

Evaluación Termodinámica de Corrosión en Concretos Sustentables en Presencia de Sulfato de Sodio

I. E. Viveros-Soto¹; I. González-Sedano²; H. R. González-Moreno³; M. A. Baltazar-Zamora⁴.

Resumen---- En la presente investigación se evalúa el comportamiento electroquímico y físico de especímenes de concreto reforzado, con la finalidad de determinar la probabilidad de corrosión de dichos especímenes expuestos a agua contaminada con NaSO₄. Se elaboraron especímenes de concreto, en los cuales se embebieron barras de acero 1018 y acero galvanizado para ser evaluadas electroquímicamente; la dosificación de las mezclas de concreto se hizo con base al método del ACI 211.11, Las mezclas elaboradas se diseñaron para un $f'c=300$ kg/cm², empleando un tipo de cemento CPC 30R y sustitución con Humo de Sílice, después de la etapa de curado, los especímenes fueron colocados en un recipiente con agua contaminada con 5% de NaSO₄, para posteriormente ser evaluados.

Palabras clave: Acero, Concreto, Corrosión, Microsilice, Sulfatos.

Abstract---- In the present study the electrochemical and physical behavior of reinforced concrete specimens, in order to determine the likelihood of corrosion of the specimens exposed to water contaminated with NaSO₄ is evaluated. concrete specimens in which steel bars 1018 and galvanized steel for evaluation were prepared electrochemically embedded; the dosage of concrete mixes was based at the ACI 211.11 method Elaborate mixtures were designed for $f_c = 300$ kg / cm² using a type of cement CPC 30R and replacement with silica fume, after curing step, the specimens were placed in a container with water containing 5% NaSO₄ and then are evaluated.

Keywords: Concrete, Corrosion, Microsilica, Steel, Sulphates.

I. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más ampliamente usados, sin embargo las estructuras que los emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión. El problema del deterioro de las estructuras de concreto debido a procesos de corrosión es serio y de implicaciones económicas mayores.^[1]

Con el incremento de la construcción y el propósito de suministrar estructuras más resistentes reduciendo la corrosión en las edificaciones, es de suma necesidad conocer la evaluación del acero desde el enfoque de corrosión, es un aspecto de vital importancia para determinar la vida útil de los aceros en la construcción.

La gran problemática es el aceleramiento de la corrosión en el concreto armado que es el más usado en la construcción, provocando severos daños en la estructura.

El concreto embebido en cloruros es uno de los mayores problemas para el concreto armado, el cual es uno de los más factibles de adquirir generando de esta forma la corrosión provocando la destrucción de la capa pasivante en el acero embebido. La llegada de un frente de cloruros al acero, genera corrosión en el metal, con un posterior descascamiento del concreto en la zona aledaña. Cuando esta problemática no es atendida pronta y adecuadamente, puede causar problemas de servicio y hasta el colapso de la estructura.^[2]

Las nuevas tecnologías ayudan a poder reducir el gran problema de la corrosión, como es el caso de las puzolanas con la implementación de humo de sílice en las estructuras de concreto reforzado ofreciendo una vida útil mayor a la que se tiene sin la implementación de esta puzolana.

Por lo tanto mediante el potencial de corrosión que contiene el metal se puede relacionar la cantidad de cloruros, y a su vez determinar un proceso electroquímico.^[3]

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero además del contacto con metales menos activos así como también de las heterogeneidades en el medio químico o físico que rodea a la estructura. La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es una de las principales causas a las que se debe la reducción de la vida de servicio de las estructuras además de que genera incertidumbre en la población que usa dichas estructuras, como pueden ser puentes, carreteras o edificaciones. Sin embargo el costo de mantenimiento de una estructura de concreto reforzado se elevaría por la pérdida de resistencia y estabilidad dentro de la estructura como consecuencia poniendo en riesgo la seguridad de las personas dentro de la edificación.

La evaluación de la corrosión es una de las medidas para poder conocer el daño del acero en el concreto armado de la edificación, así como para prever la corrosión dentro de las estructuras. Los factores que la corrosión son la dosificación; la compactación y la homogeneidad del concreto: el espesor del recubrimiento de concreto; el estado superficial de la varilla y humedad ambiental. Es por ello que el concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para garantizar la

protección de la varilla de refuerzo contra las acciones agresivas de los agentes externos.^[4]

Hoy en día la influencia de la sustentabilidad es de suma importancia, y con ello el incremento de puzolanas artificiales o naturales, incrementan la seguridad y confianza de la sociedad en el mundo. Además se ha demostrado que estos materiales puzolánicos también benefician al concreto para aumentar sus propiedades como protección contra la corrosión en el acero de refuerzo.^[5]

El concreto sustentable en la actualidad es de suma importancia debido a que las grandes construcciones desde edificios, puentes y demás obras civiles se realizan con este material, por lo tanto en este proyecto se hace mención mediante una puzolana artificial la cual es el humo de sílice (Microsilice).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la presente investigación se elaboraron 12 especímenes de concreto reforzado, utilizando en la elaboración de la mezclas el CPC 30R, ambas mezclas fueron diseñadas por el método ACI 211.1 para poder obtener una resistencia a la compresión a los 28 días de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, como material de refuerzo se utilizaron 2 tipos de aceros, acero al carbono AISI 1018 y un acero galvanizado los cuales se colocaron en el concreto. La investigación tiene como finalidad analizar los términos de evaluación de varillas de acero 3/8" AISI 1018 y galvanizada. Con respecto a esto se realizaron especímenes con un $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ y expuestos en un ambiente corrosivo de NaSO_4 en sol. 5%.

Se realizara concretos sustentables incorporando un puzolana artificial como es el humo de sílice (Microsilice), ya que le proveerá características de sustentabilidad al incrementar su durabilidad al mejorar sus características física y estas permiten generar una capa pasiva más resistente en los aceros embebidos en concreto. El uso de Microsilice debe ser limitado para el uso en estructuras donde se requieran altas resistencias mecánicas, por elevar los costos debido al consumo de superplastificantes.

El uso de aditivos minerales con área superficial alta y poco reactivas, no contribuyen al desarrollo de resistencias mecánicas tempranas del concreto, pero si ganaran resistencias a futuro. Una solución propuesta por Mehta y Gjory, es utilizar una mezcla sin remplazo de cemento Portland, y después adicionar los aditivos altamente reactivos, tales como la Microsilice.

Las partículas del humo de sílice son de gran importancia y en diferentes investigaciones se han observado que la morfología de las partículas de Microsilice se forma por aglomeración de partículas aún más pequeñas, donde se tienen esferas de superficie

irregular de diámetro aproximado a $25 \mu\text{m}$ y pueden llegar a formar conglomerados de hasta $90 \mu\text{m}$.

a) REALIZACIÓN DE LA MATRIZ DE EXPERIMENTACIÓN.

Estos armados serán con un acero AISI 1018 y otro galvanizado. Estos especímenes serán expuestos a un medio de sulfato de sodio en diferentes porcentajes para evaluar el comportamiento de la despasivación (corrosión) del acero mediante técnicas electroquímicas de potencial de corrosión.

TABLA 1. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE CONCRETO

Contenido (Kg/m ³)	Concreto con $f'c = 300 \text{ kg/m}^3$
Cemento	355
Agua	185
Agregado Grueso	936
Agregado Fino	994

TABLA 2. MATRIZ EXPERIMENTAL

Concreto $f'c$	Cemento	Acero	Medios de exposición	No. Especímenes
300 kg/cm ²	CPC 30R CPC 30R (80%) y Humo de Sílice 20%	AISI 1018 (3/8) Galvanizada (3/8)	Agua	
	CPC 30R CPC 30R (80%) y Humo de Sílice 20%	AISI 1018 (3/8) Galvanizado (3/8)	Sol al 5% de NaSO_4	
1	2	2	3	12

Para la presente investigación se elaboraron 12 especímenes de concreto reforzado, utilizando en la elaboración de la mezclas el CPC 30R, ambas mezclas se diseñaron de acuerdo a lo establecido en el método del ACI 211.1 para una resistencia a la compresión a los 28 días $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, como refuerzo se emplearon dos tipos de acero: acero al carbono 1018 y acero galvanizado, los cuales se embebieron en el concreto.

Los principales parámetros a considerar para la realización de la presente investigación son:

1. Mezcla de concreto con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$.
2. El tipo de cemento CPC 30R.
3. Acero 1018 y acero galvanizado con diámetro de 3/8".
4. Medio de exposición (5% de NaSO_4).
5. Monitoreo de potenciales e interpretación de resultados.

b) ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE ESTUDIO.

Se elaboraron 12 especímenes cada uno de ellos, tienen las mismas características y dimensiones, en ellos se embebieron dos varillas, una de acero 1018 y otra galvanizada ambas de 3/8” de diámetro.

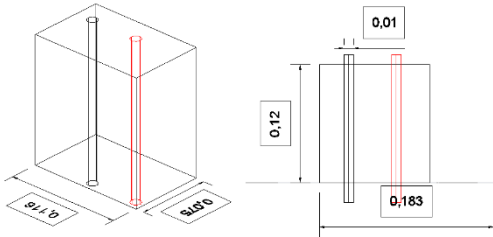


Figura 1. Dimensiones de los especímenes y arreglo de las barras embebidas.

Cada una de las varillas embebidas en el concreto, fueron previamente limpiadas para retirar cualquier impureza que en ella estuviese presente, posteriormente se delimito el área a evaluar y el resto se cubrió con Thermofit de 1/2 de pulgada de diámetro, color negro.



Figura 2. Preparación del acero utilizado como refuerzo.

Después del proporcionamiento, la preparación del material y equipo a utilizar, se procedió a la fabricación de los especímenes, la cual se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-159-2004.



Figura 3. Elaboración de especímenes de Concreto.

Los especímenes se descimbraron 24 horas después de ser elaborados, para someterlos a curado en inmersión de acuerdo a la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999, la cual indica que el curado debe comenzar lo más pronto posible después del acabado.

c) COLOCACIÓN DE ESPECÍMENES EN CURADO.



Figura 4. Descimbrado y etapa de curado de los especímenes de prueba.

Se realizaron pruebas técnicas de corrosión y carbonatación posterior a los 28 días de curado, las cuales son las siguientes:

- Velocidad de Corrosión (I_{corr})
- Potencial de Corrosión (E_{corr})
- Carbonatación

Potencial de corrosión. Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto.

De acuerdo a la Norma ASTM C876 – 99 se establece el criterio de evaluación presentado. [6]

TABLA 3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN.

Potencial de Corrosión (mV)	Probabilidad de Corrosión
$E_{corr} > - 200$ mV	10% de probabilidad de Corrosión.
200 mV > $E_{corr} > - 350$ mV	Incertidumbre.
$E_{corr} > - 350$ mV	90% de probabilidad de Corrosión.

Medida de la velocidad de corrosión (I_{corr}).

Para evaluar la densidad de corrosión en las mezclas de control y Microsilice al 20% se tomara el criterio que propone la Red DURAR donde se utilizan cuatro rangos de evaluación.

TABLA 4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE ICORR (RED DURAR, 1997)

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	Nivel de Corrosión.
$I_{corr} < 0.1$	Despreciable
$0.1 < I_{corr} < 0.5$	Moderado
$0.5 < I_{corr} < 1$	Elevado
$I_{corr} > 1$	Muy Elevado

Técnicas para la determinación de la Carbonatación.

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal (pH entre 12-14) del concreto por efecto del CO_2 que difunde desde el ambiente que lo rodea. En presencia de humedad, el CO_2 reacciona con los álcalis (usualmente

hidróxidos de calcio, sodio y potasio), neutralizándolos para formar carbonatos disminuyendo el pH por debajo de 10. [7]

Con el cual se puede determinar en el concreto armado por la vía humedad con solución de indicador acido-base.

Nivel de pH: en función del indicador acido-base seleccionado se establecerá el pH del enfrente incoloro del tamaño del espécimen.

La fenolftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango de evaluación esta entre pH 8.2 y pH 9.8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

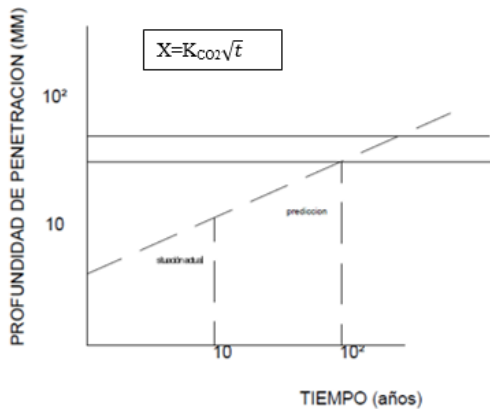


Figura 5. Representación gráfica de la determinación del tiempo necesario para que la carbonatación alcance la armadura.

En base a las técnicas de corrosión y carbonatación establecidas en dicha investigación se puede establecer una vida útil de la estructura de acuerdo a un medio de H2O, Sol al 5% de NaSO4.

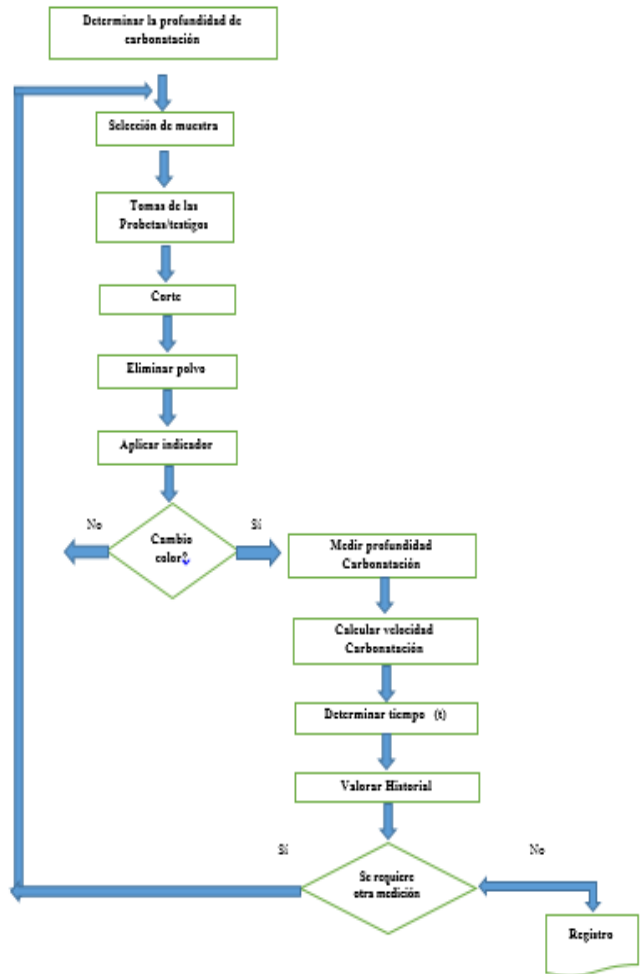


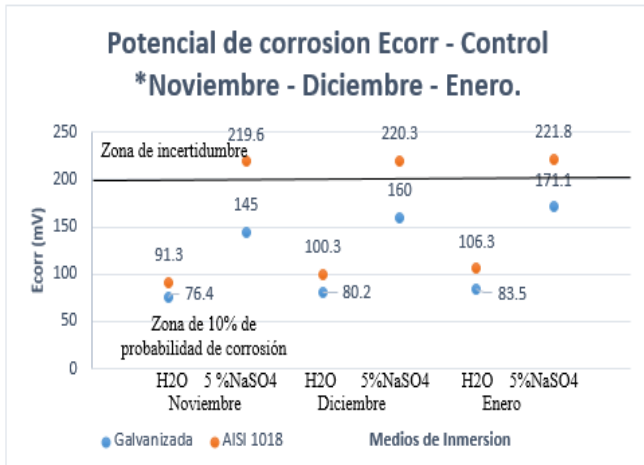
Figura 6. Diagrama de Flujo para la determinación de la Profundidad en la Carbonatación del Concreto. (Red Durar, 1997)

En general el valor de referencia para la vida útil del proyecto, para obras corrientes, puede ser de 50 años. Ciertas obras de mayor importancia social y estructural pueden ser previstas para una vida útil de 100 años o quizá más. [8]

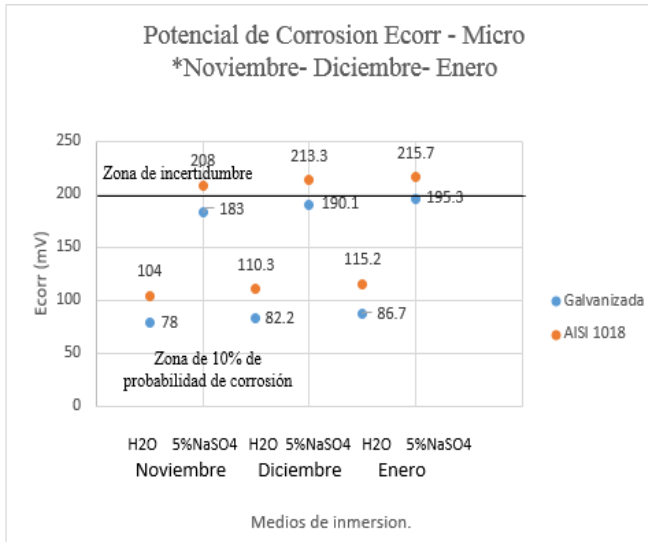
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Las vigas elaboradas con materiales convencionales y modificadas con Microsilice se encuentran en el día 20 de la etapa de curado, hasta el momento ya se ha observado la formación de la capa de óxido ferroso generalizada por la despasivación en las varillas de estudio AISI 1018 y Galvanizada.

A su vez se obtuvieron resultados de potenciales de corrosión de acuerdo a las técnicas antes mencionados, donde generaron los siguientes resultados:



Gráfica N.1. Potencial de Corrosión Ecorr – Control (Noviembre – Enero).



Gráfica N. 2. Potencial de Corrosión Ecorr – Microsílce (Noviembre – Enero)



Figura 7. Especímenes cortados para realizar estudio de carbonatación.



Figura 8. Especímenes expuestos a estudio de carbonatación.



Figura 9. Cara inferior expuesta a Fenolftaleína.

En el proceso de carbonatación se presentaron los siguientes datos: en la cara no sumergida en la esquina superior derecha se midió 5mm de carbonatación y en la cara sumergida no presento disminución de pH.

La presente investigación se encuentra en el tercer mes de estar curado en el medio Sulfatado, y la decisión de realizar la prueba de fenolftaleína fue para corroborar presencia de corrosión en su medio físico y químico.

Se tendrán resultados cada mes para determinar gráficas de Potencial de corrosión (Ecorr), Velocidad de corrosión (Icorr) y carbonatación, evaluando así la pasivación por la puzolana artificial que sustituye al cemento.

IV. CONCLUSIONES

Hasta el momento la investigación se encuentra en el periodo de 120 días después de la elaboración, esperando resultados del cuarto ensayo para conocer las características mencionadas.

Por el momento las varillas de acero AISI 1018 ya presentan una capa de óxido ferroso, empezando así su

proceso de corrosión, no obstante las varillas galvanizadas ya presentan principios de una capa de óxido ferroso.

No obstante de acuerdo a los estudios de carbonatación realizada en los especímenes, podemos determinar los promedios de profundidad de carbonatación.

Se puede mencionar que los resultados han mostrado muy pocos índices de disminución de pH, tratándose de un concreto convencional y un concreto con una sustitución de una puzolana.

En la presente investigación se espera aunque la puzolana actué de forma positiva en las muestras faltantes, expuestas al ambiente agresivo. Para así poder determinar el panorama real en la proyección de una estructura de concreto armado, expuestos a sulfatos.

V. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión del Mtro. Humberto Raymundo González Moreno y el Dr. Miguel Ángel Baltazar Zamora, a quienes nos gustaría expresar nuestro más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este artículo. Además, de agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que esto saliera de manera exitosa. A nuestros padres, por darnos la vida y apoyarnos en todo lo que hemos propuesto. A Dios, por brindarnos la oportunidad de vivir, por permitirnos disfrutar cada momento de nuestras vidas y guiarnos por el camino que ha trazado para nosotros.

V. APÉNDICES

- La realización de un concreto sustentable capaz de soportar ataques de sulfatos y proporcionar una reducción a la corrosión en el concreto armado.
- Utilización de una puzolana artificial, que sustituya un porcentaje del cemento ocupado en obra, así mismo proporcionando mejoras en las características físicas y químicas.
- Comprobación de la corrosión y carbonatación por medio de su proceso de evaluación.

VI. REFERENCIAS

- [1]. M. Maslehuddin, M.M. Al-Zahrani, M. Ibrahim, M.H. Al-Mehthel, S.H. al-Idi "Effect of Chloride Concentration in Soil and Reinforcing Corrosion" *Construction and Building Materials* 21 No. 8 (2007) p.p. 1825-1832.
- [2] Lucio Guillermo López Yépez – Tesis Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [3]. Adamec1 K., Palmer. N., Polebitski A. et al. *Climate Change Evaluation of Climate Change Impacts to Reservoir Operations within the Connecticut River Basin [C]. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change: 92-100.*
- [4]. Wilbanks, T.J., Fernandez, S., 2003. *Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities e Technical Report for the U.S. Department of Energy in Support of the National Climate Assessment.*
- [5]. Wilbanks, T.J., Fernandez, S., 2003. *Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities e Technical Report for the U.S. Department of Energy in Support of the National Climate Assessment.*
- [6].-Horvath A, Matthews HS. *Advancing sustainable development of infrastructure systems. J Inf Syst* 2004; 10(3):77–8.
- [7].- Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Pág. 208, Editorial, Lugar de Impresión, (año de publicación).
- [8]. Trends and developments in green cement and concrete technology Mohammed S. Imbabi †, Collette Carrigan, Sean McKenna School of Engineering, King's College, The University of Aberdeen, AB24 3UE Scotland, February 2013.

VII. BIOGRAFÍA



Ignacio González Sedano, nació en Teziutlán, Puebla el 27 de Septiembre del 1994, curso la Primaria en la escuela Primaria Patria en Martínez de la Torre del estado de Veracruz, México, en el año de 2000 al 2006, curso la Secundaria en la Escuela Secundaria Técnica N° 71 del 2006 al 2009 en Martínez de la Torre en el estado de Veracruz, México, la Preparatoria en el Centro de Estudios Técnicos, Industriales y de Servicios N° 145 (Cetís N° 145) del 2009 al 2012 en la ciudad de Martínez de la Torre en el estado de Veracruz, México y actualmente estudia en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla en la ciudad de Misantla del estado Veracruz, México.

El actualmente estudia en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla en la carrera de Ingeniería Civil.

Pasante de la Carrera de Ingeniería Civil González. Ponente del 4to Congreso Internacional Multa e Interdisciplinario de Ingenierías en Cintalapa de Figueroa, Chiapas en el tema Evaluación de la Corrosión de Concretos Sustentables Expuestos en una Solución al 3% y 5% de Sulfato de Magnesio, asistió al 5to Concurso Nacional de Diseño de Mezclas de Concreto (IMCYC).



Irving Edgardo Viveros Soto nació en Puebla el 15 de abril 1994, curso la primaria Cuauhtémoc de Vega de Alatorre, Veracruz, México en el año 2000-2006, Curso la Escuela Secundaria Técnica Agropecuaria, de Emilio Carranza, Veracruz, México en el año 2006-2009, Curso la Preparatoria en el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Veracruz N° 5 (CECYTEV), Veracruz, México en el año 2009-2012 y Actualmente cursa sus estudios en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, del estado de Veracruz, México en la carrera de

Ing. Civil. El actualmente Estudia en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla en la carrera de Ing. Civil. Pasante de la Carrera Ingeniería Civil Viveros, asistió al 5to concurso Nacional del Diseño de Mezclas de Concreto (IMCYC).



Miguel Ángel Baltazar Zamora cursó la Licenciatura en Ingeniería Civil en la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz en el año 1993-2000, Curso la Maestría en Vías Terrestres en la Universidad Autónoma de Chihuahua Facultad de Ingeniería, Chihuahua, México en el año 1998-2000, Curso el Doctorado en Ciencia de Materiales

Especialidad en Corrosión en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados. S.C. División de estudios de Posgrado, Monterrey, México en el año 2002-2005.

Participación en Múltiples congresos por ejemplo: XXVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, SMEQ 2012.

XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción

XIII Congreso de Control de Calidad de la Construcción, CONPAT 2011.



Humberto Raymundo González Moreno cursó la Licenciatura en Ingeniería Topográfica e Hidrología en la Facultad de Ingeniería Topográfica de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Chiapas, México en el año 2007-2011, Curso el Posgrado en Vías

Terrestres (PNPC) en la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México en el año 2011 – 2013.

Asistió al 5to concurso Nacional del Diseño de Mezclas de Concreto (IMCYC). Participo en el 4to Congreso Internacional Multa e Interdisciplinario de Ingenierías en Cintalapa de Figueroa, Chiapas en el tema Evaluación de la Corrosión de Concretos Sustentables Expuestos en una Solución al 3% y 5% de Sulfato de Magnesio.