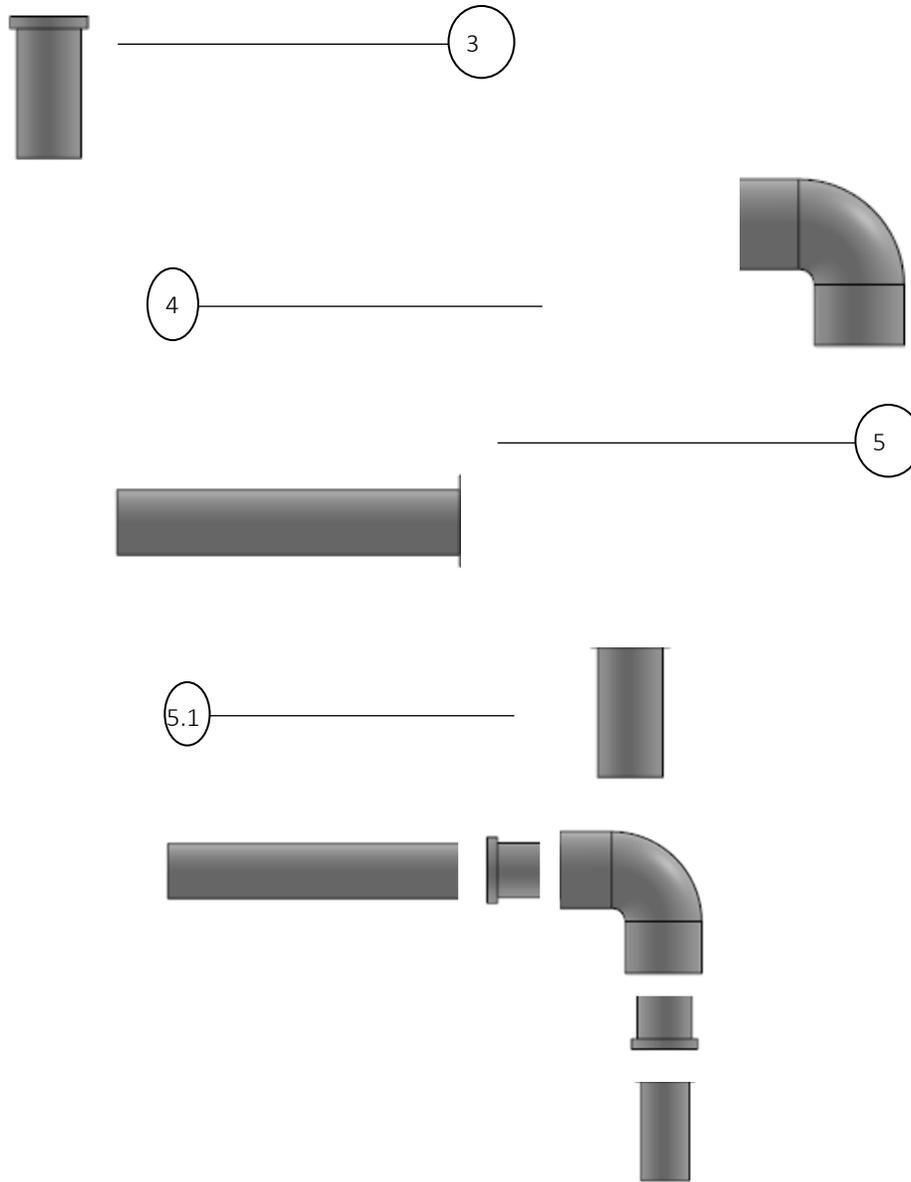


Vista inferior del Kit Humidificador (dimensiones)

 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	Hoja No.	2
	Escala	1:1
Nombre	Pieza 2 Kit Humidificador	
Elaboro	B. Ivan Mateos Ortega	Acotacion
	Maria Jose Rodríguez Barranco	
		A4
		Cm



	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo		Hoja No.	3
			Escala	1:1
Nombre	No. De pieza Kit Humidificador explosinado		A4	
Elaboro	A. Ivan Mateos Ortega		Acotacion	Cm
	Maria Jose Rodríguez Barranco			



Conexión PVC explosionada

 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	Hoja No.	4
	Escala	1:1
Nombre	No. De pieza Conexión PVC	
Elaboro	A. Ivan Mateos Ortega	Acotacion
	Maria Jose Rodríguez Barranco	
		A4
		Cm

Una vez elegido el diseño junto con los materiales a utilizar para la elaboración de los sistemas y para dar inicio a la manufactura y ensamble, se requiere elaborar un diagrama de operaciones que explica de forma breve las operaciones principales a realizar.

Partiendo del diagrama de operaciones y de manera más específica se elaboran los respectivos cursogramas analíticos que explican de manera detallada las cinco actividades principales del proceso de manufactura en la ingeniería industrial (operación, transporte, espera o demora, inspección y almacenamiento) se desarrolla un cursograma analítico por cada pieza esencial en el ensamble con el número de páginas necesario, esto con la finalidad de que sea totalmente explicado para el operario la manera de realizar la operación o de manipular el material y el equipo a utilizarse.

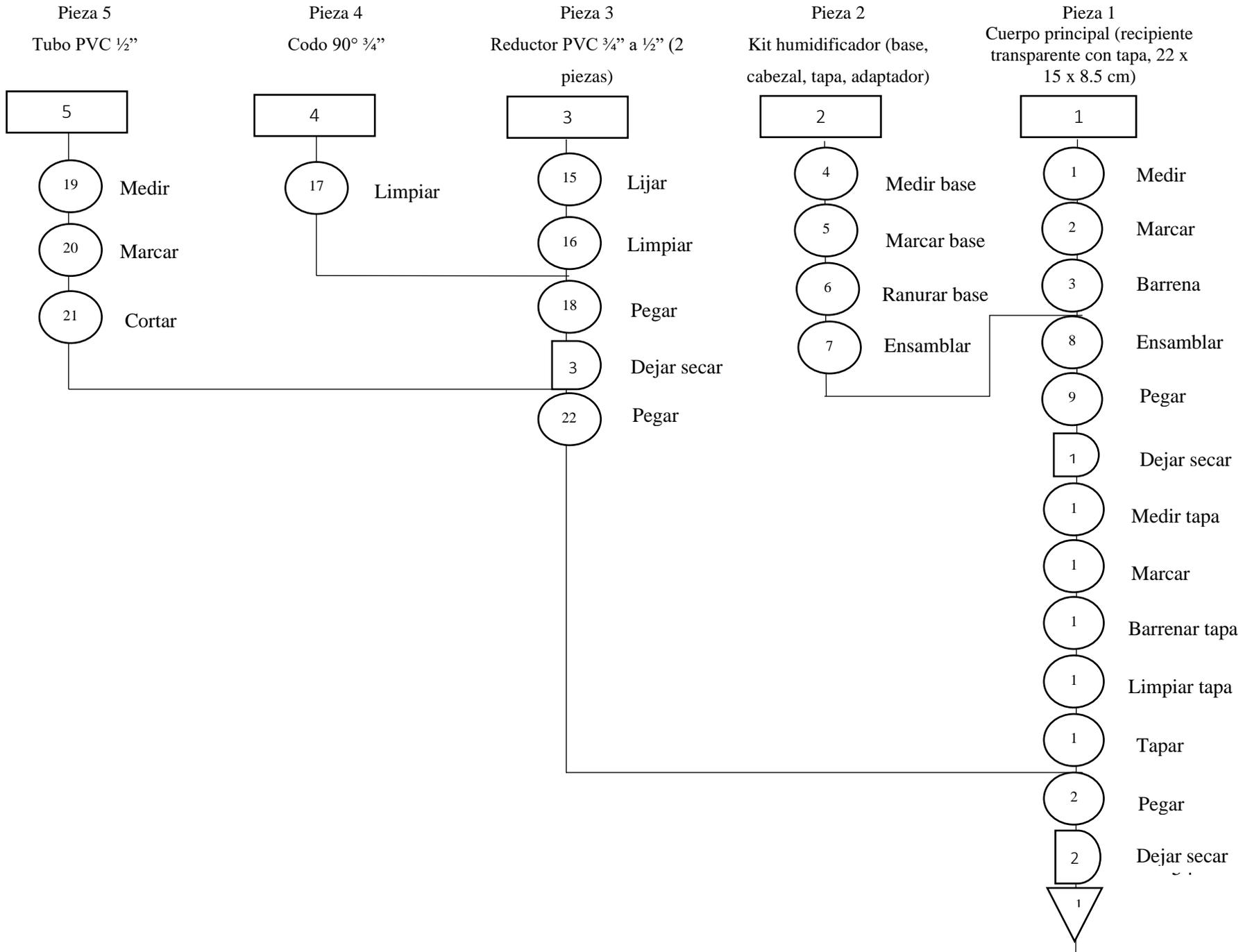
Cada diagrama muestra el tiempo medido para realizar las operaciones y los recorridos que se hacen en los traslados de materiales, de igual manera se especifica que material, herramienta y utillaje es requerido en cada actividad. El tiempo promedio para cada operación se decide a base de la medición de tiempos y movimientos tomados al hacer el prototipo experimental; para la medición del recorrido se toma en cuenta el área de trabajo (laboratorio del área académica) desde la llegada de cada material hasta que pasa al proceso de ensamble en la cámara de carbonatación.

A continuación, se muestran los diagramas utilizados para la elaboración de los cuatro humidificadores que forman el sistema adaptado a la cámara de carbonatación.

#### Simbología

	Operación.
	Inspección.
	Demora o espera.
	Transporte.
	Almacenamiento.

# Diagrama de operaciones



Cursograma Analítico				Operador / Material / Equipo					
Diagrama no. 1 Hoja: 1 de 3				Resumen					
Producto: Pieza no. 1 (Cuerpo principal)				Actividad				Total	
Actividad:				Operación	○				7
Manufactura y Ensamble				Inspección	□				2
				Espera	◐				0
				Transporte	⇒				4
				Almacenamiento	▽				0
Lugar: Laboratorio de manufactura				Distancia (m)				8 m	
Operario(s): Mateos Ortega Ángel Iván, Rodríguez Barranco María José				Tiempo (min. -hombre.)				11.5 min	
Descripción	Cantidad (pza.)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Actividad					Observaciones
				○	□	◐	⇒	▽	
Llegada del producto 1 (cuerpo principal) al área de trabajo.	4	3	1						
Verificar que el recipiente sea transparente y la tapa correspondiente.			2						Con dimensiones de 22 x 15 x 8.5 cm Para 2200 ml
Transportar el flexómetro y plumón al área de trabajo previa para su operación	1	1	0.5						
Tomar el flexómetro y plumón previamente dispuestos en la mesa de trabajo	1		0.2						
Medir al centro del recipiente en la parte inferior un diámetro de 3.5cm			1						Utilizar flexómetro
Con el plumón trazar la marca donde se hará el barrenado, previamente medido con el flexómetro			1						
Transportar el taladro al área de trabajo	1	1	1						
Enchufar el taladro a la toma de corriente.			0.5						
Sujetar fuertemente con una mano el recipiente transparente, para después ser barrenado			0.2						
Encender el taladro y barrenar un diámetro de 3.5 cm			0.1						
Inspeccionar la circunferencia barrenada del recipiente transparente y que este con las medidas deseadas.			2						
Limpiar el desperdicio ocasionado			1						
Transportar el producto 2 (kit humidificador) al área de trabajo	4	3	1						
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>11.5</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	

Cursograma Analítico				Operador / Material / Equipo					
Diagrama no. 1 Hoja: 2 de 3				Resumen					
Producto: Pieza no. 1 (Cuerpo principal)				Actividad				Total	
Actividad:				Operación	○				11
Manufactura y Ensamble				Inspección	□				1
				Espera	◐				1
				Transporte	⇒				1
				Almacenamiento	▽				0
Lugar: Laboratorio de manufactura				Distancia (m)				1 m	
Operario(s): Mateos Ortega Ángel Iván, Rodríguez Barranco María José				Tiempo (min. -hombre.)				19.9 min	
DESCRIPCIÓN	Cantidad (pza.)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Actividad					OBSERVACIONES
				○	□	◐	⇒	▽	
Separar el kit humidificador (pieza 2)	4		0.5	●					
Ensamblar a presión la base recolectora de agua de la pieza 2 con el orificio originado en la base del recipiente.			1	●					
Transportar el pegamento instantáneo y bicarbonato de sodio al área de trabajo.	1	1	0.5				●		Se recomienda utilizar kola loka en gota.
Colocar el pegamento sobre la unión de la pieza 1 con la pieza 2.			0.2	●					
Inmediatamente después de colocar el pegamento adicionar bicarbonato de sodio creando una mezcla firme alrededor de la unión.	1		0.2	●					Esto se hace para una mejor fijación
Dejar secar para que el pegamento haga efecto.			10				●		
Tomar la tapa del recipiente transparente.			1	●					
Tomar el flexómetro y plumón en la mesa de trabajo.	1		0.5	●					
Medir al centro de la tapa del recipiente transparente un diámetro de 2 cm.			1	●					Utilizar el flexómetro
Con el plumón trazar la marca donde se hará el barrenado, previamente medido con el flexómetro.			1	●					
Encender el taladro y barrenar el diámetro marcado.			0.5	●					
Inspeccionar la circunferencia barrenada de la tapa del recipiente transparente y que este con las medidas deseadas.			2	●					
Limpiar el desperdicio ocasionado.			1	●					
Armar el kit humidificador.	4		0.5	●					
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>19.9</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	





Cursograma Analítico				Operador / Material / Equipo					
Diagrama no. 3 Hoja: 1 de 1			Resumen						
Producto: Pieza no. 3 (Reductor PVC)			Actividad			Total			
Actividad: Manufactura y Ensamble			Operación	○	7				
			Inspección	□	2				
			Espera	◐	1				
			Transporte	⇨	5				
			Almacenamiento	▽	0				
Lugar: Laboratorio de manufactura			Distancia (m)			9 m			
Operario(s): Mateos Ortega Ángel Iván, Rodríguez Barranco María José			Tiempo (min. -hombre.)			52.5 min			
DESCRIPCIÓN	Cantidad (pza.)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Actividad					OBSERVACIONES
				○	□	◐	⇨	▽	
Llegada del producto 3 (Reductor PVC) al área de trabajo.	8	3	1						
Verificar que el Reductor PVC tenga las medidas de 3/4" a 1/2"			2						
Transportar una lija de agua a el área de trabajo	1	1	0.5						
Lijar la parte interior de los reductores de PVC			15						
Limpiar el área lijada con un trapo húmedo.			1						
Transportar el cemento para PVC al área de trabajo	1	1	1						
Transportar codo PVC de 90°	4	1	0.5						
Colocar cemento para PVC en el área lijada de los reductores y en los extremos del codo de PVC			1						
Ensamblar a presión los reductores PVC en los extremos del codo de 90°			1						
Dejar secar el ensamble para poder manipularlo.			12						
Traer la pieza 5 para ser ensamblada	4	3	0.5						
Pegar el tubo PVC con el reductor PVC			2						Utilizar cemento para PVC
Tomar un trapo húmedo en el área de trabajo y limpiar los residuos			1						
Dejar secar para que el cemento para PVC haga efecto.			12						
Verificar el ensamble completo del reductor PVC con el tubo			2						
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>52.5</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	





## CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 SISTEMAS DE HUMIDIFICACIÓN EN LA CÁMARA DE CARBONATACIÓN

Siguiendo las indicaciones de armado y conforme a las especificaciones del material y funcionamiento del equipo los resultados obtenidos fueron cuatro humidificadores instalados en las paredes laterales de la cámara de carbonatación que una vez sellados garantizan que no existirá una fuga de RH en el sistema.

Para hacer la conexión del compresor al humidificador es necesario que la base del kit humidificador salga del recipiente que almacena el agua, los recipientes transparentes permiten la visibilidad para monitorear el nivel del agua (fig. 24).



**Fig. 24** Ensamble del kit humidificador al cuerpo principal (Dispositivo real).

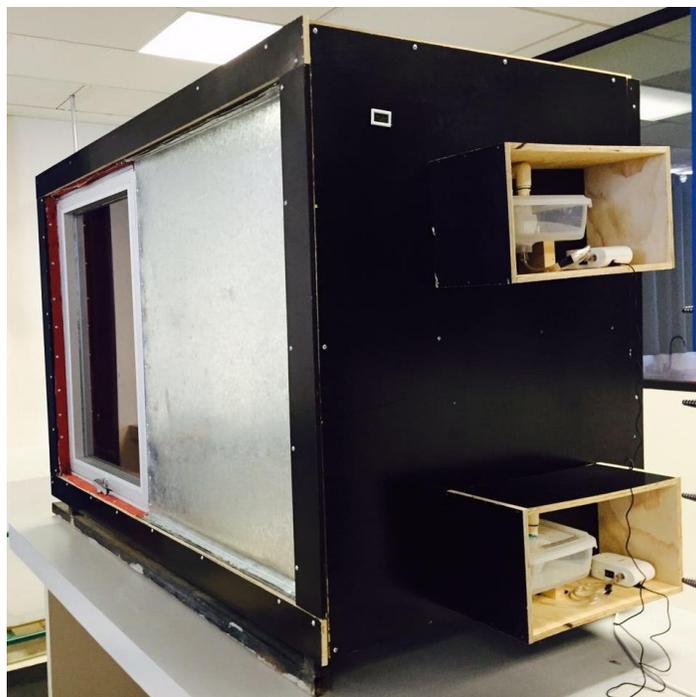
El cuerpo principal de los humidificadores se puede retirar para su limpieza y reabastecimiento quitando la tapa sin tener que quitar la instalación de tubería PVC. Los polines que lo sostienen son con la finalidad de que se pueda conectar al compresor de manera que el tubo de aire no sea doblado y el flujo del aire sea constante.

Para el monitoreo del % de RH abastecido a la cámara de carbonatación se colocó un dispositivo digital (Termohigrómetro) en la pared lateral derecha para facilitar la lectura tanto del % de humedad como la temperatura.

El encendido y apagado de los humidificadores está controlado por medio de temporizadores de funcionamiento mecánico de 24 h, que también permite el paso continuo de corriente (fig. 25) como se ha mencionado son 4 sistemas de humidificación, que están en la cámara de carbonatación (fig. 26).



**Fig. 25** Instalación del Kit humidificador a la cámara de carbonatación (Dispositivo real).



**Fig. 26** Cámara de carbonatación con sistema de humidificación (dispositivo real).

## **4.2 PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE HUMIDIFICACIÓN**

Para realizar las pruebas de humedad en la cámara de carbonatación (fig. 27) se utilizó agua desmineralizada, 250 ml en cada humidificador, es importante no rebasar el límite de llenado puesto que eso provoca un bajo rendimiento en el sistema de humedad. El límite máximo de llenado está indicado en el kit humidificador.



**Fig. 27** Medición del agua desmineralizada.

Una vez llenados los sistemas de humidificación se colocan en su lugar y son encendidos por un lapso de tres horas continuas para su monitoreo y toma de resultados.



**Fig. 28** Humidificador llenado a su máxima capacidad (dispositivo real).

Se realizó la prueba por intervalos de tiempo (sin intervalos de descanso) para confirmar que la humedad proporcionada para el estudio de la carbonatación sea constante durante todo el proceso, los resultados obtenidos fueron los mostrados en las tablas 5, 6 y 7.



**Fig. 29.** Primera lectura del termohigrómetro al iniciar la prueba de humedad.

**Tabla 5. Monitoreo del % de RH por minuto.**

Tiempo (min)	Inicio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% de RH	52	54	57	58	58	59	60	61	63	66	69

Cuando inicia el proceso de humidificación se observa que la humedad va subiendo constantemente cada minuto y que después de 10 minutos llega a la humedad requerida.

**Tabla 6. Monitoreo del % de RH cada 10 minutos.**

Tiempo (min)	Inicio	10	20	30	40	50	60
% de RH	52	69	84	84	87	88	89

Una vez que se alcanza la humedad requerida se observa que el incremento de la humedad se da en un lapso de tiempo mayor y que al paso de una hora ya no está dentro de la tolerancia marcada para la humedad.

**Tabla 7. Monitoreo del % de RH por hora.**

Tiempo (min)	Inicio	1	2	3
% de RH	52	89	92	99

Si se mantiene encendido por un rango de tres horas como se tenía previsto calculando el rendimiento del agua a su máxima capacidad se observa que el incremento de la humedad llega hasta un 100%  $\pm 1$ .

Cuando los sistemas de humedad comienzan a actuar se encuentra una humedad relativa de 52%  $\pm 5$  esta humedad va teniendo un incremento constante y se requiere que dentro de la cámara exista una humedad de 70%  $\pm 10$  es por eso necesario que los humidificadores sean encendidos en lapsos de tiempo iguales con intervalos de descanso para lograr la humedad requerida (Tabla 8).



**Fig. 30** Interior de la cámara de carbonatación con sistema de humidificación encendido (dispositivo real).

**Tabla 8. Monitoreo del % de RH cada 30 minutos con intervalos de descanso.**

Tiempo (h)	Inicio	.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
% de RH	99	99	89	84	80	78	74

Tiempo (h)	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
% de RH	80	77	75	82	79	76	80

*Nota:* ■ tiempo encendido ■ tiempo apagado

Después de las tres horas continuas de monitoreo de humedad y al haber alcanzado una RH de 99% es necesario disminuir la humedad para permanecer en el rango requerido por la bibliografía ( $70\% \pm 10$ ) es por eso que se apaga el sistema de humidificación sin embargo esto no quiere decir que la humedad disminuye en su totalidad solo desciende un porcentaje de esta para estar nuevamente en el rango necesario.

Para mantener la RH en un rango aceptable el sistema de humedad está controlado por medio de temporizadores que cumplen la función de encender y apagar dichos sistemas en intervalos de tiempos predeterminados.

### 4.3. PRUEBAS DE CARBONATACIÓN

Se realizó la prueba de carbonatación sobre 2 cilindros de concreto previamente elaborados con los siguientes parámetros. Tabla 9

**Tabla 9. Parámetros de los especímenes de concreto**

	F'c	A/C	Contaminado con Jal
Cilindro 1	250kg/cm <sup>2</sup>	.45	25%
Cilindro 2	250kg/cm <sup>2</sup>	.45	0 %

Se realizó un corte transversal de los cilindros de concreto para tener la misma muestra representativa dentro y fuera de la cámara de carbonatación y así poder verificar el funcionamiento de esta.



**Fig. 31** Corte transversal de cilindro de concreto.



**Fig. 32** Especímenes de concreto dentro de la cámara de carbonatación en funcionamiento.



**Fig. 33** Monitoreo de flujo de CO<sub>2</sub>.

La cámara de carbonatación permaneció 18 h encendida, simulando lo que en un ambiente normal serían 3 años, con un flujo de CO<sub>2</sub> promedio de 0.15 L/min a una humedad del 70% ± 10, colocando el espécimen contaminado (jal) de lado derecho y el espécimen al 100% de lado izquierdo.



**Fig. 34.** Cilindro 1 sin exposición dentro de la cámara.



**Fig. 35.** Cilindro 1 con exposición en la cámara (18 h).



**Fig. 36.** Cilindro 2 sin exposición dentro de la cámara.



**Fig. 37.** Cilindro 2 con exposición en la cámara (18 h).

#### 4.3.2 CALCULO DE PH

La prueba del pH del concreto se realizó para verificar la presencia del fenómeno de corrosión en el concreto y verificar que existan las condiciones necesarias dentro de la cámara (CO<sub>2</sub> y Humedad) para tener un deterioro acelerado del concreto.

**Tabla 10. Prueba de pH en el concreto.**

	Espécimen sin exposición	Espécimen con exposición de 18hrs.
Cilindro 1	10.30 pH	7.9 pH
Cilindro 2	9.56 pH	7.40 pH



**Fig. 38.** Muestra pulverizada en solución buffer 7.01.



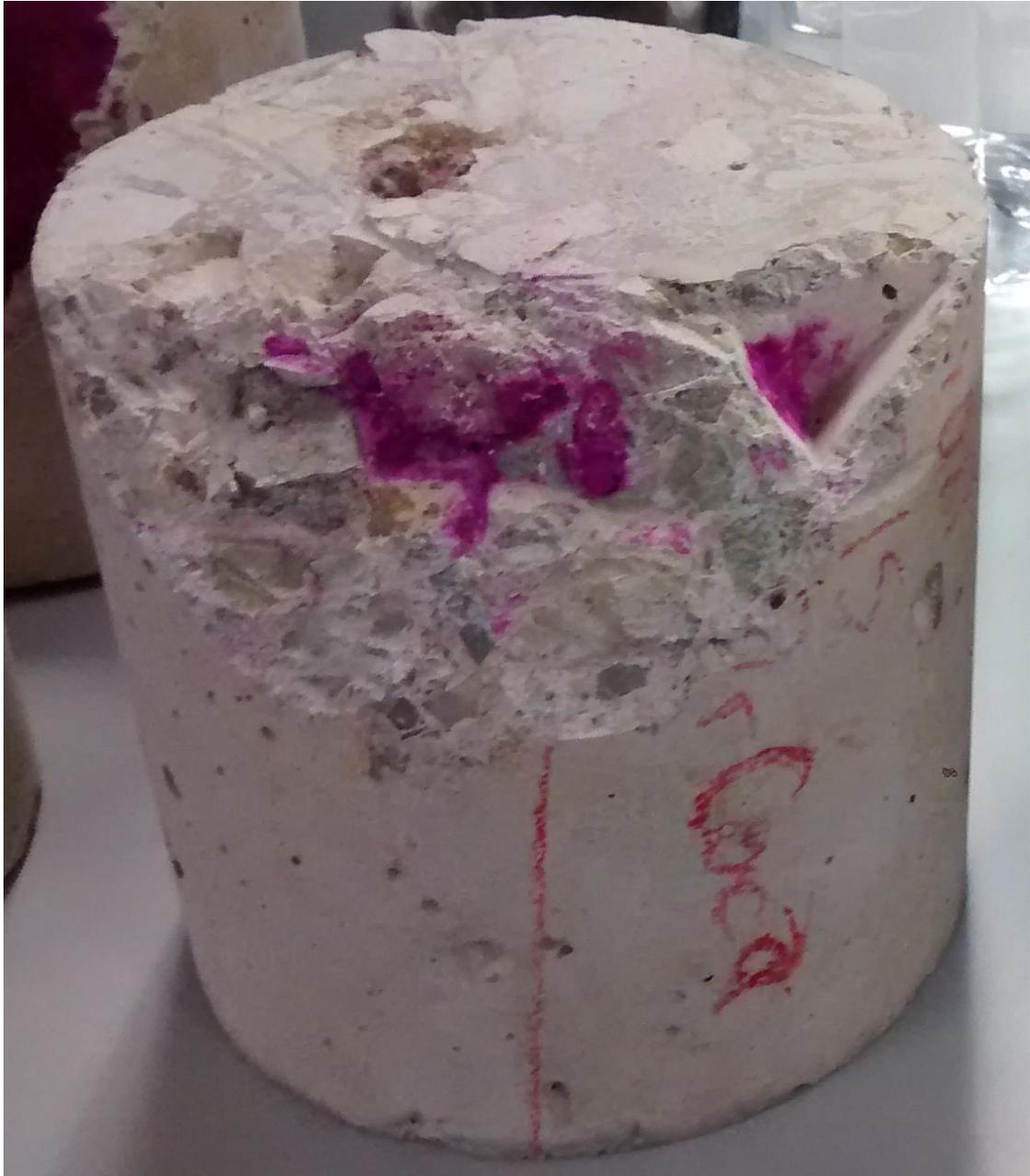
**Fig. 39.** pHmetro (dispositivo real).

#### 4.3.3 FENOLFTALEÍNA

El método más común para determinar la profundidad de carbonatación en concreto es usando un indicador ácido-base de color (solución de fenolftaleína) aplicándola en la superficie del corte en el concreto que se pretende analizar (Anexo 1). Sin embargo, esta técnica sólo indica un valor aproximado de pH, ya que la fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 (Moreno E. , 2006)



**Fig. 40.** Cilindro 1 sin exposición dentro de la cámara (fenolftaleína).



**Fig. 41.** Cilindro 1 con exposición en la cámara (fenolftaleína).



**Fig. 42.** Cilindro 2 sin exposición en la cámara (fenolftaleína).



**Fig. 43.** Cilindro 2 con exposición a la cámara (fenolftaleína).

#### **4.4 RESULTADOS.**

Los resultados arrojados en cada prueba de los sistemas de humidificación permiten establecer los intervalos de tiempo necesarios y la cantidad de agua pura requerida para mantener una RH a un 70%  $\pm 10$  para realizar una prueba de carbonatación acelerada que muestre resultados que tardarían tres años en un ambiente natural en tan solo 18 horas.

El mantener un monitoreo de humedad y temperatura permiten tener un control en el porcentaje de la humedad, lo cual es importante durante la prueba ya que si la humedad disminuye o aumenta considerablemente el fenómeno de la carbonatación no se produciría.

Una vez expuestos los especímenes y midiendo el pH junto con la profundidad del frente de carbonatación se confirma la hipótesis, planteada en el principio de la investigación y elaboración del presente trabajo, de que la adición de los dispositivos de humidificación e instrumentación de control en la cámara de carbonatación permiten acelerar y monitorear el comportamiento del fenómeno de carbonatación bajo los criterios establecidos tomados en la norma de referencia UNE-EN\_13295:2005.

## CONCLUSIONES

En el diseño del acondicionamiento de un sistema de control de humidificación para una cámara de carbonatación se logró cumplir con las necesidades establecidas para el arreglo de una cámara de deterioro acelerado, con parámetros establecidos en porcentaje de humedad relativa y tiempo de exposición de especímenes.

En la cámara se logró la optimización del proceso en cuanto a la cantidad de humedad relativa alcanzando un valor de 90% de humedad dentro de la cámara en 10 minutos de operación.

En las pruebas piloto, al monitorear especímenes de concreto se logró observar que el proceso de carbonatación está presente al aplicar el método de una solución indicadora de fenolftaleína.

Se verificó que la corrosión acelerada está presente al exponer los especímenes de concreto dentro de la cámara al medir su pH, mostrando una disminución de un valor de 10 a 7 de pH.

El arreglo de los humidificadores y el diseño de los mismos permitirán hacer distintos estudios y monitoreo de comportamientos químicos en el concreto para trabajos de investigación posteriores dentro de la UAEH.

## RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se sugiere tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

Realizar un estudio sobre el efecto de la variación de la humedad dentro de la cámara de carbonación para determinar el flujo constante y correcto para su perfecto uso.

Desarrollar un sistema de flujo de humedad dentro de la cámara para tener una buena homogeneidad.

Incorporar un dispositivo dentro del contenedor del humidificador que permita elevar la temperatura de la humedad de la cámara de carbonatación a  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  para cumplir con los rangos de temperatura especificados en la literatura que permitan un mejor aprovechamiento del mismo.

## REFERENCIAS

- Arvidson, R. S. (2005). Magnesium inhibition of calcite dissolution kinetics. *Elsevier*, 11.
- Bonnycastle., D. D. (4 de 11 de 2011). *Wikipedia*. Recuperado el 14 de 11 de 2011, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Fenolftale%C3%ADna>
- Camacho, J. M. (2009). *Durabilidad en estructuras de concreto armado, localizadas frente a la costa*. México, D.F.
- CARVAJAL, A. M. (2007). Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones. *Revista de la Construcción*, 10.
- Castellote, M., & Andrade, C. (2009). Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (URCORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in-situ. *Revista Ingeniería de Construcción*, 13.
- Castro, P. (1998). *Corrosion en estructuras de concreto armado*. Mexico D.F.: IMCYC.
- Ceballos, J. M. (2006). *Crealve*. Recuperado el Febrero de 2016, de Operaciones y procesos: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/operaciones-y-procesos/materiales/BLOQUE2-OyP.pdf>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Permanente de Hormigón. (1999). *EHE, instrucción de hormigón estructural*. España: Ministerio de Fomento.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. México: Alfaomega.
- del Valle Moreno, A., Pérez López, T., & Maeríns Madrid, M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Safandila.
- Enríquez García, R. (2015). *Proyecto INFOCAB SB 202507*. Recuperado el 22 de 02 de 2016, de Prepa8.unam.mx: <http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/quimica/infocab/unidad124.html>
- Fernández, C. S. (Mayo de 2014). *Patologías construcción*. Recuperado el Enero de 2016, de Patologías construcción: <http://www.patologiasconstruccion.net/2014/05/carbonatacion-fondo-3-ensayo-y-determinacion-1-de-2/>
- Fontana, M. (1986). *Corrosion Engineering*. Singapore: McGraw-Hill.

- Fuentes Guirado, J. G. (1994). *Corrosión por ácido sulfúrico de tuberías de concreto utilizadas en sistemas de alcantarillado*. Sonora: Universidad de Sonora.División de Ingeniería.
- García, I. G. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Madrid.
- Huerta, E. O. (2001). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid : Síntesis .
- imt. (1 de 2005). *Instituto Mexicano del Transporte*. Recuperado el 2011, de <http://www.imt.mx/>
- Kulakowski, M. P. (2008). Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. *Elsevier*, 6.
- Linares, D., & Sánchez, M. (2003). CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CÁMARA PARA CARBONATACIÓN ACELERADA. *Revista tecnica de la facultad de ingenieria universidad de Zulia* .
- Love, T. W. (2006). *El concreto en la construcción* . México : Trillas .
- Maccormac, J. C. (2002). *Diseño de CONCRETO REFORZADO*. Mexico D.F.: ALFAOMEGA.
- Montani, R. (2000). *Construccion y Tecnologia*.
- Montani, R. (2000). Carbonatacion, enemigo olvidado del concreto. *Construccion y Tecnologia*.
- Mora, M. (2009). Aplicación de la Técnica de Modulación de Frecuencia Electroquímica (EFM) para Mediciones de Corrosión en Concretos. *Revista Colombiana de Física*, 4.
- Moreno, E. (2005). Barras de acero galvanizado: Una opcion contra la carbonatacion. *Ingenieria*.
- Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Articulo d investigacion*.
- Moreno, E., Domínguez Lara, G. G., Cob Sarabia, E. J., & Duarte Gómez , F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración . *Ingeniería*, 117-130.
- Murcia, A. (2010). *Obtención de colorantes del tipo de las ftalinas, fenolftaleína y fluoresceína*. México: Universidad del Valle de México.
- Ocampo, I., Vuanello, O., Ortúzar, R., Seminara, H., Paez, G., Ibarbe, I., y otros. (2010). *Estudio de la carbonatación acelerada en probetas de hormigón armado*. San Juan-Argentina: Universidad Nacional de San Juan.
- Oshiro, A. (2008). Comportamiento de hormigones expuestos a condiciones naturales de alta agresividad química. *Exacta*, 15.

- Pérez Quiroz , J. T. (2001). *Seguimiento por la Técnica de Impedancia Electroquímica de la protección catódica del acero de refuerzo en concreto modificado por un agente humectante* . México: UNAM.
- Perry, R. (1998). *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw-Hill.
- Raichev, R., Veleva, L., & Valdez, B. (2009). *Corrosion de metales y degradación de materiales. Principios y practicas de laboratorio*. Mexicali: Universidad Autonoma de Baja California .
- Sánchez et al. (2003). CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA CÁMARA PARA CARBONATACIÓN ACELERADA. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34-44.
- Song, H.-W. (2005). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. *Elsevier*, 10.
- Taurian. (1984). Self-consistent electronic structures of MgO and SrO. *ScienceDirect*, 4.
- Valcuende, M. (2009). Natural carbonation of self-compacting concretes. *Elsevier*, 5.
- Vidaud, I. y. (2013). La carbonatación en el concreto reforzado. *Construcción y Tecnología en concreto*, 2(10), 20-23.

# **ANEXOS**

## **ANEXO 1. IMCYC (INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO). LA CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO REFORZADO.**

(Vidaud, 2013)

*Continuamos con este interesante tema de buscar informar acerca de algunos de los tópicos más frecuentes en materia de concreto reforzado.*

En torno a la pregunta de ¿cuáles son los síntomas de la carbonatación en una estructura de concreto? Cabe decir que para que la carbonatación sea reconocida a simple vista es preciso advertir en ella una zona descolorida en la superficie de concreto. Este fenómeno igualmente puede ser visualizado utilizando un indicador de fenolftaleína (prueba cualitativa de la fenolftaleína), disponible a partir de los proveedores de productos químicos. Para su uso como un indicador, la fenolftaleína debe quedar disuelta con un disolvente adecuado tal como el alcohol isopropílico (isopropanol) en una solución al 1%. El ensayo consiste en aplicar el indicador a la superficie de la muestra de concreto, lo que produce una coloración rosa oscuro cuando está en presencia de un medio básico o de PH alto (Fig.3).

Considerando entonces que la coloración rosácea es un indicador de que el nivel del pH del concreto está por encima del valor estandarizado como límite (9.5), en la Fig. 1 puede observarse que en la parte izquierda de la fotografía no existen riesgos de carbonatación; sin embargo, en la parte derecha se exhibe un concreto en el cual hacia la superficie de la muestra es evidente la existencia de la carbonatación, al no cambiar de coloración el concreto roseado con la fenolftaleína.

**Fig. 1**



Ensayo con indicador de fenolftaleína para evaluar carbonatación en el concreto; la parte que toma el color rosáceo no está carbonatada, en cambio la zona que no cambia de color si lo está.

**Fuente:** ATE IMCYC.

La prueba del indicador de fenolftaleína es recomendada sólo para establecer un estimado de la profundidad que ha alcanzado la carbonatación (profundidad del frente de carbonatación). Para llegar a una confirmación de este alcance es preciso la microscopía óptica o bien, la microscopía electrónica, incluso a profundidades superiores a las que evidencia la prueba cualitativa de la fenolftaleína. A través del microscopio se reconoce el fenómeno de carbonatación en el concreto por la presencia de cristales de calcita, y la ausencia de hidróxido de calcio, etringita y granos de cemento deshidratados. Cabe decir que la prueba del indicador de fenolftaleína resulta muy útil como un medio de hacer una evaluación inicial de la presencia de carbonatación en el concreto; es rápida, fácil de ejecutar y ampliamente utilizada en la actualidad.

Hoy en día, en el mercado de tecnología encaminada al estudio del concreto y sus propiedades, existen otras sustancias que con una aplicación similar a la de la fenolftaleína, llegan incluso a dar un estimado del nivel de pH del concreto en la zona roseada por el producto. Tal es el caso del indicador colorimétrico “Rainbow Indicator” (Indicador Arcoíris). Con éste, al comparar la coloración resultante en el concreto muestreado (posterior a la aplicación del producto, con un perfil de colores preestablecido que viene

impreso en el mismo recipiente del producto) es posible determinar el nivel de pH asociado. En la Fig.2 se presenta el producto, con el perfil de colores preestablecido marcado en su recipiente.



Una manera más exacta de estimar los niveles de carbonatación en una masa de concreto, es el uso del "potenciómetro". Se trata de una prueba fundamentada por medio de la Norma ASTM-D1293, en donde se determina el nivel de alcalinidad del concreto de muestras extraídas por medio de una extracción con agua destilada, a que se le determina posteriormente el nivel de pH con el equipo calibrado con soluciones patrón (Fig. 3).

**Fig. 3**



Equipo  
potenciómetro  
para la medición  
del pH de muestras  
de concreto.

**Fuente:** ATE IMCYC.

Un aspecto interesante a considerar en el estudio de la carbonatación en el concreto es el tiempo en que puede producirse este fenómeno. Nos ocupa a continuación entonces atender la interrogante de: ¿cuánto suele demorar el avance del frente de carbonatación? El avance del frente de carbonatación hacia el interior del elemento de concreto se produce cada vez de manera más lenta hasta que se detiene. Esto se debe a que el carbonato de calcio, que es poco soluble, al continuar en un medio húmedo y con la presencia del CO<sub>2</sub>, se descompone en bicarbonato de calcio (ver Ecuación 1), que sí es un compuesto soluble.



Al ser una reacción reversible, con la solubilidad del bicarbonato de calcio (Ca (CO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) se producirá la precipitación del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) cuando el agua y el CO<sub>2</sub> tiendan a migrar hacia el exterior en periodos de secado. De esta manera los poros del concreto se sedimentarán con el tiempo y se detendrá el avance del frente de carbonatación. Muchos especialistas en el tema coinciden en que el proceso avanza

gradualmente a una velocidad proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Además, puede afirmarse que el proceso de la carbonatación no describe una función lineal. Su estimación cambia con el tiempo y la profundidad. Un proceso de carbonatación normal en un concreto de buena calidad resulta ser muy lento, aproximadamente 0.04 pulgadas (1.0 mm) al año. Un concreto de buena calidad, sería en este caso, denso, de baja permeabilidad, y con una baja relación agua–cemento (a/c).

Siguiendo este análisis, pasados 35 años, la profundidad de carbonatación en la superficie de este concreto se podría estimar en aproximadamente 1.5 pulgadas (38 mm). Entonces, la carbonatación restante (para 0.5 pulgadas ó 13 mm de recubrimiento de concreto) tomará alrededor de 12 años en producirse. Algunas investigaciones sugieren que en el caso de un concreto más poroso y permeable, en cuya mezcla se haya utilizado una elevada relación a/c, el fenómeno de la carbonatación puede presentarse a razón de hasta 5 mm por año.

Un modelo interesante para la correlación entre el período de tiempo (t), necesario para que se desarrolle la carbonatación en una profundidad de frente (d), lo establece la Instrucción del Concreto Estructural EH-08, del Ministerio de Fomento y del Gobierno de España, como se muestra en la siguiente expresión:

$$t = \left( \frac{d}{Kc} \right)^2 \quad (2)$$

En donde Kc, se conoce como coeficiente de carbonatación, y se puede determinar como una función del medio de exposición, de la porosidad del concreto, del tipo de cementantes en la mezcla y de la resistencia media del concreto a la compresión.

Cabría entonces preguntarnos ¿cómo puede evitarse la carbonatación? El empleo de barreras, a menudo resulta una buena opción como método preventivo. Los selladores o recubrimientos tienen la función de proteger al acero de refuerzo minimizando la entrada de humedad en el concreto. Estos productos deben cumplir algunos requisitos, pues sus propiedades estarán condicionadas por las características de exposición y sollicitaciones a las que será sometida dicha estructura. De forma general, a estos productos puede exigírseles las siguientes propiedades: resistencia al intemperismo; buena adherencia;

impermeabilidad al agua y a los cloruros; resistencia a la difusión de gases como el CO<sub>2</sub>, el vapor de agua y el oxígeno; resistencia a la abrasión y a los cambios de temperatura; resistencia a los agentes químicos, y por último, estética.

Una vez que el fenómeno de la corrosión se ha iniciado debido a que el frente de carbonatación ha alcanzado al acero de refuerzo y el concreto ya no protege al acero, se debe recurrir a métodos correctivos. El más común es el que estipula quitar todo el concreto que ya no protege al acero y que está dañado; pudiéndose entonces limpiar y tratar al acero descubierto. Posteriormente, se podrá reconstruir la sección con un mortero de reparación especialmente comercializado para este fin.

Otros métodos como los electroquímicos y el uso de inhibidores de corrosión, persiguen controlar la corrosión desde la superficie del concreto. En términos generales, las reparaciones convencionales muchas veces no son lo suficientemente eficaces, a no ser que el concreto carbonatado se retire y reemplace completamente. Sin embargo, esta acción puede resultar peligrosa y provocar problemas de adherencia entre el concreto original y el mortero de reparación. En otro orden, los métodos electroquímicos suelen ser eficaces, pero también pueden resultar en extremo costosos. De acuerdo a lo anterior, es importante que desde el inicio los concretos se elaboren de buena calidad, poco porosos, densos y con buenas prestaciones mecánicas; garantizándose además un buen nivel de recubrimiento en el acero de refuerzo. Estas especificaciones son especialmente importantes en estructuras expuestas a medioambientes agresivos.

Respecto a la carbonatación, las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal para Diseño y Construcción de Estructura de Concreto de 2004 establecen en su apartado de “Diseño por Durabilidad”, que, de acuerdo a las características de exposición, las estructuras deberán cumplir con un cierto nivel de resistencia a la compresión, y adicionalmente el acero de refuerzo deberá tener un nivel de recubrimiento determinado. Así, por ejemplo, una estructura con un nivel de exposición medioambiental agresiva (ambiente de exposición C), deberá considerar niveles de recubrimiento entre 6.0 y 7.5 cm, y niveles de resistencia a la compresión altos, incluso mucho mayores a los 300 kg/cm<sup>2</sup>, con mezclas elaboradas con relación agua/cemento no mayor a 0.40, y una cantidad de cemento en donde no deben de sobrepasarse los 350 kg/m<sup>3</sup>.

De acuerdo a lo referido en este escrito, es importante decir que la concepción de concretos de buena calidad, sin duda debe ser un importante parámetro a la hora de evitar el desarrollo del fenómeno de la carbonatación. Esta situación a su vez atenuará el desarrollo de la corrosión en el acero de refuerzo, fenómeno que resulta común en estructuras ubicadas en zonas medioambientalmente agresivas, en donde internacionalmente se suelen invertir importantes montos económicos, en la resolución de estas situaciones.

Referencia:

- Gobierno del Distrito Federal (2004). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto".
- Gobierno de España, Ministerio de Fomento (2010), en "EH-08: Instrucción del Concreto Estructural", España.
- Machado, L. R. (---), "Carbonatación vs. Aluminosis", en Kimialberica, [www.kimiaiberica.es](http://www.kimiaiberica.es), Valencia, España.

## ANEXO 2. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN

### Coeficiente de carbonatación y tiempo de exposición.

Fórmulas utilizadas:

$$\frac{K_{CA}}{K_{CC}} = \sqrt{\frac{C_{CA}}{C_{CC}}} \quad (1)$$

Dónde:

$K_{CA}$  = Coeficiente de carbonatación ambiental.

$K_{CC}$  = Coeficiente de carbonatación en la cámara.

$C_{CA}$  = Concentración de  $\text{CO}^2$  en el ambiente de la región.

$C_{CC}$  = Concentración de  $\text{CO}^2$  en la cámara.

$$X = Kt^2 \quad (2)$$

Dónde:

$X$  = Profundidad de carbonatación en mm.

$t$  = tiempo en años.

$K$  = Coeficiente de carbonatación.

### ANEXO 3. CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

Obtención de la Concentración al 6% de CO<sub>2</sub> en la cámara.

Volumen de la cámara.

$$(1.60 \text{ m})(0.78 \text{ m})(1.00 \text{ m}) = 1.248 \text{ m}^3$$

$$1.248 \text{ m}^3 = 1,248 \text{ Lt.}$$

$$1,248 \text{ Lts} \times 6 \% = 74.88 \text{ Lts.}$$

$$1 \text{ L} = .03531 \text{ ft}^3$$

$$\frac{74.88 \text{ lts}}{1 \text{ L}} \times .0353 \text{ ft}^3 = 2.643 \text{ ft}^3$$

El flujómetro del tanque de CO<sub>2</sub> se abrió hasta marcar 30 ft<sup>3</sup>/H.

$$30 \frac{\text{ft}^3}{\text{H}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.5 \frac{\text{ft}^3}{\text{min.}}$$

$$\frac{3 \text{ ft}^3}{0.5 \text{ ft}^3/\text{min.}} = 5.28 \text{ min.}$$

Para lograr la concentración de CO<sub>2</sub> a un 6 % dentro de la cámara, se abrió la válvula del gas marcando el flujómetro 30ft<sup>3</sup>/h durante 5.28 min.

## **ANEXO 4. PRUEBA pHMETRO.**

### **Prueba pHmetro.**

La prueba con pHmetro se realizó debido a que se observó diferentes tonalidades de color en la aplicación de la fenolftaleína lo cual puede indicar que existe una disminución mínima de pH pero que todavía no se puede considerar perjudicial. El pHmetro nos permite saber con mayor exactitud el pH de una sustancia.

Equipo necesario:

- pHmetro.
  - Marca HANNA instrumenta
  - Modelo HI 2211 pH/ORP Meter
- Taladro
- Brocas para concreto
  - 3/8"
  - 1/2"
- Agua desionizada.
- Soluciones buffer
  - 4.01
  - 7.01
  - 9.18

## ANEXO5. ESPECIFICACIONES DEL AGUA DESIONIZADA

Agua Desionizada																								
<b>1. Información sobre la sustancia química</b>																								
<p><b>Nombre Químico:</b> Agua Desionizada</p> <p><b>Familia Química:</b> Agua</p> <p><b>No. De Registro CAS:</b> Agua (7732-18-5)</p> <p><b>Componentes:</b> Agua</p>																								
<b>2. Identificación de los peligros</b>																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; border: 1px solid black; text-align: center;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">GRADO DE RIESGO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">EXTREMO</td> <td style="text-align: center;">4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ALTO</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">MODERADO</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">LIGERO</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">SIN RIESGO</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table> </td> <td style="width: 60%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <p>NFPA 704</p> </td> <td style="width: 20%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <p>HMIS</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: blue; color: white; text-align: center;">SALUD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center;">INFLAMABILIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow; text-align: center;">REACTIVIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL</td> <td></td> </tr> </table> </td> </tr> </table>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">GRADO DE RIESGO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">EXTREMO</td> <td style="text-align: center;">4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ALTO</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">MODERADO</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">LIGERO</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">SIN RIESGO</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>	GRADO DE RIESGO		EXTREMO	4	ALTO	3	MODERADO	2	LIGERO	1	SIN RIESGO	0	<p>NFPA 704</p>	<p>HMIS</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: blue; color: white; text-align: center;">SALUD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center;">INFLAMABILIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow; text-align: center;">REACTIVIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL</td> <td></td> </tr> </table>	SALUD	0	INFLAMABILIDAD	0	REACTIVIDAD	0	EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">GRADO DE RIESGO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">EXTREMO</td> <td style="text-align: center;">4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ALTO</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">MODERADO</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">LIGERO</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">SIN RIESGO</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>	GRADO DE RIESGO		EXTREMO	4	ALTO	3	MODERADO	2	LIGERO	1	SIN RIESGO	0	<p>NFPA 704</p>	<p>HMIS</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: blue; color: white; text-align: center;">SALUD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red; color: white; text-align: center;">INFLAMABILIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow; text-align: center;">REACTIVIDAD</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL</td> <td></td> </tr> </table>	SALUD	0	INFLAMABILIDAD	0	REACTIVIDAD	0	EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL			
GRADO DE RIESGO																								
EXTREMO	4																							
ALTO	3																							
MODERADO	2																							
LIGERO	1																							
SIN RIESGO	0																							
SALUD	0																							
INFLAMABILIDAD	0																							
REACTIVIDAD	0																							
EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL																								
<b>3. Primeros auxilios</b>																								
El producto es totalmente inofensivo.																								
<b>4. Medidas de combate contra incendios</b>																								
No es necesaria ninguna precaución en especial, el producto no arde.																								
<b>5. Medidas en caso de derrame accidental</b>																								
Ninguna, el producto es totalmente inofensivo.																								
<b>6. Manipulación y almacenamiento</b>																								
No es necesaria ninguna precaución en especial, el producto no arde.																								
<b>7. Controles de la explosión, protección personal</b>																								
No es necesaria ninguna precaución en especial, el producto no arde.																								

<b>8. Propiedades físicas y químicas</b>			
COLOR	Incoloro	TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C)	100
OLOR	Inodoro	TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN (°C)	NA
ESTADO FÍSICO	Líquido cristalino	TEMPERATURA DE FUSIÓN(°C)	NA
GRAVEDAD ESPECÍFICA 15.6°C	1.0000	TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN(°C)	ND
SOLUBILIDAD EN AGUA	Total	VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN (BUTIL ACETATO =1)	Insignificante
LIMITES DE EXPLOSIVIDAD	SUPERIOR: ND	% VOLATILIDAD	ND
	INFERIOR: ND		
PESO MOLECULAR	18	PRESIÓN DE EVAPORACIÓN (mmHg)	<0.1
<b>9. Estabilidad y reactividad</b>			
<p>Estabilidad: Estable.</p> <p>Condiciones que deben Evitarse: Ninguna en particular.</p> <p>Materiales que deben Evitarse: Agentes oxidantes fuertes.</p> <p>Productos de Descomposición Peligrosa: En condiciones normales no se descompone.</p>			
<b>10. Información toxicológica</b>			
<p>Ninguna, el producto es totalmente inofensivo.</p> <p>Carcinogenicidad: No se conocen efectos carcinógenos.</p> <p>Mutabilidad Genética: No es considerado como peligro de mutaciones genéticas.</p> <p>Toxicidad Reproductiva: No se considera tóxico para la reproducción.</p>			
<b>11. Información ecológica</b>			
<b>No hay ningún peligro por derrame.</b>			
<b>12. Consideraciones para la eliminación</b>			
No hay ningún peligro por derrame.			

## ANEXO 6. GLOSARIO

**Aglomerante:** Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo exclusivamente físico.

**Ambiente:** conjunto de condiciones físicas, químicas, biológicas, mecánicas, a las que un material se encuentra expuesto e influye en su desarrollo y comportamiento.

**Carbonatación:** 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.

**Clinker:** El clinker o clinker Portland es el principal componente del cemento Portland, el cemento más común y, por tanto, del concreto.

**Concreto:** También llamado concreto es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos.

**Conductividad:** Propiedad natural de los cuerpos que permiten el paso a través de sí del calor o la electricidad.

**Corrosión:** La destrucción o deterioro de un material debido a la reacción con el medio ambiente.

**Corrosión electroquímica:** Se produce por transferencia de electrones; esto es, mediante corriente eléctrica que circula por alguna parte del metal, a través de un medio o solución. Este tipo de corrosión se produce en las instalaciones de climatización y agua caliente.

**Corrosión galvánica:** Ocurre cuando dos diferentes metales son conectados en un ambiente corrosivo.

**Erosión:** Desgaste y modelación de la corteza terrestre causados por la acción del viento, la lluvia, los procesos fluviales, marítimos y glaciales, y por la acción de los seres vivos.

**Fenolftaleína:** 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  $\text{pH}=8,2$  (incoloro) y  $\text{pH}=10$  (magenta o rosado).

**Humedad:** Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.

**Humedad molar:** Relación entre el número de moles de vapor y de gas contenido en una determinada masa gaseosa.

**Humedad relativa:** Relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener.

**Humidificador:** Aparato para mantener constante la humedad relativa del ambiente de una habitación o lugar cerrado; contiene agua que, periódicamente, convierte en vapor.

**Humidificación:** es un aparato que sirve para aumentar la humedad del ambiente en una habitación.

**Lechada:** Es una mezcla de cemento Portland, cal, agregados finos y agua en proporciones tales que la mezcla sea fluida.

**Mortero:** Es una mezcla de cemento Portland, cal, agregado finos y agua en tal proporción que la mezcla sea plástica.

**Oxidación:** Fenómeno químico en virtud del cual se transforma un cuerpo o un compuesto por la acción de un oxidante, que hace que en dicho cuerpo o compuesto aumente la cantidad de oxígeno y disminuya el número de electrones de alguno de los átomos.

**Permeabilidad:** Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

**pH:** Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

**Porosidad:** Es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100%.

**Presión de saturación:** Es la presión a la que a cada temperatura las fases líquidas y vapor se encuentran en equilibrio.

**Presión de vapor:** Es la presión a la que a cada temperatura las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio.

**Protecciones catódicas:** es una técnica para controlar la corrosión galvánica de una superficie de metal convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica.

**Punto de rocío:** Es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina, cualquier tipo de nube o, en caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha.

**Punto de saturación:** Se produce por un aumento de humedad relativa con la misma temperatura, o por un descenso de temperatura con la misma humedad relativa.

**Silicatos:** Los silicatos son el grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen más del 95% de la corteza terrestre, además del grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas.

**Solidificación:** es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido producido por una disminución en la temperatura o por una compresión de este material. Es el proceso inverso a la fusión, y sucede a la misma temperatura.

**Termohigrómetro:** Es un instrumento utilizado para medir la temperatura y la humedad relativa del aire, o la cantidad de vapor de agua invisible en un entorno determinado.

**Vapor:** Aquel gas que se puede condensar por presurización a temperatura constante o por enfriamiento a presión constante.