



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

**“ESTADO DE LA INTEGRIDAD DE ACERO G42 Y G60 EMBEBIDO EN
CONCRETO CON AGREGADOS: NATURAL TRITURADO Y CONCRETO
RECICLADO; MATRICES ADICIONADAS CON EMULSIONES, CASO DE
ATAQUE ACELERADO.”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL.

PRESENTA:

ANTONIO ALBERTO GUZMÁN OROPEZA.

ASESOR:

Dra. Ing. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

COASESORES:

Dr. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA

Dra. ANGÉLICA DE LOURDES DEL VALLE

M.I.T. CIPRIANO BERNABÉ REYES

M.I.T ARTURO ZALAPA DAMIÁN

Morelia, Michoacán, Diciembre 2016



RESUMEN.

En la presente investigación se muestran los resultados de pruebas destructivas y no destructivas en cilindros de 15 cm de diámetro y con una altura aproximada de 30 cm, los cuales fueron elaborados con agregado natural triturado y agregado de concreto reciclado. Cada uno de los especímenes contó con dos varillas de acero embebidas, una de ellas de grado 42 (G42), mientras la otra de grado 60 (G60), también contaron con dos barras de grafito, de las cuales una de ellas actuaría como electrodo de referencia y la otra como contra electrodo en las pruebas realizadas. Las matrices de las diferentes mezclas fueron adicionadas con una emulsión de base polímero, con la cual se pretendió ayudar a contrarrestar el ataque de cloruros al acero; la emulsión se adicionó al momento de la elaboración de la mezcla en 1 y 4 % en peso del cemento, esto con base en los resultados de tiempos de fraguado. El agregado natural triturado fue obtenido del banco “La rocka” ubicado en la localidad de Cuto de la Esperanza en Tarímbaro, Michoacán. El agregado de concreto reciclado fue obtenido de la demolición del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicada en la avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. El triturado se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana.

En el estudio se indujo el ataque por cloruros de sodio, para acelerar el proceso de corrosión. Se sometieron a ciclos de húmedo-secado, simulando el ambiente en zonas costeras, donde se encuentran estructuras de concreto reforzado. Para simular este medio se realizó una solución salina con el 3.5% de NaCl en masa con respecto al agua. Las probetas se mantuvieron sumergidas en agua limpia de contaminantes durante dos años, después se comprobó la pasividad de las varillas y se procedió a iniciar los ciclos de húmedo-secado mediante la inmersión en la solución. Los ciclos se compusieron por ciclo húmedo (una semana sumergido dentro de la solución) y ciclo seco (tres semanas fuera de solución). Se realizaron pruebas de resistencia a la polarización durante cada etapa de estos ciclos, monitoreándose constantemente el cambio de potencial. Se obtuvieron valores de velocidad de corrosión por debajo de lo establecido para determinar la activación de las varillas, aun cuando los potenciales de corrosión se mantuvieron altos. Las comparativas de la velocidad de corrosión entre los diferentes tipos de emulsiones respecto a los testigos no presentan variaciones significativas.

Palabras clave: corrosión, concreto reciclado, cilindros, durabilidad, acero.



SUMMARY.

In this research shows the results of destructive and nondestructive testing in cylinders of 15 cm of diameter and with a height of 30 cm, which they were made as natural crushed aggregate and recycled concrete aggregate. Each of the specimens had two steel rods embedded, one of G42, while the other of G60, also had two graphite rods, of which one will act as the reference electrode and the other as counter electrode in the tests. The matrices of different mixtures were added with an emulsion polymer base, which was intended that could help counter the attack of chlorides on steel; the emulsion was added while the mixture was prepared, in 1 and 4% by weight of cement, based on this results set times. The natural crushed aggregate was obtained from the bank "La Rocka" located in the town of Cuto de la Esperanza in Tarímbaro, Michoacan. The recycled concrete aggregate was obtained from the demolition of Mexican Social Security Institute, located on Avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, city of Morelia, Michoacan, Mexico. The ground was made at the Institute for Metallurgical Research of the Universidad Michoacana.

In the studied, has induced them to attack by chlorides of sodium, in this way, to accelerate the corrosion process, subjecting them to cycles of wet-drying, simulating the environment in coastal areas where reinforced concrete structures are. To simulate this environment was made a saline solution with 3.5% NaCl by weight with respect to water. The specimens were kept immersed in clean water of pollutants for two years, after the passivity of the rods was checked we proceeded to start the wet-dry cycles by dipping into the solution. Cycles were composed by, wet cycle (one week submerged in the solution), dry cycle (three weeks out of solution). We made Polarization resistance tests during each stage of these cycles are performed, and constantly monitoring the change in potential corrosion. rate values were obtained under the provisions to determine the activation of the rods. The comparisons between the different types of emulsions compared to controls don't have significant variation.

Keywords: corrosion, concrete recycling, cylinders, durability, steel.



DEDICATORIA.

A mis padres, quienes siempre han sido un símbolo de fortaleza, sensibilidad, perseverancia, constancia, entre muchas cualidades más, por enseñarme a nunca desistir de mis objetivos, por creer en mí a pesar de lo difícil que pueda ser el camino. Gracias por la vida. Gracias por ser mis padres. ¡Este logro es suyo!

Papá: **ANTONIO GUZMAN CASTAÑEDA**. Por qué ser padre no es algo sencillo, y sin tu apoyo no hubiera logrado concluir esta carrera, porque siempre estuviste conmigo en todo momento y me enseñaste el valor del trabajo y lo duro que puede llegar a ser, siempre motivándome a dar lo mejor de mí, y no dejando me caer. Eres mi mayor ejemplo a seguir, siendo una gran fortaleza en mi vida, estoy sumamente orgulloso de tenerte como padre. Te amo.

Mamá: **MA. DE LOS ANGELES GARCIA OROPEZA**. Gracias por creer y nunca dudar de mí, eres la persona que siempre una a la familia, por preocuparte siempre por los demás antes que, de ti, por los desvelos que tenías que pasar por ayudarme siempre a aprender más (como cuando no me aprendía las tablas) y tener esa gran perseverancia conmigo. Gracias por estar ahí siempre que lo necesite, por brindarme todo el cariño y amor que un hijo puede tener. Te amo.

A mi hermana: **ANGELES JANETH GUZMAN OROPEZA**. Gracias por ser más que una hermana, por ser mi amiga, y alguien en quien siempre puedo confiar. Eres el orgullo de la familia, y debes de saberlo, eres una mujer con una gran fortaleza como pocas, nunca te des por vencida en tus metas. Sé que siempre contare contigo, gracias por ser todo lo que yo he querido ser en la vida, porque desde niños siempre he tratado de seguir tus pasos, siendo mi ejemplo. Te amo.

A mi novia: **MELISSA VILLA VILLASEÑOR**. Por siempre estar conmigo, compartir muchos momentos, tanto buenos como malos, por impulsarme y motivarme en cada una de mis metas. Por verme como una de las mejores personas del mundo, aunque no lo sea. Por darme la oportunidad de compartir.

“Somos dueños de nuestro destino. Somos capitanes de nuestra alma”

Winston Churchill



AGRADECIMIENTOS.

A mis padres, por ser siempre la inspiración en mi vida, enseñarme a luchar por mis metas y nunca dejarme solo, por creer en mí y mostrarme que todo es posible si jamás se da por vencido.

A mi hermana, que jamás se da por vencida incluso ante cualquier difícil circunstancia, marcando un sendero que he ido siguiendo a mi manera, por ser mi amiga y compañera a lo largo de este camino llamado vida.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrir sus puertas y ser la institución de mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería Civil, que siempre llevare en el corazón y con mucho orgullo, por permitirme tener una excelente educación y conocer personas invaluableles en mi vida.

Al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, por permitirme utilizar las instalaciones y facilitarme el equipo para la experimentación de esta tesis. Así como a todo el personal del laboratorio por siempre estar dispuestos a ayudar.

A mi asesora la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por todo el apoyo que me brindo durante este proyecto, consejos y soluciones.

Al M.A. Wilfrido Martínez Molina, por su apoyo incondicional, consejos y enseñanzas, quien como tutor me brindo su amistad.

Al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, por el apoyo durante toda esta investigación, por la paciencia y dedicación en la enseñanza.

Al Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, Dr. Hugo Luis Chávez, Mauricio, Rosalía por sus asesoría, consejos y participación.

A Berna, quien siempre estuvo dispuesto para colaborar de manera muy cercana en este proyecto. Muchas Gracias.

A Sandra, Ramón, Zalapa, Elizabeth y Maybelin por sus aportaciones a este proyecto y siempre hacer más amena la convivencia en el laboratorio.

A mis amigos, Emmanuel, Josué, Aldo, Isaac, Fabián, Alfredo, Giovanni, Gustavo por esa gran experiencia de vida que fue la universidad, encontrando de los mejores amigos que hay en la vida, siempre teniendo momentos divertidos y motivándome a ser mejor.

A mis amigas, Alejandra, Lupita, Ami, quienes son una muestra de trabajo constante y por el apoyo en este proyecto, por los momentos vividos.

A todas las personas que colaboraron en este estudio.



ÍNDICE DE CONTENIDO.

RESUMEN.....	I
SUMMARY.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
Objetivos Específicos.....	XI
INTRODUCCION.....	1
MARCO TEÓRICO.....	2
Concreto.....	2
Cemento.....	3
Tipos de cemento.....	4
Ventajas y desventajas de concreto.....	6
Daños en estructuras de concreto reforzado.....	8
Agregados pétreos.....	9
Propiedades físicas de los agregados.....	11
Reactividad Alkali-Agregado.....	12
Reacción Alkali-Sílice.....	13
Síntomas visuales de la expansión pos RAS.....	15
Mecanismo de la RAS.....	16
Factores que afectan la RAS.....	16
Influencia de los agregados.....	17
Concreto reciclado.....	17
Concreto reforzado.....	20
Concreto presforzado.....	20
Corrosión.....	20
Tipos de corrosión.....	21
Morfortipos de la corrosión.....	24



Factores que afectan y desencadenan la corrosión.	27
Dosificación del concreto.	28
Compacidad y homogeneidad.	28
Espesor de recubrimiento del concreto.	29
Humedad ambiental.	29
Efecto de la temperatura.	29
Estado superficial del acero.	30
Tensiones mecánicas del acero.	30
Iones despasivantes.	30
Carbonatación.	30
Lixiviación.	31
METODOLOGÍA.	32
Obtención de agregado natural triturado y agregado reciclado.	32
Trituradora de agregado reciclado.	34
Obtención de agregado natural fino.	35
Elaboración de cilindros de 15 x 30.	36
Emulsión base poliestireno.	37
Ataque por cloruros.	38
DESARROLLO EXPERIMENTAL.	39
Caracterización del agregado pétreo.	39
Agregado grueso (gravas).	39
Agregado fino (arena).	47
Diseño y proporciónamiento de la mezcla de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute).	54
Recopilación de propiedades de los materiales.	54
Revenimiento y tamaño máximo.	54
Agua de mezclado y contenido de aire.	55
Relación agua-cemento.	56
Cálculo del contenido de cemento.	56
Estimación del contenido del agregado grueso y agregado fino.	57
Ajustes o correcciones por humedad del agregado.	57
Resistencia a la polarización lineal.	58
Solución salina.	58



Equipo.	59
Método de cálculos.	59
Resistividad eléctrica.	60
Velocidad de corrosión.....	61
RESULTADOS.	62
Caracterización del cemento.	62
Tiempos de fraguado.....	62
Caracterización del agregado pétreo.	63
Agregado grueso (grava).	63
Agregado fino (arena).	65
Diseño de mezcla.	67
Revenimiento y tamaño máximo.	67
Agua de mezclado y contenido de aire.....	67
Relación agua-cemento.	67
Calculo del contenido de cemento.	67
Potencial de corrosión.....	68
Velocidad de corrosión.....	75
ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85



INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Tipos de cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2014).....	4
Tabla 2 Clase resistente (NMX-C-414-ONNCCE-2014).....	5
Tabla 3 Rocas y minerales parcialmente reactivos con los agregados.	17
Tabla 4 Límites granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa.....	42
Tabla 5 Modulo de finura en arena [NMX-C-111-ONNCCE-2014].	49
Tabla 6 Límites de granulometría agregado fino.	49
Tabla 7 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción [ACI 211].....	54
Tabla 8 Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire [ACI 211].....	55
Tabla 9 Desviación estándar del concreto [ACI 211].	56
Tabla 10 Estimación del agregado grueso [ACI 211].....	57
Tabla 11 Criterios de evaluación [Red Durar].	60
Tabla 12 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.....	62
Tabla 13 Granulometría en agregados gruesos.....	63
Tabla 14 Límites granulométricos para agregado máximo.....	63
Tabla 15 Absorción en agregado grueso natural triturado.....	63
Tabla 16 Absorción en agregado grueso concreto reciclado.....	63
Tabla 17 Densidad agregado grueso natural triturado.....	64
Tabla 18 Densidad en agregado grueso concreto reciclado.....	64
Tabla 19 Masa volumétrica seca y suelta agregado grueso natural triturado.....	64
Tabla 20 Masa volumétrica seca y suelta agregado grueso concreto reciclado.....	64
Tabla 21 Masa volumétrica seca y varillada agregado grueso natural triturado.....	65
Tabla 22 Masa volumétrica seca y varillada agregado grueso concreto reciclado.....	65
Tabla 23 Granulometría en agregados finos.....	65
Tabla 24 Absorción en agregados finos.....	66
Tabla 25 Densidad en agregados finos.....	66
Tabla 26 Masa volumétrica seca y suelta en agregados finos.....	66
Tabla 27 Masa volumétrica seca y varillada en agregados finos.....	66
Tabla 28 Criterio de valoraciones potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO ₄ (DURAR,1998)..	68
Tabla 29 Clasificación de valores icorr [Red Durar]	75



INDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Número de puentes de acuerdo a los diferentes estados de la República Mexicana (Torres et al, 2010).	9
Ilustración 2 Morfología de gel de sílice, formado por la reacción álcali-sílice.....	15
Ilustración 3 Torre médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social. (Por Elizabeth Contreras Marín)	32
Ilustración 4 Localización del banco de materiales “La rocka”	33
Ilustración 5 Trituradora Denver.	34
Ilustración 6 Localización del banco de materiales “San José”	35
Ilustración 7 Elaboración de cilindros, Foto por Elizabeth Contreras Marín.....	36
Ilustración 8 Emulsión base poliestireno para ser adicionada.....	37
Ilustración 9 Cilindros dentro de solución salina para el ataque de cloruros.	38
Ilustración 10 Secado de material, Foto por Cipriano Bernabé Reyes.	39
Ilustración 11 Dimensión del agregado grueso, Foto por Elizabeth Contreras Marín.	43
Ilustración 12 Toma de revenimiento.	55
Ilustración 13 Pesado de NaCl, para ser adicionado al agua.	58
Ilustración 14 Equipo Gamry con el que se realizaron las pruebas.	59
Ilustración 15 Equipo para medir la resistencia eléctrica marca Nilsson.....	60
Ilustración 16 Cilindro en prueba de resistencia a la polarización lineal.	61
Ilustración 17 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.....	62
Ilustración 18 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.	69
Ilustración 19 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.	69
Ilustración 20 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.	70
Ilustración 21 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.	70
Ilustración 22 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.....	71
Ilustración 23 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.....	71
Ilustración 24 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.....	72
Ilustración 25 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.....	72
Ilustración 26 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.....	73
Ilustración 27 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.....	73
Ilustración 28 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.....	74
Ilustración 29 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.....	74



Ilustración 30 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.	76
Ilustración 31 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.	76
Ilustración 32 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.	77
Ilustración 33 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.	77
Ilustración 34 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.	78
Ilustración 35 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.	78
Ilustración 36 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.	79
Ilustración 37 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.	79
Ilustración 38 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.	80
Ilustración 39 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.	80
Ilustración 40 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.	81
Ilustración 41 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.	81



OBJETIVOS.

Elaborar un concreto para uso estructural, utilizando agregados de concreto reciclado y aditivos para mitigar el fenómeno de corrosión ante el ataque de cloruros para su implementación en estructuras en zonas costeras, como puentes y muelles.

Objetivos Específicos.

- Evaluar el comportamiento electroquímico del acero embebido en concreto.
- Comparar el comportamiento de especímenes elaborados con agregados reciclados, contra especímenes de agregados naturales triturados.
- Aprovechar los residuos industriales generados de la demolición de estructuras de concreto, para ser reutilizados en nuevas construcciones.
- Evaluar el comportamiento de la emulsión base poliestireno como aditivo a la mezcla de concreto.



INTRODUCCION.

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, gracias a sus cualidades de resistencia a la compresión y durabilidad, se obtiene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava (Pancorbo, 2013). Las obras de construcción civil aun siendo apropiadas para las cargas y exigencias para las cuales fueron proyectadas, no dejan de presentar algunos problemas serios de mantenimiento, durante su utilización (DURAR, 1998).

El concreto puede soportar de manera satisfactoria los esfuerzos a compresión, pero su capacidad de resistir esfuerzos a tensión es menor, aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a la compresión (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004). Es esta necesidad de poder resistir dichos esfuerzos a tensión lo que ha llevado a la combinación de concreto con acero de refuerzo, logrando un mayor desempeño de estos materiales en la construcción.

Como todo material de construcción, la utilización de concreto reforzado presenta desventajas a considerar, siendo una de las principales la susceptibilidad a la corrosión del acero. La combinación de acero y concreto, otorga una protección por parte del concreto al acero, esto debido al pH propio del concreto que es fuertemente alcalino (de 12.5 a 13), y que genera una capa pasivante que rodea al acero embebido en el concreto (González Fernández & Miranda Vidales, 2007). Cuando se presenta una mínima exposición de acero a agentes agresivos, se da inicio al proceso de corrosión, comprometiendo, según sea el daño en el acero, a la estructura.

Dentro de los diferentes parámetros que contribuyen a la degradación del concreto reforzado, se tienen: variaciones de temperatura, reacciones químicas, vibraciones y erosión, donde el fenómeno de la corrosión de las armaduras ocupa un lugar importantísimo (DURAR, 1998).

Se considera que entre un 25 y un 30% de la producción mundial de hierro es destruido anualmente por la corrosión. Las estimaciones avanzan aún más y proporcionan el dato de que los costes producidos por la corrosión oscilan cerca del 4% del PIB de los países más industrializados (Pancorbo, 2013).

Teniendo en cuenta la importancia del fenómeno de la corrosión en el acero, y las implicaciones que este lleva para una estructura, es necesario estudiarlo y comprenderlo, para de esta manera, proponer nuevas maneras de proteger el concreto reforzado.



MARCO TEÓRICO.

Concreto.

El concreto, en su sentido más amplio, es cualquier producto o masa hecha por el uso de cementante. Generalmente, es el producto de la reacción entre cemento hidráulico y agua (Neville & Brooks, 2010).

El concreto es básicamente la mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, que une a los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a la roca (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004). A estos materiales, en el momento de su amasado, se les puede añadir otros productos para mejorar algunas características determinadas (Pancorbo, 2013).

El ser humano ha incursionado en la búsqueda de materiales que permitan la construcción de estructuras que brinden dicha seguridad, de los cuales se han utilizado desde hojas, ramas, piedras, tierra e incluso nieve compactada (Aitcin, 2008).

El primer registro del uso del concreto en los tiempos modernos, se remonta a 1760 cuando, en Inglaterra, John Smeaton, descubrió mientras proyectaba el faro Eddystone, que una mezcla de caliza calcinada y arcilla daba lugar a un conglomerante hidráulico resistente al agua. Años después, en 1824, el británico Joseph Aspdin elaboró cemento mezclando arcilla y caliza de diferentes canteras y calentándolas en el horno. Se le llamó cemento Portland debido a la semejanza que éste guarda con semejanzas con las piedras propias de la isla de Portland, al sur de Inglaterra. (Harsem, 2005).

El concreto reforzado surge al unir el acero con el concreto gracias a la elevada adherencia entre ambos, lo cual produce una adecuada transferencia de propiedades mecánicas: buena resistencia del primero y la resistencia a la compresión del segundo (Pancorbo, 2013). El concreto reforzado se usó desde la tercera década del siglo XIX. Josep Monier, francés, es considerado el creador del concreto reforzado, fabricó macetas de concreto con refuerzo de mallas de alambre, registrando el sistema en 1867. En los años siguientes patentó el uso de esta técnica para la construcción de puentes, tanques, tuberías, vigas, columnas y escaleras. (Harsem, 2005).



Cemento.

El cemento portland es esencialmente silicato de calcio, que es producido por la cocción de fusión parcial, a una temperatura aproximada de 1500 °C, de una mezcla fina y homogeneizada de piedra caliza o creta y una cantidad apropiada de arcilla. Esta mezcla es comúnmente afinada con la adición de arena y/o óxido de hierro (Newman & Seng Choo, 2003).

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 A.C. y fue encontrado en 1985. En aproximadamente 2500 AC, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dicen que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la quema de sulfato de calcio (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Los primeros cementos de silicato de calcio fueron producidos por los Griegos y Romanos, que descubrieron la ceniza volcánica, que fue finamente molida y mezclada con cal y agua, produciendo un mortero endurecido que era resistente a la intemperie. A esta reacción se le conoce como reacción puzolánica y es la base de la contribución a la fuerza al rendimiento del concreto por materiales tales como cenizas volantes, microsílíce y metacaolín en el concreto moderno (Newman & Seng Choo, 2003).

Uno de los pioneros en la utilización de limos hidráulicos fue John Smeaton. A mediados del siglo XVIII John Smeaton descubrió que ciertos limos impuros (éstos contenían niveles adecuados de sílice y alúmina) tenían propiedades hidráulicas. Es decir, que contienen silicatos y aluminatos reactivos, que pudieran reaccionar con agua para dar hidratos duraderos, que se resistían a la acción del agua. Smeaton utilizó este material en el mortero empleado para construir el faro de Eddystone en 1759. (Newman & Seng Choo, 2003).

En 1824, el cemento moderno, conocido como cemento portland fue patentado por Joseph Aspdin, ladrillero albañil y constructor. Cemento portland es el nombre dado al cemento obtenido por la mezcla de material calcáreo y arcilloso, u otra sílica, alúmina, cocinándolos a temperatura de Clinker y moliéndolo, obteniendo como resultado clinker (Neville & Brooks, 2010).

Aspdin fue el primero a prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero a patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. El desarrollo del cemento portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).



El cemento portland es el más utilizado en estructuras de concreto reforzado, pudiendo ser la causa de su alteración los defectos en su cocción, molienda y proceso de fabricación. Un exceso de temperatura en el proceso de molienda del cemento daría origen a un falso fraguado lo que se traduce en un incremento de la necesidad de agua, provocándose una deshidratación parcial del yeso, lo que puede desencadenar en baja resistencia y problemas de retracción en el concreto. Los silicatos le otorgan al cemento su resistencia, mientras que el aluminato favorece el endurecimiento rápido en las primeras horas, aunque su presencia es muy negativa (Pancorbo, 2013).

Tipos de cemento.

En la norma (NMX-C-414-ONNCCE-2014, 2014) podemos encontrar los tipos de cemento que se encuentran en México, clasificándolos por sus componentes de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 1 Tipos de cemento (NMX-C-414-ONNCCE-2014).

Tipo.	Descripción.
Cemento Portland Ordinario (CPO).	Es producido a base de la molienda de clinker portland y usualmente sulfato de calcio (puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza).
Cemento Portland Puzolánico (CPP).	Es el cemento que resulta de la integración de clinker portland, materiales puzolánicos (6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total de cemento) y sulfato de calcio.
Cemento Portland con Escoria Granulada (CPEG).	Cemento que resulta de la integración principalmente de escoria granulada de alto horno (6% al 60%), clinker portland y sulfato de calcio.
Cemento Portland Compuesto (CPC).	Resulta de la integración de clinker portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En caso de la caliza, este puede ser componente único.
Cemento Portland con Humo de Sílice (CPS).	Es producto de la integración de clinker portland, humo de sílice (1% al 10%) y sulfato de calcio.
Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG).	Resultado de la integración de escoria granulada de alto horno (61% al 80%), clinker portland y sulfato de calcio.



Los cementos también se clasifican por su resistencia a la compresión en cinco clases de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2 Clase resistente (NMX-C-414-ONNCCE-2014).

Clase Resistente.	Descripción.
20	A los 28 días de edad, presenta una resistencia mínima a la compresión de 20 MPa.
30	A los 28 días de edad, presenta una resistencia mínima a la compresión de 30 MPa.
30R	A los 28 días de edad, presenta una resistencia mínima a la compresión de 30 MPa., y a los 3 días de edad debe de presentar una resistencia a la compresión de 20MPa.
40	A los 28 días de edad, presenta una resistencia mínima a la compresión de 40 MPa.
40R	A los 28 días de edad, presenta una resistencia mínima a la compresión de 40 MPa., y a los 3 días de edad debe de presentar una resistencia a la compresión de 30MPa.

Aparte, los cementos también pueden presentar características especiales:

- Resistencia a los sulfatos (RS).
- Baja reactividad álcali agregado (BRA).
- Bajo calor de hidratación (BCH).
- Blanco (B).

Los cementos se deben de clasificar por el tipo y la clase resistente a la que pertenecen. Si el cemento tiene especificada una resistencia a 3 días se añade la letra R. En el caso de que algún cemento tenga alguna de las características especiales su designación se completa de acuerdo a la nomenclatura indicada.

Una inadecuada selección del cemento en función del ambiente en el que se ubicará la edificación puede ser perjudicial. Además de los citados cementos existen otros tipos, consistiendo, excepto el de aluminato de calcio, en modificaciones del cemento portland para proporcionarle determinadas características. Algunos de estos cementos son (Pancorbo, 2013):

- Cementos puzolánicos.
- Cementos siderúrgicos.
- Cementos de aluminato de calcio.
- Cementos sin retracción.



Ventajas y desventajas de concreto.

Frente a otros materiales como el acero, la madera, etc., el concreto presenta las siguientes ventajas y desventajas (Harsem, 2005):

Ventajas.

- Es durable a lo largo del tiempo y no requiere de una gran inversión para su mantenimiento. Tiene una vida útil extensa.
- Tiene gran resistencia a la compresión en comparación a otros materiales.
- Es resistente al efecto del agua.
- En fuegos de intensidad media, el concreto reforzado sufre daños superficiales si se provee un adecuado recubrimiento al acero.
- Se le puede dar forma que uno desee haciendo uso del encofrado adecuado.
- Le confiere un carácter monolítico a las estructuras lo que les permite resistir más eficientemente las cargas laterales de viento o sismo.
- No requiere de mano de obra muy calificada.
- Su gran rigidez y masa evitan problemas de vibraciones en las estructuras erguidas con él.
- En la mayoría de lugares, es el material más económico.
- Por su gran peso propio, la influencia de las variaciones de cargas móviles es menor.

Desventajas.

- Tiene poca resistencia a la tensión, aproximadamente la décima parte de su resistencia a la compresión. Aunque el acero se coloca de modo que absorba estos esfuerzos, la formación de grietas es inevitable.
- Requiere de encofrado lo cual implica su habilitación, vaciado, espera hasta que el concreto alcance la resistencia requerida y desencofrado, con el tiempo que estas operaciones implican. El costo del encofrado puede alcanzar entre un tercio y dos tercios del costo total de la obra.
- Su relación resistente a la compresión versus peso está muy por debajo que la correspondiente al acero.
- Requiere de un permanente control de calidad, pues esta se ve afectada por las operaciones de mezcla, colocación, curado, etc.
- Presenta deformaciones variables con el tiempo. Bajo cargas sostenidas, las deflexiones en los elementos se incrementan con el tiempo.



En (Ghambir, 2013) se mencionan las siguientes ventajas y desventajas del concreto:

Ventajas.

- El concreto es económico a largo plazo, en comparación con otros materiales de ingeniería.
- El concreto posee una gran fuerza de compresión, y los efectos de corrosión y ambiente son mínimos.
- El nuevo concreto mixto (concreto verde) puede ser fácil de manejar y moldear o formar en cualquier forma o tamaño acorde a las especificaciones.
- Es fuerte en compresión y tiene ilimitadas aplicaciones estructurales en combinación con acero estructural.
- Puede ser rociado sobre, o inyectado en, grietas para ser reparadas.
- Puede ser bombeado y por lo tanto puede ser puesto en posiciones difíciles.
- Es durable, resistente y requiere muy poco mantenimiento.

Desventajas.

- Tiene poca resistencia a la tensión, por lo tanto, genera grietas fácilmente.
- El concreto fresco se encoje en el secado y se expande al humedecerse. Se tienen que realizar juntas provisionales para evitar grietas por la contracción del secado y el movimiento de la humedad.
- Bajo cargas sostenidas se somete a fluencia, lo que resulta en la reducción de la tensión previa en la construcción de concreto pretensado.
- No es completamente impermeable a la humedad y contiene sales solubles que pueden causar eflorescencia.
- Es susceptible a desintegrarse por ataque alcalino y sulfato.
- La falta de ductilidad del concreto como material es desventajosa con respecto al diseño sismo resistente.



Daños en estructuras de concreto reforzado.

Se define el fenómeno de la corrosión como la “reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medioambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”. La capa de óxido que se forma en el acero de refuerzo trae consigo un aumento de volumen en la barra, de 2 a 4 veces mayor que el volumen del acero original. Este óxido provoca la pérdida de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto, llegando a provocar el estallamiento del recubrimiento; con la correspondiente pérdida de las propiedades mecánicas, reduciendo la capacidad de resistencia del acero y consecuentemente la del elemento de concreto reforzado (Noricumbo, Vidaud Quintana, & Vidaud Quintana, 2014)

Uno de los ambientes agresivos que presenta mayores desafíos a una estructura es el marino, debido a la presencia de agentes desencadenantes como los cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y oxígeno, que bajo condiciones propicias pueden generar problemas de corrosión del acero de refuerzo, carbonatación y expansiones por ataque de sulfatos (Torres Espinal, 2016).

Con el pasar del tiempo, las estructuras expuestas a diferentes agentes de intemperismo pueden perder las principales condiciones estructurales para las que fueron diseñadas. Esta situación se puede presentar en las cimentaciones de puertos, muelles, plataformas petroleras y diversas estructuras construidas en zonas costeras cuyas bases sean columnas o pilotes submarinos. La disminución del área de sección, la pérdida parcial de elementos y las zonas expuestas son, entre otras situaciones, consecuencias típicas de la acción de la naturaleza contra los sistemas estructurales (ACPC, 2013).

El daño en las estructuras de concreto reforzadas ocurre por tres factores principales: la presencia de agua, la exposición a los agentes agresivos del medio y la porosidad o permeabilidad del concreto ocasionada por una relación alta de agua/material cementante, un curado deficiente, presencia de microfisuras o una colocación inadecuada (Torres Espinal, 2016).

En México el SIPUMEX cuenta con los datos del inventario de puentes mexicanos. Este proyecto, también conocido como el Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión, es sin duda el más importante en el área de puentes, que se ha desarrollado en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) desde su fundación (Torres Acosta, del Valle Moreno, Martínez Madrid, Pérez Quiroz, & Backhoff Polhs, 2010).



En la información que se ofrece acerca del número de los puentes de la red federal correspondiente a cada estado de la República Mexicana, se obtiene que el estado de Michoacán es el estado con mayor número de puentes en el país con 463, en la siguiente gráfica se presenta la distribución de puentes de acuerdo a los diferentes estados de la República Mexicana, datos obtenidos de el Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión:

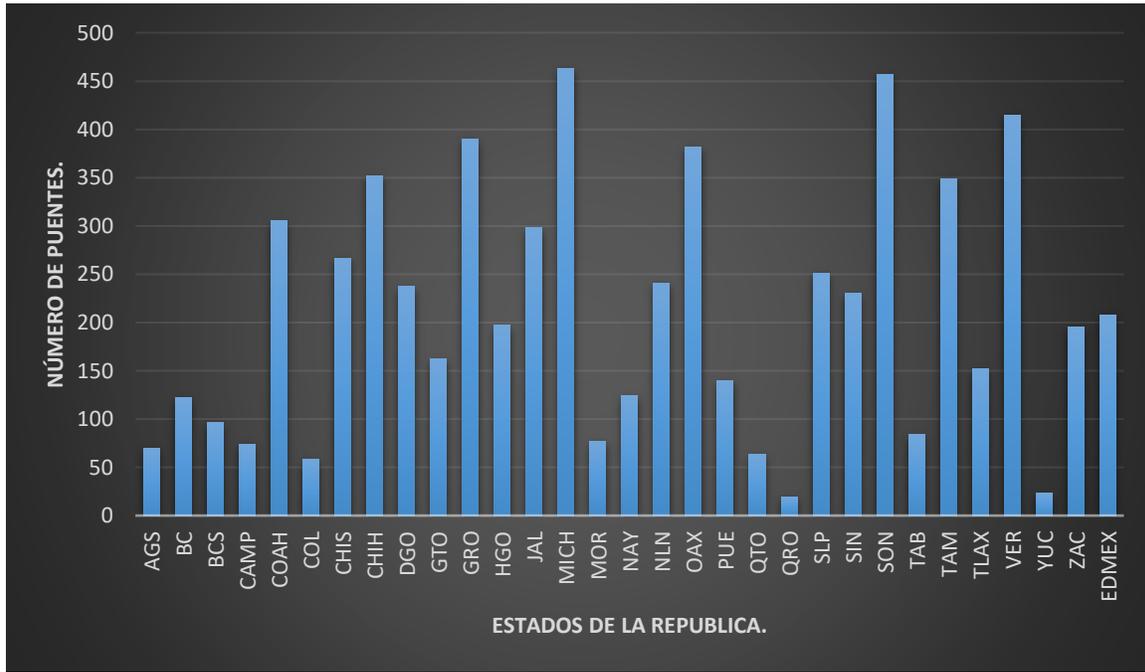


Ilustración 1 Número de puentes de acuerdo a los diferentes estados de la República Mexicana (Torres et al, 2010).

Agregados pétreos.

El concreto es un material compuesto, en el cual existe una gran variabilidad en las características de sus componentes, especialmente en los agregados pétreos. Siendo éstas de carácter físico y químico, producen diferentes efectos, tanto en la trabajabilidad del concreto como en su comportamiento en estado endurecido, el cual registrará su vida de servicio (Chan Yam, Romel, & Moreno, 2003).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993).



Arena natural, grava y roca triturada forman, sin duda, una parte fundamental de concretos y morteros, pero también son componentes muy importantes de asfaltos y MacAdams de construcción de carreteras, y se utilizan ampliamente como filtros y capas de drenaje, y como lastre ferroviario.

Las partículas de roca natural, son por mucho, la forma más común de agregado, pero el concreto reciclado y materiales manufacturados tales como escorias y arcillas expandidas, o gránulos de pizarra también son utilizados en un grado más limitado. Los agregados como material deben de ser fuertes, duraderos e inertes para dar un rendimiento satisfactorio. El tamaño de las partículas constituyentes del concreto debe de ser apropiado para la aplicación prevista (Newman & Seng Choo, 2003).

Los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante ya que influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto. La importancia del uso del tipo y de la calidad correctos del agregado no se puede subestimar. Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 pulg.). Los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 pulg.) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulg.) Algunos depósitos naturales de agregado, llamados de gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el concreto, después de un procesamiento mínimo. La grava y la arena naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados. Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros y los constructores al emplear el concreto, es la poca verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados (Cerón, Duarte, & Castillo, 1996).



Propiedades físicas de los agregados.

Los requisitos principales de un agregado para ser adecuado para el concreto es que sea: fuerte, duradero e inerte. Las partículas individuales idealmente deben ser de forma similar y ser uniformemente graduadas de grueso a fino dentro de su fracción de tamaño de partícula a la clasificación. La clasificación de agregados va más allá de las categorías de roca triturada, arena y grava y debe ser adecuado para su uso en la industria de la construcción y de tener una viabilidad científica y un comercial (Newman & Seng Choo, 2003).

El 100% de los concretos que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca. Las 3 familias de rocas conocidas, que son: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Uribe, 1991).

Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μ m; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm (Neville & Brooks, 2010).

De acuerdo a su peso específico, los agregados se dividen en ligero, normal y pesado; estas diferencias los hacen aptos para producir concreto con cierta variedad en el peso unitario, el cual es una característica básica del material (Alatorre y Uribe 1998).

Algunas otras importantes propiedades físicas de los agregados son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc. También es de suma importancia la granulometría de los agregados, y el tamaño máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado plástico, como en su estado endurecido (Chan Yam, Romel, & Moreno, 2003).

La forma y la textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades del concreto fresco más que las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Por otro lado, la granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco (Kosmatka & Panarese, 1992)



La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menos fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Alaejos & Fernández, 1996).

Reactividad Alkali-Agregado.

La reacción álcali-agregado es un fenómeno que afecta a innumerables estructuras de concreto por todo el mundo. La prevención es aún la única forma eficiente de evitar que esta se desarrolle; no obstante, los daños causados son irreversibles. La reacción álcali-agregado es una reacción lenta que ocurre internamente en la masa de concreto, formada por la reacción entre algunos minerales de los agregados e hidróxidos alcalinos normalmente naturales del cemento, pudiendo comprometer el desempeño de las estructuras afectadas. Fue descubierta en la década de los años treinta del siglo XX en California, y no fue hasta la década de los 70 que su investigación cobró auge; cuando comenzaron a surgir relatos de anomalías de dicha patología en diversos países (Cavalcante-da Silva, Barreto-Monteiro, & A, 2011).

Los agregados que contienen ciertos constituyentes pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos en el concreto. La reactividad es potencialmente perjudicial sólo cuando produce una expansión significativa (Mather, 1975).

La expansión excesiva del concreto, provocada por la reacción entre los iones hidróxilos liberados de compuestos alcalinos contenidos en la solución del poro del concreto y ciertas fases minerales (principalmente en forma de sílice) de los agregados, causa esfuerzos internos que provocan agrietamiento y desprendimientos del recubrimiento de las estructuras de concreto. El producto expansivo se presenta en forma de un gel hidratogelatinoso. Este tipo de deterioro es estimulado cuando se presentan concentraciones mínimas de álcalis (Na y K) y ciclos de humedecimiento y secado, lo que causa que el fluido del poro sea absorbido por el gel, incrementando su volumen e induciendo a esfuerzos perjudiciales en la interface pasta-agregado (Valdez, Fajardo, Hermosillo, & Flores, 2008).

Esta reactividad álcali-agregado (RAA) se presenta en dos formas—reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La RAS es más preocupante que la RAC porque la ocurrencia de agregados que contienen minerales reactivos de sílice es más común. Los agregados de carbonatos reactivos con álcalis tienen una composición específica que no es muy común.



La reactividad álcali-sílice se ha reconocido como una fuente potencial de deterioración desde finales de los años 30 (Stanton T. E., 2004). A pesar de que existan agregados reactivos en toda América Latina y EE.UU., la ocurrencia de RAS no es tan común. Existen muchas razones para esto:

- La mayoría de los agregados son estables en concreto de cemento hidráulico.
- Agregados con buenos registros de servicio son abundantes en muchas áreas.
- La mayoría de los concretos en servicio están suficientemente secos para inhibir RAS.
- En muchas mezclas de concreto, el contenido de álcalis del concreto es suficientemente bajo para controlar la RAS.
- Algunas formas de RAS no producen expansión nociva significativa.

Para reducir el potencial de la RAS se hace necesario entender su mecanismo, usar adecuadamente los ensayos para identificar los agregados potencialmente reactivos y, si necesario, tomar precauciones para minimizar el potencial de expansión y el agrietamiento resultante (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Una alternativa viable para reducir las consecuencias de estas reacciones es el uso de puzolanas en el concreto. Las puzolanas contienen sílice reactiva, la que finamente dividida reacciona rápidamente con los álcalis de la solución del poro, disminuyendo el poder destructivo del gel en la matriz cementante. Sin embargo, la efectividad de esta vía es función de la cantidad de fase amorfa y de las características microestructurales de la puzolana (Valdez, Fajardo, Hermosillo, & Flores, 2008).

Reacción Álcali-Sílice.

Las reacciones álcali-sílice (RAS) son una de las causas químicas de la degradación de los concretos con agregados pétreos que comprometen su durabilidad. El ataque por reacciones sulfáticas internas y por reacciones álcali-agregado puede provocar la degradación del concreto a través de las denominadas “reacciones expansivas de origen interna”. Las reacciones álcalis-agregado (RAA) engloban las reacciones álcali-sílice (RAS), álcali-silicato y álcali-carbonato, aunque sean las RAS las que vienen presentando una mayor relevancia (Barreto Santos, de Brito, & Santos Silva, 2009).



Entre los años 1940 y 1942 Stanton presentó dos trabajos acerca de deterioros en construcciones de concreto en California, E.U.A. Las fallas se presentaban marcadamente en obras de la región de Kansas-Nebraska en las que, por falta de agregados gruesos para el concreto, habían usado una mezcla más fina, que denominaban arena-grava. En sus estudios Stanton y sus colaboradores comprobaron que, en presencia de humedad permanente, se originaba una reacción entre los álcalis del cemento y alguno de los agregados, a consecuencia de la cual se producían aumentos de volumen que fisuraban el concreto (Stanton, Porter, Meder, & Nicol, 1942).

En los concretos con agregados pétreos, la alteración de las propiedades del concreto debido a las RAS origina principalmente la disminución de la capacidad de flexión y tensión, la reducción del módulo de elasticidad y, aunque en menor escala, de la resistencia a compresión. La reacción causa además otros efectos en el concreto como son, por ejemplo, el aumento de volumen o la fisuración de la superficie del concreto, abriendo un camino preferente para la entrada de los agentes externos agresivos que aumentan la susceptibilidad de las estructuras a los problemas de corrosión de la armadura, ciclos hielo-deshielo, entre otros (Barreto Santos, de Brito, & Santos Silva, 2009).

Las RAS se dan principalmente con agregados que contienen ciertas formas amorfas de sílice, son muy lentas y sus efectos solo se pueden observar a través del tiempo. Las condiciones necesarias para que se produzca la reacción son: la presencia de álcalis (Na_2O y K_2O), un agregado reactivo, humedad del orden de 80-85% y temperatura. La concentración permisible de álcalis en el concreto debe ser de 3 kg/m^3 y de 0.6% en cementos expresado en Na_2O (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Polder, 2004; Mejía & Rodríguez, 1999; Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

Para que la RAS ocurra es necesaria la presencia en simultáneo en el concreto de contenidos suficientes en humedad, álcalis y áridos reactivos (Fernandes, 2005). Hasta ahora se ha conducido a la explicación del mecanismo reaccional de la RAS para dos modelos distintos, el modelo topoquímico y el modelo de disolución-precipitación (Santos Silva, 2006). En el modelo topoquímico la reacción es descrita como siendo desarrollada en la superficie de los áridos reactivos, sin que necesariamente exista un traslado de especies reactivas del árido para la solución. En el modelo de disolución – precipitación la reacción es desarrollada en la solución intersticial después del cambio al estado iónico de las diversas especies reactivas (Barreto Santos, de Brito, & Santos Silva, 2009).

Las condiciones necesarias para que una puzolana logre inhibir la reacción álcali-agregado deben ser (Veronelli, 1978):

- Que la puzolana presente sílice reactiva
- Que presente muy alta superficie específica, es decir, que sea muy finamente molida.
- Que se encuentre íntimamente mezclada con el cemento.



Los materiales puzolánicos ayudan a mitigar la expansión provocada por la reacción álcali-sílice, siendo el más efectivo la adición de humo de sílice en porcentajes de 8 a 10% (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

En la investigación realizada por Valdez Tamez, et al., reporta reducción de más del 40% en la expansión de la reacción álcali-agregado en morteros sustituidos con puzolanas naturales de origen ígneo, con relación a morteros con cemento ordinario. La ilustración 7 muestra la morfología del gel de sílice (Valdez, Fajardo, Hermosillo, & Flores, 2008).

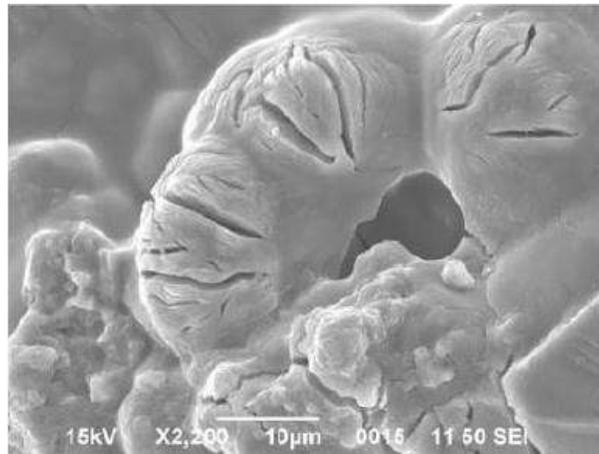


Ilustración 2 Morfología de gel de sílice, formado por la reacción álcali-sílice.

Síntomas visuales de la expansión pos RAS.

Los indicadores de RAS pueden ser: red de grietas, juntas cerradas o lascadas, desplazamiento relativo de diferentes partes de la estructura o el apareamiento de erupciones en la superficie. Como el deterioro por RAS es lento, el riesgo de la falla catastrófica es bajo. La RAS puede causar problemas de funcionalidad o utilización y puede exacerbar otros mecanismos de deterioración, como aquéllos que ocurren en la exposición a congelación, a descongelantes y a sulfatos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).



Mecanismo de la RAS.

La reacción álcali-sílice forma un gel que se hincha cuando absorbe agua de la pasta de cemento de su alrededor. Los productos de la reacción de RAS tienen una gran afinidad con la humedad. Este gel, al absorber agua, puede inducir presión, expansión y fisuración del agregado y de la pasta. La reacción se puede visualizar en dos etapas:

- Hidróxido alcalino + gel de sílice reactiva → producto de la reacción (gel álcali-sílice)
- Gel del producto de la reacción + humedad → expansión

La cantidad de gel que se forma en el concreto depende de la cantidad y del tipo de sílice y concentración del hidróxido alcalino. La presencia de gel no siempre coincide con el daño y, por lo tanto, la presencia de gel no indica necesariamente la ocurrencia de RAS (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Los iones hidróxido causan la destrucción de los enlaces atómicos de los compuestos de silicio; los iones álcali reaccionan con $\text{Si}(\text{OH})_4$ y forman un gel (Na, K)-Si-OH en el que se intercambian Na y K por Ca hasta que el gel se solidifica, el cual al absorber agua expande generando esfuerzos de tensión y por consecuencia agrietamientos (Bertolini, Elsener, Pedferri, & Polder, 2004).

Factores que afectan la RAS.

Para que la RAS ocurra, tres condiciones deben estar presentes:

- Una forma reactiva de sílice en el agregado,
- Una solución en el poro altamente alcalina (pH)
- Humedad suficiente.

Si una de estas condiciones está ausente, la reacción RAS no puede ocurrir (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Una de las principales fuentes de suministro de álcalis es el cemento aunque, como también indica el informe técnico TR3 (2003), cualquier fuente de sodio o potasio pueda ser una contribución para el desarrollo de la reacción. Así, la cantidad en álcalis del concreto debe contabilizar también las diversas fuentes internas y externas que sean potenciales suministradores de álcalis, concretamente los álcalis de los áridos (Barreto Santos, de Brito, & Santos Silva, 2009).



Influencia de los agregados.

Se consideran agregados potencialmente reactivos a los ópalos, riolitas y rocas volcánicas ácidas o intermedias; a la sílice hidratada que puede ser un menor constituyente de muchos tipos de rocas o formar cubiertas o incrustaciones en los granos de arena o grava; a las rocas volcánicas de mediano o alto contenido de sílice, excluyendo a los vidrios básicos como los basaltos; a las rocas opalinas y calcedonia incluyendo muchos cherts y flints, algunas filitas, tridimitas y zeolitas que pueden aumentar el contenido de álcalis por intercambio catiónico; dacitas, andesitas y sus tufas (Veronelli, 1978).

Algunas rocas y minerales potencialmente reactivas con los agregados son:

Tabla 3 Rocas y minerales parcialmente reactivos con los agregados.

Roca/Mineral.	Composición química.	Características.
Ópalo.	$SiO_2, \eta H_2O$	Amorfo.
Calcedonia.	SiO_2	Micro a criptocristalina, comúnmente fibrosa.
Formas de cuarzo.	SiO_2	Micro a criptocristalino o intensamente fracturado y/o con intrusiones.
Vidrios riolíticos, dacíticos y andesíticos o los respectivos productos criptocristalinos de desvitrificación. Algunas Filitas.	Silicatos con menor proporción de Al_2O_3 ; Fe_2O_3 ; Tierras alcalinas.	Vidrios o materiales criptocristalinos, tales como matrices de rocas volcánicas o fragmentos en tufas.

Concreto reciclado.

El concreto es el material de construcción más popular del mundo, y desde que, con él, los romanos construyeron el panteón hace unos 2 mil años, la humanidad ha tratado de encontrar variadas maneras de hacer que este sea más duradero. (Vidaud Quintana, Concreto autoconsolidable elaborado con agregados reciclados., 2015.)

Una tendencia mundial en la industria de la construcción es la preservación y protección del medioambiente mediante un desarrollo sustentable. Al ser el concreto el material más usado en la industria de la construcción, es evidente que la idea de reciclarlo resulta una importante alternativa para la necesaria viabilidad ecológica. El empleo de agregados reciclados para la fabricación de concreto tiene su origen en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial en Alemania; período en que los escombros provenientes de los bombardeos, se encontraban disponibles en grandes volúmenes en muchas partes de Europa (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados, 2015).



En los últimos años, el concepto del uso de concreto viejo de pavimentos, edificios y otras estructuras como fuente de agregados se ha indicado en muchos proyectos, resultando en ahorro de material y energía (ECCO 1999). El concreto reciclado es simplemente el concreto viejo que se trituró para producir agregado. Se lo ha usado satisfactoriamente como un agregado en sub-bases granulares, sub-bases de concreto magro, suelo-cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como reemplazo parcial del agregado nuevo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Es producido por la trituración, residuo de la demolición de al menos 95% en peso del concreto, y tiene un total de contaminante menor al 1% de la masa a granel. Otros materiales que pueden estar presentes en el concreto reciclado son grava, piedra triturada, concreto hidráulico (Cement Concrete & Aggregates Australia, 2008). El procedimiento involucra: demoler y remover el concreto viejo, trituración en los trituradores primarios y secundarios, remoción del acero de refuerzo y otros artículos embebidos, graduado y lavado y finalmente amontonamiento de los agregados fino y grueso resultantes. Se debe evitar que el producto final se contamine con polvo, yeso, madera y otros materiales extraños. El agregado de concreto reciclado generalmente tiene una mayor absorción y una gravedad específica menor que el agregado convencional. Esto resulta de la alta absorción del mortero poroso y de la pasta de cemento endurecido en el agregado de concreto reciclado. Los valores de absorción típicamente varían del 3% al 10%, dependiendo del concreto que se recicla. Esta absorción se encuentra entre los valores de agregados naturales y ligeros. Los valores aumentan a medida que el tamaño del agregado grueso disminuye (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Entre los principales beneficios de esta práctica, no solo se encuentra la solución a la problemática originada por la eliminación de estos subproductos de desecho; sino también que mediante el aprovechamiento de estos residuos se obtiene una nueva materia prima, con lo que además se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados, 2015).



Algunos beneficios clave del concreto reciclado incluyen (WBCSD, 2009):

- Reducción de desechos en vertederos de basura y degradación asociada de la tierra.
- Sustitución de recursos vírgenes y reducción de los costos ambientales asociados a la explotación de recursos naturales.
- Reducción de los costos de transporte: a menudo, el concreto puede ser reciclado en los sitios de construcción y demolición, o cerca de las áreas urbanas donde será reutilizado.
- Reducción del pago de tarifas e impuestos asociados al vertimiento de desechos.
- Buen desempeño en algunas aplicaciones debido a su buena compactación y propiedades de densidad (por ejemplo, como sub-base vial).
- En algunos casos, generación de empleos en la industria del reciclaje de concreto que de otro modo no existirían en otros sectores.

Es posible reciclar concreto a partir de:

- Devoluciones de concreto fresco (húmedo) en los camiones mezcladores.
- Desechos de producción en fábricas de prefabricados.
- Residuos de construcciones y demoliciones.

Los especialistas coinciden en sentido general en que se manifiesta una reducción de la resistencia a compresión en concretos en los que el agregado natural ha sido sustituido por agregado reciclado, para la misma relación agua/cemento y en comparación con los concretos convencionales. En general estudios consultados coinciden en que las pérdidas de resistencia, cuando se sustituye el 100% del agregado grueso, suelen encontrarse en el orden del 20%, pudiendo llegar a alcanzar en ocasiones el 30%. Asimismo, cuando la sustitución es menor al 50%, las pérdidas de resistencia se sitúan entre 2-15 %; llegando a exhibirse pérdidas de resistencia inferiores al 5%, cuando la sustitución de agregado natural por agregado reciclado se limita entre 20 y 30%. Por otra parte, el módulo de elasticidad es una de las propiedades del concreto reciclado que en mayor medida se ve afectada. Investigaciones desarrolladas previamente han demostrado que debido al mortero adherido el módulo de elasticidad de los concretos reciclados es inferior al correspondiente a los concretos elaborados íntegramente con agregados naturales. Investigaciones coinciden en que sustituciones de hasta el 20% tienen poca influencia sobre el desarrollo del módulo de elasticidad; a diferencia de cuando se realizan sustituciones del 25%, en las que el módulo se ve reducido en un 15% aproximadamente, con respecto a lo que se tendría en un concreto convencional con la misma dosificación. Para sustituciones del 50 y 100%, los descensos se sitúan en torno al 20 y el 40%, respectivamente (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados, 2015).



Concreto reforzado.

Las propiedades fundamentales que definen las características y calidad del concreto son: su elevada resistencia a la compresión y su gran durabilidad frente a numerosos medios naturales e industriales. Sin embargo, el concreto es un material que resiste mal a la tensión, lo que explica que, desde hace más de un siglo, se presente asociado a refuerzos de acero, constituyendo un material de construcción mixto: concreto reforzado (González Fernández & Miranda Vidales, 2007).

La idea principal al momento de utilizar concreto reforzado es que el acero provee a la estructura un complemento en la capacidad de soportar esfuerzos a flexión, como sabemos, el concreto es un material que tiene un gran desempeño soportando esfuerzos a compresión, sin embargo, su capacidad de soportar esfuerzos a flexión está en el rango de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cuadrado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & y Tanesi, 2004).

Concreto presforzado.

El concreto presforzado es un material formado de concreto y acero de alta resistencia que es intencionalmente tensionado para compensar los esfuerzos provocados por el peso del concreto y las cargas de la estructura. Se divide en: concreto pretensado, en el que el acero es puesto en tensión antes de la colada del concreto, permitiendo el relajamiento del acero después del fraguado final del concreto; y el concreto postensado, en el que el refuerzo del acero es puesto en tensión después del fraguado final del concreto (González Fernández & Miranda Vidales, 2007).

Corrosión.

La palabra corrosión metálica la designamos esencialmente al fenómeno de la transformación o destrucción de los metales por cualquier medio, bien sea físico, químico o electroquímico. Termodinámicamente, los materiales buscan alcanzar condiciones estables, los metales oxidados alcanzan alta estabilidad; entonces se diría que la corrosión es el proceso inverso a la metalurgia extractiva (Pancorbo, 2013).



La corrosión consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que la rodea. Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales (DURAR, 1998):

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

Durante el proceso de la cadena de corrosión, el acero aumenta su volumen y genera esfuerzos a tensión que no puede resistir el concreto; aparecen en él fisuras y grietas que dan paso al deterioro general del elemento. También cabe recordar que los elementos estructurales expuestos directamente al mar presentan materia orgánica adherida que debe ser removida en su totalidad (ACPC, 2013).

Tipos de corrosión.

En el concreto reforzado, las formas que puede adoptar la corrosión de la armadura son diversas. Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son (DURAR, 1998):

a) Corrosión localizada.

- Corrosión por picaduras: Son aquellas que se forman por la disolución localizada de la película pasiva, generalmente son el resultado del ingreso de iones cloruro al medio, ya sea que fueron adquiridos al estar presentes en el medio exterior o en la misma mezcla del concreto. En este caso la celda de corrosión se forma donde existe un área pasiva intacta, la cual actúa como cátodo en donde se reduce el oxígeno, mientras que existe una pequeña área en donde se pierde la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Una característica importante de las picaduras es que son autocatalíticas, es decir, generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento.

En el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para formar H^+ y Cl^- libre. Esto decrece el pH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio para seguir interviniendo en el proceso de corrosión, agravando el problema



b) Corrosión en espacios confinados.

Este tipo de corrosión puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo del oxígeno a esa zona, pudiendo crearse diferenciales de oxígeno que induce a la corrosión del refuerzo. Existen varias situaciones que pueden inducir este daño, entre ellas se pueden mencionar:

- Inyección de grietas (estructurales o por corrosión) con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al acero de refuerzo, presentándose en esta zona un proceso acelerado de corrosión debida a la falta de oxígeno.
- Corrosión de acero de refuerzo con revestimiento donde el uso de epóxicos afecta en el momento en el que éstos pierden adherencia con el acero.
- La presencia de iones cloruro en el concreto, debido a su acumulación en el espacio entre resultante entre el acero y el recubrimiento. Debido a esto el pH presente en este espacio disminuye y el proceso de corrosión se incrementa causado por un proceso autocatalítico, parecido al que se presenta en el fenómeno de picadura, ocasionando pérdida de adherencia.

c) Corrosión bajo tensión.

Ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tensión sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre preferencialmente en el concreto pre o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través de metal. El hidrógeno puede ser introducido al sistema de diferentes maneras: corrosión del acero, protección catódica, etc. Este fenómeno está asociado principalmente a la mala calidad del concreto, y la presencia de algunos iones introducidos mediante la utilización de aditivos específicos, o bien el uso de acero templado y revenido.

Para poder ser observado este tipo de daño es necesario hacer uso de la observación microscópica de la superficie de fractura. Es muy importante el cuidado que se tenga con este tipo de corrosión ya que el daño que se genera es del tipo catastrófico, ya que está asociado a una pérdida de ductilidad y a la fractura de la armadura.



d) Corrosión por corrientes de interferencia.

Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga, pueden ser definidas como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que ocurra este tipo de corrosión debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene un efecto más pronunciado sobre la corrosión, ya que está fluyendo continuamente en un solo sentido. Por el contrario, la corriente alterna, que invierte su dirección alrededor de una centena de veces por segundo, puede causar un efecto mucho menos profundo.

Las fuentes más comunes de este tipo de corrosión son: sistemas de protección catódica operando en las cercanías de estructuras de concreto reforzado, específicamente en medios de muy baja resistividad, como lo es el agua salobre; sistemas con potencia eléctrica, como los trenes eléctricos; máquinas de soldar, , donde la estructura conectada a tierra se encuentra a cierta distancia de los electrodos de soldar, corrientes telúricas (asociadas a la actividad solar y al campo magnético de la tierra). Independientemente de la fuente, las corrientes que fluyen por el electrolito son manifestaciones de diferencia de voltaje. Cuando en este intercambio de voltaje existe una estructura de concreto reforzada con acero, la entrada de corriente actuaría como cátodo, y la salida sería la zona anódica, siendo esta la causante de la disolución del metal, corroyéndolo.

Es importante indicar que, si el acero embebido en el concreto está en estado pasivo y no contaminado de cloruros, la corriente de interferencia no produciría la corrosión de acero. Por otro lado, si el concreto tiene cloruros, el proceso de corrosión se aceleraría de manera significativa.

e) Corrosión uniforme/generalizada.

Es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, resultante de la carbonatación del concreto y/o presencia de excesiva cantidad de cloruro. También puede ocurrir por efecto de lixiviación del concreto producida por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas.



Morfotipos de la corrosión.

Es posible clasificar los procesos de corrosión recurriendo a distintos criterios (Pancorbo, 2013):

- **Por la naturaleza de la sustancia corrosiva.** La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad, mientras que, para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
 - Corrosión húmeda o electroquímica: es la que se da en la mayoría de los casos, tiene lugar en los metales y es producida por líquidos. Existe corrosión electroquímica cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, disoluciones salinas o la humedad de la atmosfera.
 - Corrosión seca: la reacción de corrosión tiene lugar en un mecanismo diferente al electroquímico, consiste en una reacción directa entre el metal y un gas agresivo que normalmente es oxígeno. El resultado de esta reacción es la formación de óxidos.
- **Por los mecanismos de corrosión.** Estos comprenden las reacciones químicas, electroquímicas y las microbiológicas.
 - Corrosión química: se produce en aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no iónico.
 - Corrosión electroquímica: considerando desde el punto de vista de la participación de iones metálicos, todos los procesos de corrosión son electroquímicos. Sin embargo, es común designar corrosión electroquímica a la que implica un transporte simultaneo de electricidad a través de un electrolito.
 - Corrosión precoz: ocurre después que un recubrimiento de pintura ha secado al tacto, dándose simultáneamente las siguientes condiciones:
 - a) Una delgada película de pintura (espesor < 40 mm).
 - b) Un sustrato a baja temperatura.
 - c) Alta humedad en el ambiente.



- Corrosión por huella digital: por el manejo manual del material, debido a la impregnación dactilar sobre las superficies de las piezas metálicas. Es más notorio con personas que tienen condiciones ácidas en la piel o en piezas con acabados muy finos.
 - Corrosión por pila geológica o diferencias de composición del medio: es la que se encuentran sometidos los elementos metálicos en contacto con suelos de composición o permeabilidad variable. Cuando un tubo o material metálico atraviesa un electrolito no homogéneo se produce una diferencia de potencial.
 - Corrosión-erosión: Cuando se está en presencia de un flujo, generalmente en régimen turbulento, que se encuentra sobre una superficie metálica, éste aumenta la velocidad de corrosión hasta alcanzar un límite máximo debido al desgaste mecánico. El papel de la erosión se atribuye generalmente al desprendimiento de películas superficiales protectoras, por ejemplo, las películas formadas por el óxido generado por el aire o los productos adherentes de la corrosión.
 - Corrosión por corrientes vagabundas: se produce por la descarga a tierra normalmente de corrientes continuas dispersas existentes en algunas zonas y generadas por instalaciones de cubas electrolíticas, ferrocarriles o tranvías eléctricos, soldadores eléctricos, etc.
 - Corrosión microbiológica: se produce en conducciones e instalaciones por la actuación de organismos microbianos (hongos, bacterias y otros microorganismos), ya sea porque estos fabriquen sustancias agresivas, tales como protones o iones sulfuro o porque actúan como catalizadores de las reacciones de corrosión.
- **Por la apariencia del metal corroído.** La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas pequeñas áreas.
- Ataque generalizado o uniforme: es la forma más benigna de la corrosión y el tipo más comúnmente encontrado, caracterizándose por el adelgazamiento progresivo y uniforme del componente metálico. El ataque se extiende en forma generalizada.



- Corrosión atmosférica (seca y húmeda): Se calcula que más del 80% del material metálico está expuesto a la atmosfera, donde existe una capa de humedad que actúa como electrolito, generando una corrosión de carácter electroquímico. El oxígeno del aire y los contaminantes atmosféricos inciden intensamente en la corrosión metálica.
- Ataque selectivo o localizado: se da solamente en una zona y concreta de la superficie del metal, manifestándose por la aparición de picaduras o perforaciones aisladas. Puede ser de dos tipos: corrosión por aireación diferencial y corrosión bimetalica o ataque galvánico. Se caracteriza por la disolución acelerada del metal menos noble.
- Corrosión en placas: la corrosión se extiende en algunas zonas, pero se presenta más como un ataque general.
- El ataque en hendiduras: la corrosión se concentra en huecos y, de hecho, en donde quiera que se tiene algún tipo de discontinuidad geométrica que influye en la disponibilidad del agente corroyente.
- Corrosión por aireación diferencial: se produce en aquellos lugares que favorezcan la acumulación puntal de agua/humedad en los ambientes secos o de aire o en los medios sumergidos, también puede presentarse en el interior de conductos por la obstrucción o las alteraciones del flujo, que pueden generar zonas más aireadas dentro de la propia tubería.
- Socavamiento anódico: tiene lugar debajo de las películas de pintura y en la que la reacción anódica es la causa principal de la delaminación o desgaste del recubrimiento.
- Ataque por picadura de punto o pitting: Es un caso límite de ataque localizado, donde la corrosión se concentra en un punto muy pequeño. Se presenta en forma de perforaciones en zonas relativamente no atacadas, y se desarrolla de tal manera que su ancho es comparativamente menor que su profundidad.
- Corrosión filiforme: el proceso de corrosión se manifiesta formando filamentos y representa un tipo particular de socavamiento anódico.



- Corrosión por nidos de hormiga: También se conoce como corrosión por ácido fórmico, tiene lugar en tubos de cobre utilizados en sistemas de aire acondicionado, ocasionando la pérdida de líquido refrigerante y la consecuente contaminación ambiental.
- Corrosión por fricción o fretting: es la que se produce por el movimiento relativamente pequeño de dos sustancias en contacto, de las que una o ambas son metales. El movimiento genera una serie de picaduras en la superficie de metal, que son ocultadas por los productos de la corrosión y sólo son visibles cuando éstos son eliminados.
- Corrosión por cavitación: producida por la formación y colapso de burbujas en la superficie del metal (en contacto con un líquido).
- Corrosión selectiva de las aleaciones: se produce en las aleaciones polifásicas, al efectuarse la separación de uno de los elementos de una aleación.
- Corrosión por exfoliación: es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se extiende debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura. Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie.

Factores que afectan y desencadenan la corrosión.

La corrosión en los metales es un fenómeno natural. Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en reducir los óxidos e bajos hornos y luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido. Los materiales, y en especial los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestos a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente (Pancorbo, 2013).

Factores desencadenantes de la corrosión en las estructuras de concreto armado serian todos aquellos capaces de imponer la transición del estado pasivo al activo (Climent Llorca, Garcés Terradillos, & Zornoza Gómez, 2008). Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos en el proceso de corrosión de las armaduras. De tal manera que: la dosificación, la compacidad y homogeneidad del concreto, así como el espesor de cubrimiento del concreto, el estado superficial de la armadura y la humedad ambiental son factores que afectan este proceso (DURAR, 1998).



La Red DURAR comenta que los factores que afectan y desencadenan la corrosión son los siguientes:

Dosificación del concreto.

El concreto debe de ser sólido, homogéneo, compacto y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las agresiones de los agentes externos. La dosificación del concreto es un factor que influye significativamente en el comportamiento futuro de este, como elemento protector del acero de refuerzo.

El concreto que envuelve las barras de acero de una armadura debe cumplir una doble función protectora:

- Como barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos.
- Creando una capa pasivante sobre el acero, en virtud de su alcalinidad, que lo mantiene protegido durante tiempo indefinido.

Es determinante dosificar el concreto por métodos que proporcionen su máxima compacidad, lo que significa garantizar su mínima porosidad. Hay que tener en cuenta los siguientes factores que garantizan su máxima compacidad y, por ende, su durabilidad:

- Proporcionar agregados pétreos a la mezcla, que garantice el menor volumen de vacío que será ocupado por la pasta de cemento endurecida.
- La influencia que ejerce la cantidad de agua de la mezcla en la consistencia del concreto en estado fresco.
- La influencia de la relación agua-cemento.
- La influencia del grado de hidratación del cemento en la cantidad de poros del concreto endurecido.
- La influencia de la “característica” de los agregados pétreos que se empleen en la calidad final del concreto.
- La acción positiva de ciertas adiciones activas al cemento.

Compacidad y homogeneidad.

La compacidad es la propiedad más importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la primera, expresa en qué magnitud está protegido el acero de la armadura minimizando significativamente la carbonatación y el ataque de los cloruros, que son los agentes agresivos más importantes.



Se mide como la relación entre la suma de los valores absolutos de materias sólidas (grava, arena y pasta de cemento endurecida) contenida en un metro cúbico de concreto, referente al volumen aparente del mismo. Puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta a la homogeneidad del concreto, propiciando la segregación de los materiales.

La homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda la masa. Se puede lograr una buena homogeneidad mediante un adecuado proceso tecnológico de producción, transporte, colocación, compactación y curado.

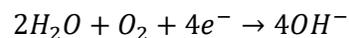
Espesor de recubrimiento del concreto.

La protección que confiere el concreto que recubre las barras de acero de una estructura de concreto reforzado o pretensado, dependerá del grado de impermeabilidad de este, que a su vez estará dada por su compacidad y homogeneidad en esa zona.

El espesor de esta capa de concreto es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto. Estructuralmente es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, ya que, al ser una zona desprovista de acero, pudiese verse afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a esfuerzos de tensión. Se recomienda que en ambientes agresivos se utilice una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación a/c, garantizando que espesores de 5.0 -7.5 cm permitan una alta durabilidad de la estructura.

Humedad ambiental.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de la reducción del oxígeno.



Efecto de la temperatura.

La temperatura juega un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento proporciona la movilidad de las moléculas, facilitando el transporte de sustancias; por otro lado, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad en el material.

Existe un efecto opuesto entre la humedad y la temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.



Estado superficial del acero.

En términos generales, el acero cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformación, se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie está libre de dicha capa. No obstante, las presencias de productos de oxidación producidos por la corrosión atmosférica no necesariamente demuestran igual comportamiento, siendo altamente probable que de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, se propicie la corrosión.

Tensiones mecánicas del acero.

En aceros sometidos a grandes tensiones, como lo son los aceros pre- y postensados, no presentan problemas si el acero está exento de imperfecciones y de óxidos superficiales y si el concreto que lo rodea es de elevada calidad. En el concreto donde la carbonatación alcance el acero tensado o donde haya ciertos iones despasivantes, el riesgo de una corrosión bajo tensión existe.

Esta corrosión se caracteriza por incubar grietas no visibles al ojo humano, que se propagan con relativa rapidez hacia el interior. Alcanzada una pérdida de sección crítica, el acero se rompe de forma frágil.

Iones despasivantes.

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

Cloruros.

Provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a picaduras, las cuales reducen la sección de trabajo del acero, en un tiempo relativamente corto. Para que estén presentes en el concreto deben ocurrir dos cosas:

- Presencia de éstos en materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos).
- Penetración desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

Carbonatación.

Proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material. El cambio abrupto de pH que se produce en el interior del concreto es el que da lugar a la aparición de un frente carbonatado, que se revela muy bien con el indicador fenolftaleína.



Cuando este frente llega hasta el acero, esta se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH. El tiempo que tarde en avanzar la carbonatación tiene un carácter importante, por lo que debe poner atención a la velocidad de avance, la cual está en función de: a) el contenido de humedad del concreto, y b) su porosidad y c) su contenido en materia alcalina carbonatable.

El contenido de humedad en los poros es fundamental ya que, de encontrarse completamente secos, el CO_2 no podrá reaccionar y, si están completamente saturados, su penetración será muy lenta, debido a la baja solubilidad del CO_2 en el agua. Por lo que se requiere que los poros se encuentren parcialmente saturados (50 y 80%) para que se presentes condiciones óptimas para la carbonatación.

Lixiviación.

La degradación del concreto no sólo puede ser causada por agua que contenga impurezas o por aguas de condensación industrial, aguas de fusión de glaciares, aguas de nieve, aguas de lluvias, aguas pantanosas blandas y algunas aguas procedentes de grandes profundidades, estas sustancias tienden a disolver el calcio de la estructura.

La lixiviación del hidróxido de calcio del concreto, es decir, la reducción de su contenido de CaO , conduce, por lo tanto, a la destrucción de los restantes componentes del concreto, silicatos, aluminatos y ferritos hidratados; lo que lleva al concreto a desmoronarse y perder su resistencia.



METODOLOGÍA.

Obtención de agregado natural triturado y agregado reciclado.

El agregado reciclado fue obtenido de la demolición de la torre médica del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicada en la avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. El triturado de dicho material se llevó a cabo en el instituto de investigaciones metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se corroboró que ninguno de los agregados reciclados presentara impurezas del tipo madera, vidrios, plásticos, etc., ni la presencia de arcillas.



Ilustración 3 Torre médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social. (Por Elizabeth Contreras Marín).



Se utilizó grava triturada, puesto que la de origen volcánico es muy porosa afectando a las propiedades mecánicas. Los materiales pétreos empleados son de la región, el agregado natural triturado se obtuvo del banco “La rocka” ubicado en la localidad de Cuto de la Esperanza en Tarímbaro, Michoacán.



Ilustración 4 Localización del banco de materiales “La rocka”.



Trituradora de agregado reciclado.

La trituración del agregado reciclado procedente de la torre medica del Instituto Mexicano del Seguro Social, se realizó en una trituradora marca Denver de quijadas fijas de 5 cm por 10 cm de separación entre quijadas. El dimensionamiento de las quijadas dio el parámetro para la elección de bloques en el lugar de la demolición.

Una vez triturado el material se realizó una clasificación con respecto a su diámetro, por medio de la malla número 4. El material que pasa la malla número 4, es decir, material con dimensiones menores a 4.76 mm, correspondió a material que podría sustituir a la arena. Mientras, el material que se retenía en la malla número 4, correspondió al material que podría sustituir a la grava. Se lograron triturar 826 kg de los cuales el 67.67% correspondió a grava y 32.33% a arena. Aproximadamente un tercio del material era arena (Contreras Marin, 2016).



Ilustración 5 Trituradora Denver.



Obtención de agregado natural fino.

Este material se obtuvo del banco de materiales “San José”, en la localidad de Cerritos Morelia, Michoacán, que se encuentra a espaldas del banco de materiales “El Jamanal”.



Ilustración 6 Localización del banco de materiales “San José”.

Elaboración de cilindros de 15 x 30

Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX) vigentes, por medio del método del ACI (American Concrete Institute) para calcular el proporcionamiento, con un cemento portland compuesto de 30 MPa de resistencia (CPC-30R). Se realizaron 6 mezclas:

- TR-T (agregado triturado, testigo)
- CR-T (agregado reciclado, testigo)
- TR-EM 1% (agregado triturado, emulsión al 1%)
- TR-EM 4% (agregado triturado, emulsión al 4%)
- CR-EM 1% (agregado reciclado, emulsión al 1%)
- CR-EM 4% (agregado reciclado, emulsión al 4%)

La emulsión se adicionó en 1% y 4% respecto al peso del cemento. Esto se determinó a partir de la prueba de tiempos de fraguado, en la cual se observó que adiciones del 1% al 6% retardaban los tiempos de fraguado inicial, siendo no mayores a 7 horas. La normativa mexicana (NMX-C-177-1997-ONNCE, 1997), indica que las adiciones tienen que estar por debajo del 5% en todos los casos.



Ilustración 7 Elaboración de cilindros, Foto por Elizabeth Contreras Marín



Emulsión base poliestireno.

La emulsión es elaborada a partir de poliestireno post-consumo disuelto en solvente (acetato de etilo), lecitina de soya y agua. Se agregaron los siguientes reactivos en el su correspondiente orden: poliestireno disuelto en solvente, agente surfactante y agua. La emulsión se preparará agitando los tres componentes anteriormente mencionados durante 2 minutos en un emulsificador.

Las finalidades de este aditivo es retardar los tiempos de fraguado, otorgar mayor trabajabilidad de las mezclas, ayudar a mitigar el fenómeno de la corrosión.



Ilustración 8 Emulsión base poliestireno para ser adicionada.

Ataque por cloruros.

El ataque por cloruros se llevó a cabo por medio de ciclos de húmedo y secado, para el cual se necesitó preparar una solución salina con el 3.5% de NaCl en peso con respecto al agua, esto para simular las condiciones de ataque por cloruros en zonas costeras. Las probetas estuvieron sumergidas en agua para su curado (agua limpia de contaminantes) durante dos años, después de eso se comprobó el estado pasivo de las varillas. Los ciclos de húmedo y secado se realizaron de la siguiente manera:

- Durante una semana las probetas quedaban parcialmente sumergidas en la solución salina.
- Se sacaron y se dejaban secar durante tres semanas.

Durante todo el proceso se tomaron lecturas de resistencia a la polarización, potencial de corrosión, se controló el porcentaje de NaCl en el agua, teniendo en cuenta la pérdida de agua por evaporación.



Ilustración 9 Cilindros dentro de solución salina para el ataque de cloruros.



DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Caracterización del agregado pétreo

Agregado grueso (gravas).

Humedad actual.

Al realizar resta prueba, se busca poder determinar la cantidad de agua que contiene una grava en estado natural, es decir, en el momento que va a ser utilizada. Su objetivo es poder tener un valor de corrección en la cantidad de agua de mezclado, conservando la relación agua-cemento de diseño. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-166-ONNCCE-2006, 2006).

Procedimiento.

1. Se realiza un cuarteo y se toma una muestra representativa de 400 a 500 gr, determinando su masa con una aproximación al 0.1%, registrándola como masa húmeda (Mh).
2. Se coloca la muestra en una charola para ser expuesta a la fuente de calor (parrilla), eliminando el agua contenida en la grava. La muestra se encuentra seca cuando el calor le causa menos del 0.1% de pérdida adicional en masa.
3. Una vez seca la muestra, se determina su masa en gramos con una precisión de 0.1%, registrándolo como masa seca (Ms).

Cálculos.

$$\%H = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

- %H: porciento total de humedad.
- Mh: masa húmeda del material, en gramos.
- Ms: masa seca del material, en gramos.



Ilustración 10 Secado de material, Foto por Cipriano Bernabé Reyes.



Granulometría.

La prueba de granulometría es una medición y graduación que nos ayuda a conocer la distribución de los diámetros de partículas en material, así como el tamaño máximo de la grava. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-077-ONNCCE-1997, 1997).

Procedimiento.

1. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se hace el cuarteo para obtener una muestra de aproximadamente la capacidad del recipiente con el que se hizo la prueba de Masas Volumétricas.
2. Se trabaja individualmente cada malla (3/4", 1/2", 3/8" y No.4) usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma:
 - a) Se coloca en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado su masa. Dentro de la segunda charola se pone la malla de mayor tamaño y con el cucharón se colocan porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas.
 - b) Se agita la malla con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta. Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.
 - c) Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en la malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.
3. Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.
4. La masa total del material después del cribado se debe checar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.



Cálculos.

- Se hace realiza una tabla con cinco columnas.
- En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\%Retenido = \frac{M_N}{\sum W_T} * 100$$

Donde:

- % Retenido = porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.
- MN= masa del material retenido en la malla N, en gramos.
- $\sum MT$ = suma de las masas retenidas de la columna 2, en gramos.

En la cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados de la siguiente manera:

$$\%Retenido\ acumulado =$$

$$\%Retenido\ en\ la\ malla\ N + \%Retenido\ acumulado\ en\ la\ malla\ anterior$$

En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera:

$$\%Que\ pasa = 100 - \% Retenido\ acumulado\ en\ la\ malla\ N$$

El tamaño máximo del agregado es la dimensión de la criba de menor abertura por la que pasa la totalidad de un agregado.

El tamaño máximo nominal del agregado es el que se nombra en las especificaciones como la criba de menor abertura por la que pasa la cantidad agregado permitido.



Especificaciones.

Tabla 4 Límites granulométricos del agregado grueso, en porcentaje que pasa.

N°	Tamaño máximo nominal mm (in)	100 4"	90 3 ½"	75 3"	63 2 ½"	50 2"	37.5 1 ½"	25 1"	19 ¾"	12 ½"	9.5 ¾"	4.75 5 N°4	2.36 6 N°8	1.18 N°16
1	90 a 37.5 (3 ½" – 1 ½")	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2	63 a 37.5 (3 ½" – 1 ½")	-	-	100	90 a 100	37 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
3	50 a 25 (2" – 1")	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
35 7	50 a 4.75 (2" – No.4)	-	-	-	100	90 a 100	-	35 a 70	-	0 a 10	-	0 a 5	-	-
4	37.5 a 19 (1 ½" – ¾")	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
46 7	37.5 a 4.75 (1 ½" – No.4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
5	25 a 12.5 (1" – ½")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
56	25 a 9.5 (1" – 3/8")	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
57	25 a 4.75 (1" – No.4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
6	19 a 9.5 (¾" – 3/8")	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
67	19 a 4.75 (¾" – No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 19	0 a 5	-
7	12.5 a 4.75 (½" – No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
8	9.5 a 2.36 (¾" – No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
89	9.5 a 1.18 (¾" – No.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10



9	4.75 a 1.18 (No.4 – No.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10
---	-------------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	-------------	---------------	-----------



Ilustración 11 Dimensión del agregado grueso, Foto por Elizabeth Contreras Marín.

Absorción.

Gracias a esta prueba podemos determinar la capacidad máxima de absorción de la grava, expresándola en porcentaje respecto a su peso seco. Este procedimiento es con base en la norma (NMX-C-164-ONNCCE-2014, 2014).

Procedimiento.

1. Se toma la grava y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg.
2. De la fracción de material retenida en la malla 3/8 se toman aproximadamente 300 gramos, se deja saturando la grava durante 24hr., secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como masa saturada y superficialmente seca (M_h).
3. La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua.
4. Para saber cuándo el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.
5. Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material (M_s).



Cálculos.

$$\%Absorción = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

- %Absorción: porcentaje de absorción, en %.
- Mh: masa de la muestra saturada y superficialmente seca, en gramos.
- Ms: masa de la muestra seca, en gramos.

Densidad.

Con esta prueba se logra determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen. Este procedimiento es con base en la norma (NMX-C-164-ONNCCE-2014, 2014).

Procedimiento.

1. Se toma la grava y se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 Kg.
2. De la fracción de material retenida en la malla 3/8 se toman aproximadamente 300 gramos, se deja saturando la grava durante 24hr., secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como masa de la muestra (M).
3. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada.
4. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.
5. Se extrae el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 20 h. Transcurrido este tiempo, el material se saca del horno y se deja enfriar hasta temperatura ambiente.
6. Una vez enfriado, se determina la masa del material seco y se registra como M_i , en gramos.

Cálculos.

$$D = \frac{M_i}{V(D_w)}$$

Donde:

- D: densidad o gravedad específica, adimensional.
- M_i : masa del material completamente seco, en gramos.
- V: volumen del material en cm^3 .
- D_w : densidad del agua, se considera igual a 1gr/cm .



Masa volumétrica seca y suelta. (M.V.S.S.).

El objetivo de la prueba es obtener la masa de la grava por unidad de volumen como se encuentra en estado natural seco y suelto. Los procedimientos descritos nos ayudan a obtener la relación que existe entre la masa y el volumen de un agregado. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Procedimiento.

1. Se seca la muestra hasta una masa constante, extendiendo el material al sol para lograr el secado.
2. Teniendo seco el material, se cuartea para obtener una muestra representativa del mismo. Se determina la masa y el volumen del recipiente que se va a utilizar.
3. Con la ayuda de un cucharón, se llena el recipiente, dejando caer la grava a la altura de 5 cm. del borde superior del molde hasta que quede parcialmente lleno y forme un cono el material.
4. Se enrasa con la varilla punta de bala o con la mano.
5. Se pesa para determinas la masa de la muestra.

Cálculos.

$$M.V.S.V. = \frac{M - T}{V}$$

Donde:

- M.V.S.V.: masa volumétrica seca y varillada en Kg/m³.
- M: masa de la grava con el recipiente en kilogramos.
- T: masa del recipiente en kilogramos.
- V: volumen del recipiente en m³.



Masa volumétrica seca y varillada (M.V.S.V.).

El objetivo de la prueba es obtener la masa de la grava por unidad de volumen. Los procedimientos descritos nos ayudan a obtener la relación que existe entre la masa y el volumen de un agregado. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Procedimiento.

1. Una vez que el material está seco se cuartea el agregado para obtener una muestra representativa. Se obtiene la masa y el volumen exacto del recipiente que se va a utilizar.
2. Con la ayuda de un cucharón, se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.
3. Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes, distribuidos en la superficie total.
4. Se enrasa el recipiente y se determina la masa de la muestra.

Cálculos.

La masa se determina con la siguiente formula:

$$M.V.S.V. = \frac{M - T}{V}$$

Donde:

- M.V.S.V.: masa volumétrica seca y varillada en Kg/m³.
- M: masa de la grava compactada con el recipiente en kilogramos.
- T: masa del recipiente en kilogramos.
- V: volumen del recipiente en m³.



Agregado fino (arena).

Humedad actual.

Al realizar resta prueba, se busca poder determinar la cantidad de agua que contiene una arena en estado natural, es decir, en el momento que va a ser utilizada. Su objetivo es poder tener un valor de corrección en la cantidad de agua de mezclado, conservando la relación agua-cemento de diseño. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-166-ONNCCE-2006, 2006).

Procedimiento.

1. Se realiza un cuarteo y se toma una muestra representativa de 300 gr, determinando su masa con una aproximación al 0.1%, registrándola como masa húmeda (Mh).
2. Se coloca la muestra en una charola para ser expuesta a la fuente de calor (parrilla), eliminando el agua contenida en la grava. La muestra se encuentra seca cuando el calor le causa menos del 0.1% de pérdida adicional en masa.
3. Una vez seca la muestra, se determina su masa en gramos con una precisión de 0.1%, registrándolo como masa seca (Ms).

Cálculos.

$$\%H = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

- %H: porciento total de humedad.
- Mh: masa húmeda del material, en gramos.
- Ms: masa seca del material, en gramos.



Granulometría.

La prueba de granulometría es una medición y graduación que nos ayuda a conocer la distribución de los diámetros de partículas en material, así como el módulo de finura. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-077-ONNCCE-1997, 1997).

Procedimiento.

1. Del agregado fino, se toma muestra representativa de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C y cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos.
3. Se colocan las mallas en orden decreciente (No.4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se vierte la muestra de 500 gramos en la malla superior y se tapa.
4. Se agitan las mallas ya sea en forma manual o con algún equipo mecánico por un periodo suficiente, que una vez terminado el cribado, no más del 1% en masa del material retenido en cualquier malla individual, pase por ella durante un minuto de cribado continuo a mano.
5. Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés.
6. La masa total del material después del cribado se debe checar con la masa original al inicio de la prueba. Si las cantidades difieren en más de un 0.3%, basado en la masa de la muestra seca inicial, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación

Cálculos.

- Se hace realiza una tabla con cinco columnas.
- En la primera columna se escriben los números de las mallas en orden decreciente.
- En la segunda columna se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas de la columna 1.
- En la tercera columna se anotan los porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente expresión:

$$\%Retenido = \frac{M_n}{\sum W_T} * 100$$

Donde:

- % Retenido: porcentaje retenido en la malla N respecto a la masa original, en %.
- M_N : masa del material retenido en la malla N, en gramos.
- $\sum M_T$: suma de las masas retenidas de la columna 2, en gramos.



La cuarta columna se anotan los porcentajes retenidos acumulados con la siguiente formula:

$$\% \text{Retenido acumulado} =$$

$$\% \text{Retenido en la malla } N + \% \text{Retenido acumulado en la malla anterior}$$

En la columna cinco se anotan los porcentajes que pasa de la siguiente manera:

$$\% \text{Que pasa} = 100 - \% \text{Retenido acumulado en la malla } N$$

El módulo de finura se calcula de la siguiente manera:

$$M.F. = \frac{\sum \text{del } \% \text{ retenido acumulado en las mallas } 100, 50, 30, 16, 8}{100} * 100$$

Especificaciones.

Tabla 5 Modulo de finura en arena [NMX-C-111-ONNCCE-2014].

Módulo de finura en la arena.	
Entre 2.3 y 3.2	

Tabla 6 Limites de granulometría agregado fino.

Malla.	NMX-C-111-ONNCCE-2004
Mm (N°)	% Que pasa.
9.5 (3/8")	100
4.75 (No. 4)	95-100
2.36 (No. 8)	80-100
1.18 (No. 16)	50-85
0.60 (No. 30)	25-60
0.30 (No. 50)	10-30
0.15 (No. 100)	2-10

(NMX-C-111-ONNCCE-2004, 2004)



Absorción.

Gracias a esta prueba podemos determinar la capacidad máxima de absorción de la arena, expresándola en porcentaje respecto a su peso seco. Este procedimiento es con base en la norma (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

Procedimiento.

1. Del agregado fino, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 kilogramo, se pone a saturar durante 24 horas.
2. Se seca superficialmente la muestra por medio del molde troncocónico de la siguiente manera:
 - Se coloca la arena en una charola para ponerla a secar en una parrilla hasta eliminar el agua que tiene en exceso.
 - Para saber cuándo está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda y 3 a la tercera y finalmente 2 a la cuarta capa, si al final el material rebasa el borde del molde, se enrasa con el mismo pisón deslizándolo y cuidando de no ejercer presión sobre el material.
 - Se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso, por lo que se requiere seguir secando la muestra.
3. Cuando la arena este superficialmente seca, se toman 300 gramos, registrando esta esta masa como masa saturada y superficialmente seca(Mh).
4. La muestra se coloca en una charola para secarla hasta masa constante, es decir, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuándo el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña se retira el material.
6. Se deja enfriar un poco la muestra y se determina la masa, registrando este dato como masa seca del material(Ms).

Cálculos.

$$\%Absorción = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

- %Absorción: Porcentaje de absorción.
- Mh: masa de la muestra superficialmente seca, en gramos.
- Ms: masa de la muestra seca, en gramos.



Densidad.

Con esta prueba se logra determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen. Este procedimiento es con base en la norma (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014).

Procedimiento.

1. Del agregado fino, se cuartea para obtener una muestra de aproximadamente 1 kilogramo, se pone a saturar durante 24 horas.
2. Se seca superficialmente la muestra por medio del molde troncocónico de la siguiente manera:
 - Se coloca la arena en una charola para ponerla a secar en una parrilla hasta eliminar el agua que tiene en exceso.
 - Para saber cuándo está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en cuatro capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 10 a la primera, 10 a la segunda y 3 a la tercera y finalmente 2 a la cuarta capa, si al final el material rebasa el borde del molde, se enrasa con el mismo pisón deslizándolo y cuidando de no ejercer presión sobre el material.
 - Se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso, por lo que se requiere seguir secando la muestra.
3. Se introduce agua en el matraz Chapman hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.
4. Se pesan 500 ± 10 gramos de la muestra superficialmente seca registrando este valor como "S".
5. Con la ayuda de un embudo, se introduce la muestra en el matraz y se le adiciona agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad.
6. Después de introducir el material, se agita el matraz a fin de expulsar el aire atrapado.
7. Generalmente se requieren de 15 a 20 minutos para eliminar las burbujas de aire y se puede sumergir la punta de una toalla de papel en el matraz para eliminar las burbujas de aire acumuladas en la superficie.
8. Después de eliminar las burbujas, se llena el matraz hasta que alcance su máxima capacidad y se determina la masa total del matraz más la muestra y el agua del interior registrando este valor como "C".
9. Se remueve el agregado fino del frasco y se seca a temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, se deja enfriar en un cuarto a temperatura ambiente por $1 \pm 1/2$ hora y se determina su masa registrando este valor como "A".



10. Por último, se determina la masa del matraz lleno de agua hasta su máxima capacidad y se registra este valor como B.

Cálculos.

$$D = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

- D: densidad relativa o gravedad específica, adimensional
- A: masa del material seco, en gramos.
- B: masa del matraz lleno de agua, en gramos.
- S: masa del material superficialmente seco, en gramos.
- C: masa total del matraz más la muestra y el agua, en gramos.

Masa volumétrica seca y suelta. (M.V.S.S.).

El objetivo de la prueba es obtener la masa de la arena por unidad de volumen como se encuentra en estado natural seco y suelto. Los procedimientos descritos nos ayudan a obtener la relación que existe entre la masa y el volumen de un agregado. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Procedimiento.

1. Se seca la muestra hasta una masa constante, extendiendo el material al sol para lograr el secado.
2. Teniendo seco el material, se cuartea para obtener una muestra representativa del mismo. Se determina la masa y el volumen del recipiente que se va a utilizar.
3. Con la ayuda de un cucharón, se llena el recipiente, dejando caer la arena a la altura de 5 cm. del borde superior del molde hasta que quede parcialmente lleno y forme un cono el material.
4. Se enrasa con la varilla punta de bala o con la mano.
5. Se pesa para determinar la masa de la muestra.

Cálculos.

$$M.V.S.V. = \frac{M - T}{V}$$

Donde:

- M.V.S.V.: masa volumétrica seca y varillada en Kg/m³.
- M: masa de la grava con el recipiente en kilogramos.
- T: masa del recipiente en kilogramos.
- V: volumen del recipiente en m³.



Masa volumétrica seca y varillada (M.V.S.V.).

El objetivo de la prueba es obtener la masa de la arena por unidad de volumen. Los procedimientos descritos nos ayudan a obtener la relación que existe entre la masa y el volumen de un agregado. Todo el procedimiento se realizó conforme a la norma mexicana (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Procedimiento.

1. Una vez que el material está seco se cuartea el agregado para obtener una muestra representativa. Se obtiene la masa y el volumen exacto del recipiente que se va a utilizar.
2. Con la ayuda de un cucharón, se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.
3. Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes, distribuidos en la superficie total.
4. Se enrasa el recipiente y se determina la masa de la muestra.

Cálculos.

La masa se determina con la siguiente fórmula:

$$M.V.S.V. = \frac{M - T}{V}$$

Donde:

- M.V.S.V.: masa volumétrica seca y varillada en Kg/m³.
- M: masa de la grava compactada con el recipiente en kilogramos.
- T: masa del recipiente en kilogramos.
- V: volumen del recipiente en m³.



Diseño y proporcionamiento de la mezcla de concreto por el método del ACI (American Concrete Institute).

Recopilación de propiedades de los materiales.

Para poder realizar el diseño de la mezcla se deberá de recabar la información de las propiedades que presentan los materiales que serán utilizados en el proceso de la elaboración de la mezcla. Se determinará la resistencia necesaria para el diseño; la cual está en función del $F'c$, entre otros datos como:

- Revenimiento
- Si incluye o no aire
- Densidad de los materiales
- Absorción de los materiales
- Tamaño máximo del agregado
- Módulo de finura

Revenimiento y tamaño máximo.

Para la elección del revenimiento, el objetivo de la mezcla a diseñar es lograr la mayor trabajabilidad posible, existen tablas para revenimientos recomendados en diferentes tipos de construcción, pero puede ser seleccionado con base a ensayos de consistencia normal.

Para la elección del tamaño máximo del agregado, nos podemos basar en los siguientes lineamientos.

Lineamientos generales para la elección del tamaño máximo del agregado.

- El tamaño máximo no deberá exceder $1/5$ de la dimensión entre los costados de la cimbra.
- No deberá exceder $1/3$ del espesor de las losas.
- No deberá de pasar $3/4$ del espacio libre mínimo entre varillas.

Tabla 7 Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción [ACI 211].

Revenimiento recomendado para diversos tipos de construcción.			
Tipos de construcción.	Revenimiento en centímetros.		Tolerancias.
	Máximo.	Mínimo.	
Vigas y muros reforzados.	10	-	3.5
Columnas para edificios.	10	2.5	3.5
Pavimentos y losas.	8	2.5	2.5
Concreto masivo.	5	2.5	2.5



Ilustración 12 Toma de revenimiento.

Agua de mezclado y contenido de aire.

Una vez que ya se cuenta con el revenimiento para el diseño de la mezcla, se procede a la elección del agua de mezclado, siendo esta la correspondiente para 1m^3 . El concreto a diseñar debe de cumplir con especificaciones de durabilidad, por lo tanto, será considerada como una mezcla sin aire incluido, teniendo así, menor cantidad de poros no deseados, siendo más homogénea y menos susceptible a permitir los daños por agentes externos. Nos apoyamos en la siguiente tabla para su selección.

Tabla 8 Requerimientos de agua de mezclado y contenido de aire [ACI 211]

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.									
Agua Kg/m^3 de concreto.									
Tamaños máximos nominales de agregado.	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"	In
	10	12.5	20	25	40	50	70	150	cm
Revenimiento en cm.	Concreto sin aire incluido.								
2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113	Kg/m^3
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124	Kg/m^3
15 a 18	243	228	216	202	190	178	160	---	Kg/m^3
% de aire incluido	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2	---
Revenimiento en cm.	Concreto con aire incluido.								
2.5 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107	Kg/m^3
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119	Kg/m^3
15 a 18	216	205	197	184	174	166	154	---	Kg/m^3
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición.									
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1	
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3	
Exposición severa.	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4	



Relación agua-cemento.

Esta es una de las características más importantes y que pueden presentar un reto en el diseño, al bajar lo más posible esta relación, nos brindara un concreto más durable, sin embargo, debemos cuidar que dicha relación nos proporcione la trabajabilidad necesaria. La resistencia media (F'_{cr}) será nuestra resistencia requerida en el diseño. Se obtiene de sumar la resistencia de proyecto ($f'c$) y la desviación estándar. Este último obteniéndolo de la siguiente tabla.

Tabla 9 Desviación estándar del concreto [ACI 211].

Desviación estándar de la resistencia del concreto en kg/cm ² .		
Procedimiento de fabricación.	$F'c \leq 200$ Kg/cm ² .	$200 \leq F'c \leq 300$ kg/cm ² .
Mezclado mecánico, proporcionamiento, corrección por humedad y absorción de los agregados de una misma fuente y de calidad controlada.	30	35
Mezclado mecánico, proporcionamiento por peso.	35	45
Mezclado mecánico, proporcionamiento por volumen; volúmenes cuidadosamente controlados.	50	60

Las fórmulas para determinar el F'_{cr} son las siguientes:

$$F'_{cr} = f'c + 1.28 * c$$

$$F'_{cr} = f'c + 2.52 * c - 35$$

Calculo del contenido de cemento.

Para el cálculo del contenido de cemento solo se emplea la siguiente ecuación y es dependiente de la cantidad de agua:

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{\text{Cantidad de agua en Kg}}{\text{Relación agua - cemento}}$$



Estimación del contenido del agregado grueso y agregado fino.

Para la determinación del contenido del agregado grueso utilizaremos la siguiente tabla, conforme al tamaño máximo del agregado y el módulo de finura.

Tabla 10 Estimación del agregado grueso [ACI 211]

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.				
Tamaño máximo del agregado.	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena indicados.			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

- Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado seco, como se describe en la norma (ASTM C29, 2007). Estos volúmenes se han seleccionado a partir de las relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción.
- Para concretos más trabajables véase la (ASTM C136, 2014) Método 136 para el cálculo del módulo de finura.

Para poder determinar el contenido de agregado fino, se utiliza el método del volumen absoluto, el cual inicia con el peso de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma. Este método implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes conocidos (agua, aire, cemento, grava). Estos volúmenes se restan del volumen unitario del concreto, obteniendo así el volumen requerido del agregado fino.

Ajustes o correcciones por humedad del agregado.

Con la cantidad de material calculada, la necesaria para 1 m³ de mezcla, se realizan las correcciones por humedad del agregado. Esta corrección es el restar el porcentaje de la humedad actual menos el porcentaje de absorción del material (% Humedad actual - % Absorción).



Resistencia a la polarización lineal.

Solución salina.

Al preparar esta solución salina, el objetivo es recrear las condiciones del ambiente agresivo causado los cloruros en zonas costeras, de esta manera, poder estudiar los efectos de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Evaluando los tipos agregados que fueron utilizados en cada probeta.

Las probetas se mantuvieron sumergidas en agua limpia de contaminantes durante dos años, después se comprobó la pasividad de las varillas y se procedió a iniciar los ciclos de húmedo-secado mediante la inmersión en una solución de NaCl al 3.5% con agua (1 semana dentro de la solución y 3 de secado). El porcentaje de la solución se sugiere como equivalente a la concentración de sales en el agua de mar.



Ilustración 13 Pesado de NaCl, para ser adicionado al agua.



Equipo.

El equipo que fue utilizado fue un potencióstato marca Gamry modelo 600. Las pruebas se realizaron conforme a las normas (ASTM G3, 2004) (ASTM G5, 2014) (ASTM G59, 2014). Se realizaron pruebas en seco y en húmedo, dependiendo del tiempo en el ciclo húmedo-secado en el que se encontraran. El área de acero en contacto dependerá de la varilla en estudio, una siendo de 44.88 cm² y la segunda de 37.40 cm². El intervalo de la prueba se realizó de 0V a -0.02V, con una velocidad de barrido de .05 mV/s.

Como electrodo de referencia se utilizó una de las barras de grafito inmersa en el concreto, siempre siendo la misma barra la que fungiría como tal, para después realizar la conversión a cobre sulfato de cobre.



Ilustración 14 Equipo Gamry con el que se realizaron las pruebas.

Método de cálculos.

Los cálculos se basan en la gráfica de corriente vs voltaje que se forma al activar el sistema, de donde resulta el valor de la resistencia total a la polarización, la cual es posteriormente multiplicada por el área atacada, para obtener la resistencia a la polarización en $\Omega\text{-cm}^2$. A esta nueva R_{pl} obtenida por la multiplicación, se le deberá restar la resistencia que presenta el concreto, esto para tener la resistencia real de la varilla en estudio.



Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es una propiedad que está presente en todos los materiales, siendo diferente para cada uno, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Dependerá en gran proporción se la saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa (DURAR, 1998).

Esta prueba no destructiva se realizó una vez por ciclo. Después de ser probado cada espécimen a la Resistencia a la Polarización lineal (Rpl), se realizó la prueba de resistividad eléctrica, esto para que no sufriera polarización la barra de acero y tener datos erróneos en las pruebas de Rpl. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistometro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM G57, 2012), de marca Nilsson.

Cavalier y Vassie han realizado extensos trabajos sobre la relación de la resistividad del concreto con la corrosión de sus partes de acero:

Tabla 11 Criterios de evaluación [Red Durar].

Resistencia del concreto Ω -cm	Pronostico de corrosión del acero de refuerzo.
Mayor a 12000	No se encuentran indicios (normalmente)
Entre 5000-12000	Probable
Menor a 5000	Casi seguro



Ilustración 15 Equipo para medir la resistencia eléctrica marca Nilsson.



Velocidad de corrosión.

La finalidad de esta prueba es el poder determinar la velocidad con la cual la armadura pierde sección por corrosión. La conversión de los valores de corriente para obtener la velocidad de corrosión, se deben a la ley de Faraday. Una vez obtenido el valor de R_{pl} , se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) mediante la ecuación de Stern y Geary:

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p}$$
$$B = \frac{b_a b_c}{[2.303(b_a + b_c)]}$$

Donde:

- i_{corr} : densidad de corriente en $\mu A/cm^2$.
- B: factor de Stern-Geary, que depende las pendientes de tafel.
- R_p : resistencia a la polarización en $Ohm \cdot cm^2$.
- b_a y b_c : pendientes de tafel anódica y catódica respectivamente.

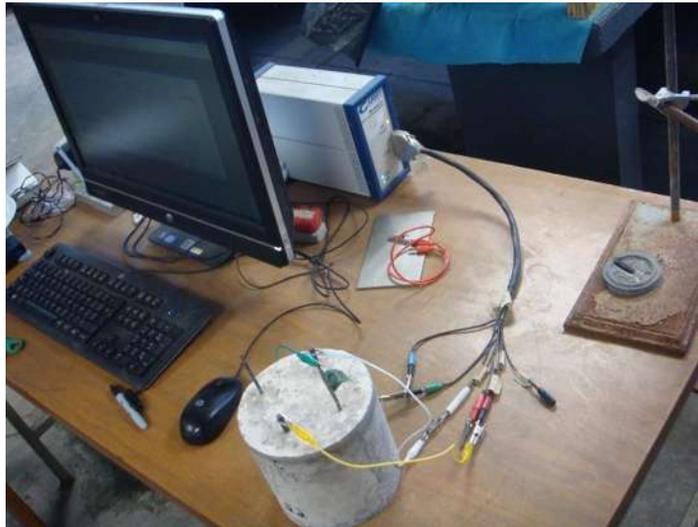


Ilustración 16 Cilindro en prueba de resistencia a la polarización lineal.



RESULTADOS.

Caracterización del cemento.

Tiempos de fraguado.

A continuación, se muestran los tiempos de fraguado que presentaron las diferentes pastas con un porcentaje de emulsión:

Tabla 12 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.

% de Emulsión.	Tiempo de fraguado inicial.	Tiempo de fraguado final.
Testigo.	322	529
0.50 %	450	571
1 %	396	597
2 %	412.99	672.99
3 %	417	678
4 %	400	750
5 %	382	760
6 %	534	840

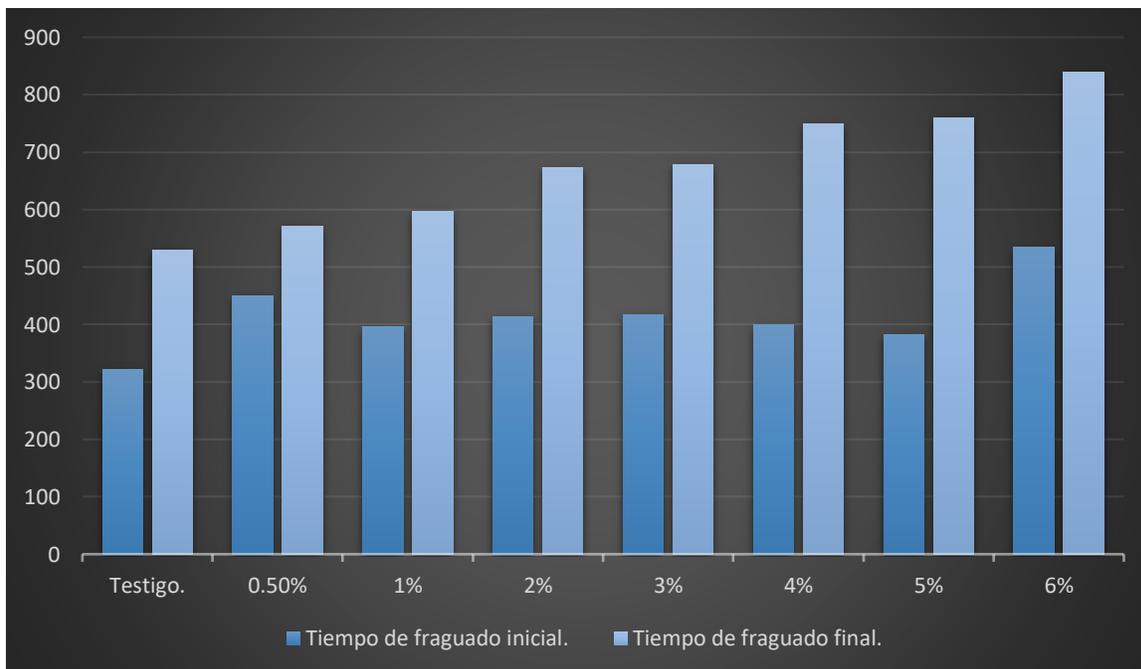


Ilustración 17 Tiempos de fraguado para diferentes porcentajes de emulsión.

El tiempo de fraguado se ve directamente incrementado con respecto al aumento de concentración de emulsión presente en la mezcla, por lo que es factible decir que la presencia de emulsión actúa como retardante del tiempo de fraguado.



Caracterización del agregado pétreo.

Agregado grueso (grava).

Granulometría.

Tabla 13 Granulometría en agregados gruesos.

Malla.	Agregado natural triturado.	Agregado concreto reciclado.
	% que pasa.	% que pasa.
1'	100	100
3/4'	89.61	99.68
1/2'	43.78	92.36
3/8'	18.48	68.16
No 4.	2.32	0
Paso No 4.	0	0
Tamaño Max.	3/4'	1/2'

En la tabla siguiente se muestran los tamaños máximos para cada tipo de agregado grueso que se utilizó, los cuales son de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", los límites del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa de acuerdo la norma Mexicana (NMX-C-111-ONNCCE-2004, 2004):

Tabla 14 Límites granulométricos para agregado máximo.

Tamaño nominal, mm (pulg)	19 (3/4)	12.5 (1/2)	9.5 (3/8)	No. 4 (4.75)	No. 16 (1.18)
19.0 a 4.75 mm (3/4 a No.4)	90 a 100	-----	20 a 55	0 a 10	0 a 5
12.5 a 4.75 mm (1/2 a No.4)	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5

Absorción.

- Agregado natural triturado.

Tabla 15 Absorción en agregado grueso natural triturado.

Muestra.	Masa saturada (gr).	Masa seca (gr).	% Absorción.
M ₁	300	295.80	1.42
M ₂	300	294.30	1.94
M ₃	300	297.30	0.91
		Promedio.	1.42

- Agregado concreto reciclado.

Tabla 16 Absorción en agregado grueso concreto reciclado.

Muestra.	Masa saturada (gr).	Masa seca (gr).	% Absorción.
M ₁	300	276.20	8.83
M ₂	300	279.50	7.33
M ₃	300	277.50	8.14
		Promedio.	8.11



Densidad.

- Agregado natural triturado.

Tabla 17 Densidad agregado grueso natural triturado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	% Densidad (gr/cm ³)
M ₁	300	111	2.70
M ₂	300	110	2.73
M ₃	300	107	2.80
		Promedio.	2.74

- Agregado concreto reciclado.

Tabla 18 Densidad en agregado grueso concreto reciclado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	% Densidad (gr/cm ³)
M ₁	300	125	2.40
M ₂	300	128	2.34
M ₃	300	125	2.40
		Promedio.	2.38

Masa volumétrica seca y suelta (M.V.S.S.).

- Agregado natural triturado.

Tabla 19 Masa volumétrica seca y suelta agregado grueso natural triturado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/cm ³).
M ₁	16270	10600	1.53
M ₂	16370	10600	1.54
M ₃	16270	10600	1.53
		Promedio.	1.54

- Agregado concreto reciclado.

Tabla 20 Masa volumétrica seca y suelta agregado grueso concreto reciclado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/cm ³).
M ₁	12370	10600	1.17
M ₂	12370	10600	1.17
M ₃	12370	10600	1.17
		Promedio.	1.17



Masa volumétrica seca y varillada (M.V.S.V.).

- Agregado natural triturado.

Tabla 21 Masa volumétrica seca y varillada agregado grueso natural triturado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³)	Masa volumétrica seca y varillada (gr/cm ³).
M ₁	17770	10600	1.68
M ₂	17270	10600	1.63
M ₃	17320	10600	1.63
		Promedio.	1.65

- Agregado concreto reciclado.

Tabla 22 Masa volumétrica seca y varillada agregado grueso concreto reciclado.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³)	Masa volumétrica seca y varillada (gr/cm ³).
M ₁	13770	10600	1.30
M ₂	13870	10600	1.31
M ₃	13870	10600	1.31
		Promedio.	1.31

Agregado fino (arena).

Granulometría.

Tabla 23 Granulometría en agregados finos.

N° Malla	Masa retenida (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4	0	0	0	100
8	194.5	20.62	20.62	79.38
16	385.5	40.87	61.49	38.51
30	203.6	21.58	83.07	16.93
50	77.6	8.23	91.3	8.7
100	42.6	4.52	95.81	4.19
200	22.5	2.39	98.2	1.8
Charola	17	1.8	100	0
Total	0	0	0	100
			Módulo de finura	3.52



Absorción.

Tabla 24 Absorción en agregados finos.

Muestra.	Masa saturada (gr).	Masa seca (gr).	% Absorción.
M ₁	300	295.10	1.66
M ₂	300	295.70	1.45
		Promedio.	1.56

Densidad.

Tabla 25 Densidad en agregados finos.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	% Densidad (gr/cm ³)
M ₁	300	118	2.54
M ₂	300	120	2.50
		Promedio.	2.52

Masa volumétrica seca y suelta (M.V.S.S.).

Tabla 26 Masa volumétrica seca y suelta en agregados finos.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³).	Masa volumétrica seca y suelta (gr/cm ³).
M ₁	3155	2783	1.13
M ₂	3205	2783	1.15
		Promedio.	1.14

Masa volumétrica seca y varillada (M.V.S.V.).

Tabla 27 Masa volumétrica seca y varillada en agregados finos.

Muestra.	Masa de la arena (gr).	Volumen del recipiente (cm ³)	Masa volumétrica seca y varillada (gr/cm ³).
M ₁	2817	1874	1.50
M ₂	2887	1874	1.54
		Promedio.	1.52



Diseño de mezcla.

Revenimiento y tamaño máximo.

El revenimiento seleccionado fue de 10 cm, el fin es poder darle la mejor trabajabilidad posible, esto observando los requerimientos de agua que presentaban los diferentes tipos de mezclas que se tenían.

Los especímenes para elaborar son cilindros de 15 cm x 30 cm, la menor de estas dimensiones es de 15 cm, por lo tanto, la quinta parte de esta dimensión representara el tamaño máximo del agregado utilizar el cual es de 3/4.

Agua de mezclado y contenido de aire.

Para la elección del agua de mezclado correspondiente a 1 m³ tenemos el apoyo de la tabla 7. El concreto a diseñar debe cumplir con especificaciones de durabilidad, se considerará como una mezcla sin aire incluido para no generar más poros no deseados en la mezcla, teniendo una mezcla homogénea y menos susceptible a permitir la introducción de agentes dañinos y degradantes.

Para un revenimiento de 10 cm y un T.M.N. de agregado de 3/4" corresponde 205 Kg/m³ de agua, se tendrá un 2% de aire incluido consecuencia del mismo proceso de elaboración.

Relación agua-cemento.

Se busca tener la menor relación agua/cemento, esto para tener un concreto mas durable y de mejores características para evitar el paso de agentes corrosivos hacia el acero. Se elaboraron las mezclas con una relación agua/cemento de 0.48.

Calculo del contenido de cemento.

Este cálculo está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{\text{Cantidad de agua en Kg}}{\text{Relación agua - cemento}}$$

$$\text{Cantidad de cemento en peso} = \frac{205 \text{ Kg/m}^3}{0.48} = 426$$



Potencial de corrosión.

Conforme a la norma (ASTM C876, 2009), si los potenciales sobre un área son más positivos que -0.20 V hay una probabilidad del 90% de que no esté ocurriendo la corrosión en el acero en el momento que se está llevando a cabo la experimentación, si están en el intervalo de -0.20 a -0.35 V es probable que esté ocurriendo el fenómeno de corrosión y para potenciales que son más negativos que -0.35 V hay más del 90% de probabilidad de que esté ocurriendo la corrosión del acero en el momento que se está realizando la prueba.

Las medidas de potencial informan sobre la posibilidad de corrosión de la armadura de una estructura de concreto. Una guía referencial de las condiciones y riesgo asociados a valores de potencial se indica en la siguiente tabla:

Tabla 28 Criterio de valoraciones potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO_4 (DURAR,1998)

Condición.	Potencial.	Observaciones.	Riesgo de daño.
Estado pasivo	($+0.200$ a -0.200)	Ausencia de Cr $\text{pH} > 2.5$ H_2O (HR \uparrow)	Despreciable
Corrosión localizada	(-0.200 a -0.600)	Cl^- , O_2 , H_2O (HR \uparrow)	Alto
Corrosión uniforme	(-0.150 a -0.600)	Carbonatado O_2 , H_2O , (HR \uparrow)	Moderado Alto
	($+0.200$ a -0.150)	Carbonatado O_2 , seco, (HR \downarrow)	Bajo
	(-0.400 a -0.600)	Cl^- , Elevado, H_2O o carbonatado H_2O , (HR \uparrow)	Alto
Corrosión uniforme	(< -0.600)	$\uparrow \text{Cl}^-$, $\uparrow \text{H}_2\text{O}$ (sin O_2)	Despreciable

A continuación, se muestran los gráficos de los valores de potencial de corrosión, (E_{corr}), obtenidos en el monitoreo de los cilindros de concreto con las varillas de acero embebidas.

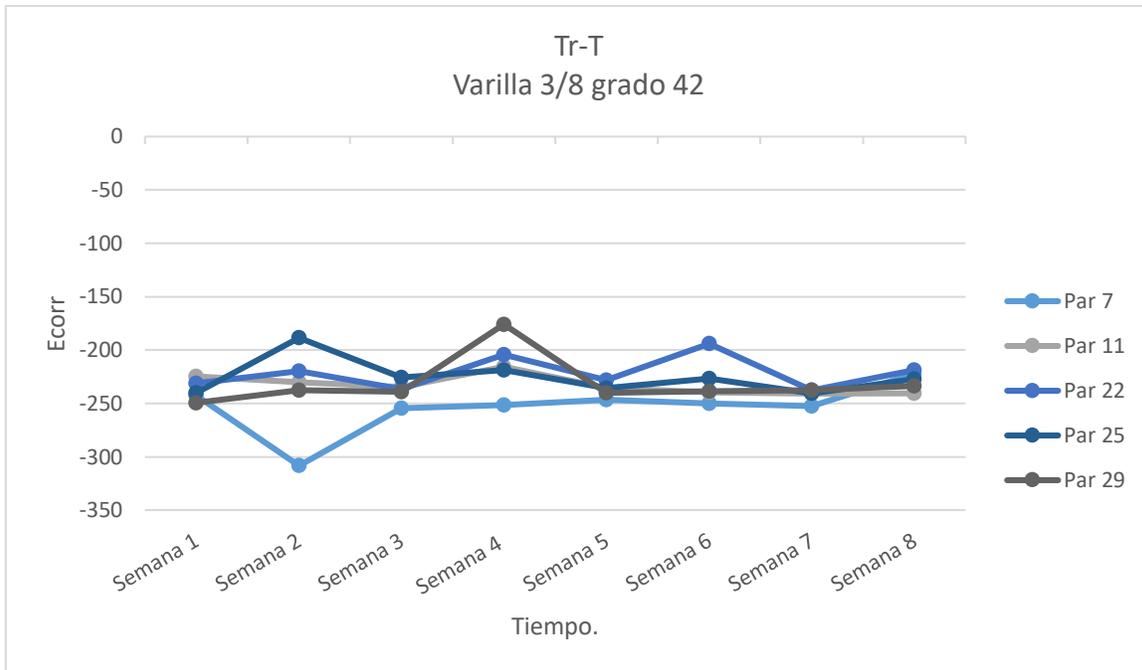


Ilustración 18 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

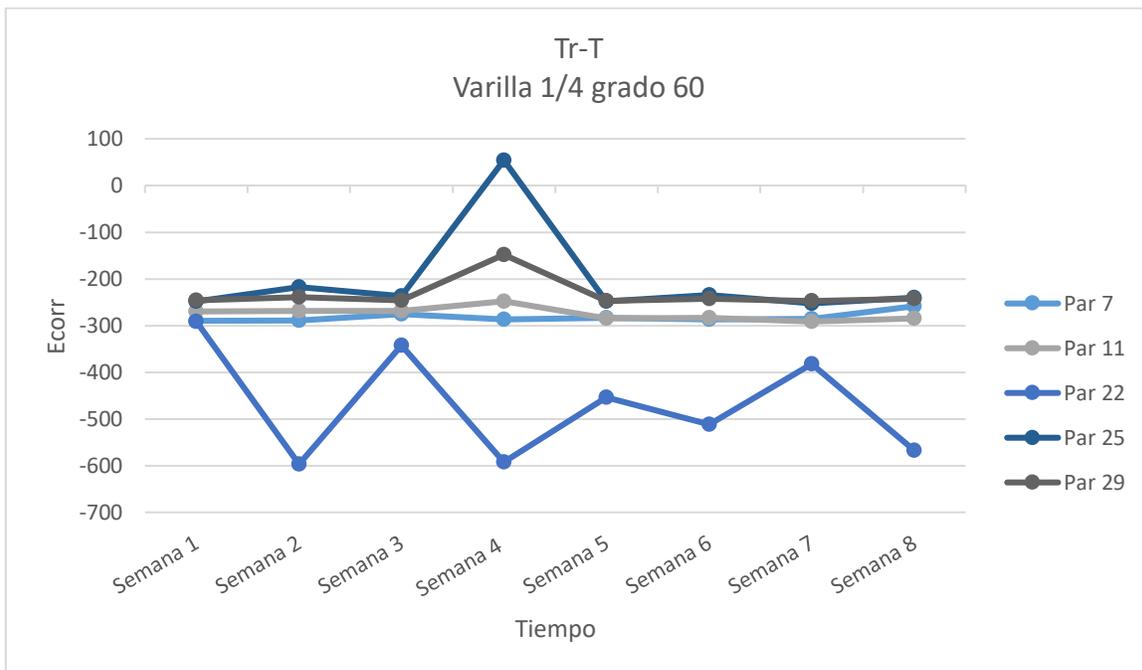


Ilustración 19 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

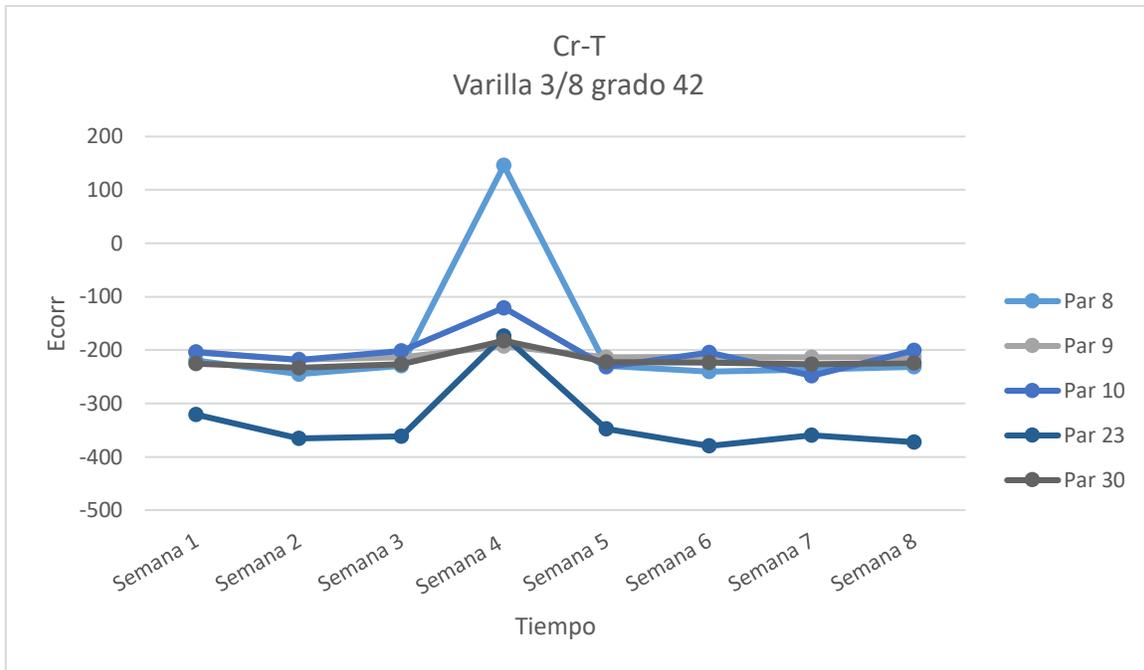


Ilustración 20 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

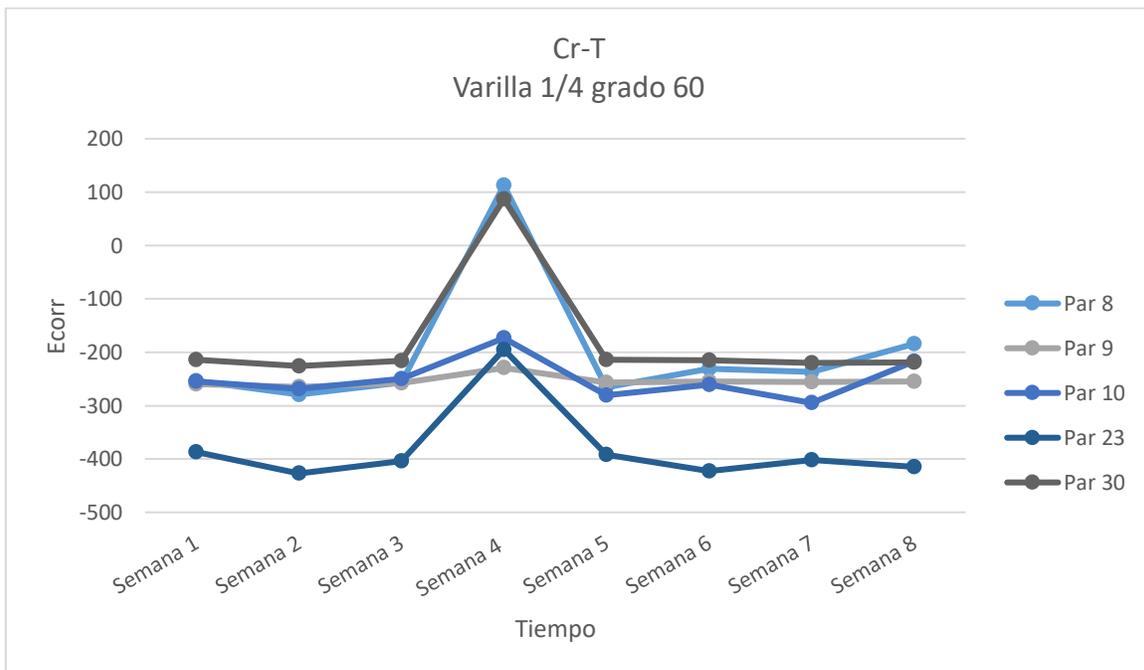


Ilustración 21 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.

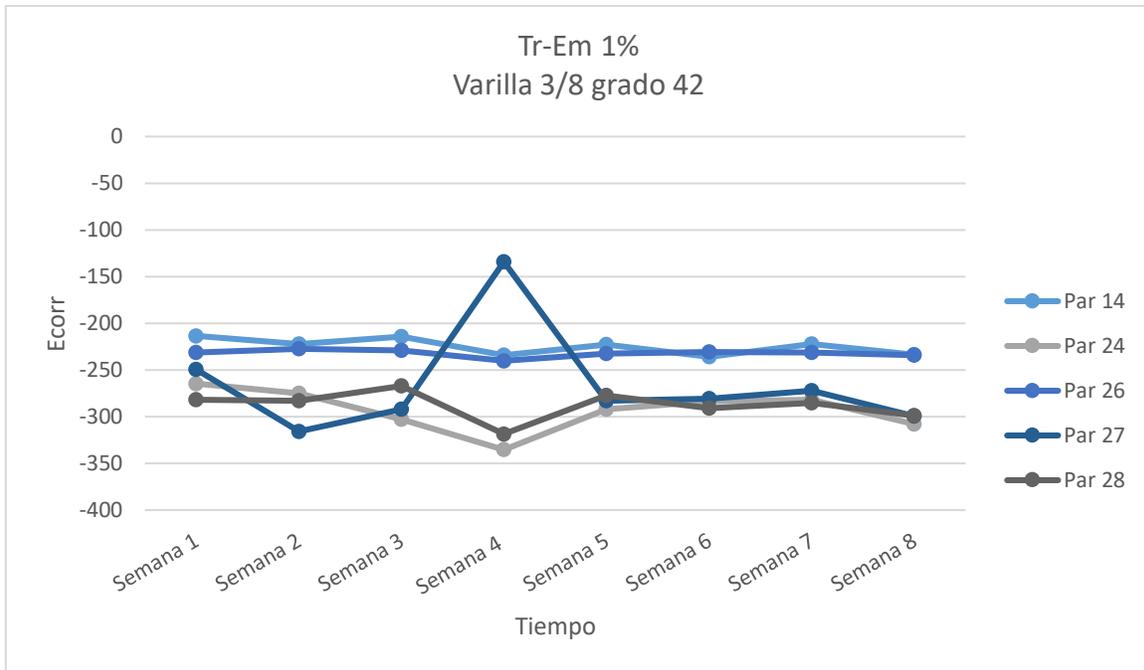


Ilustración 22 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

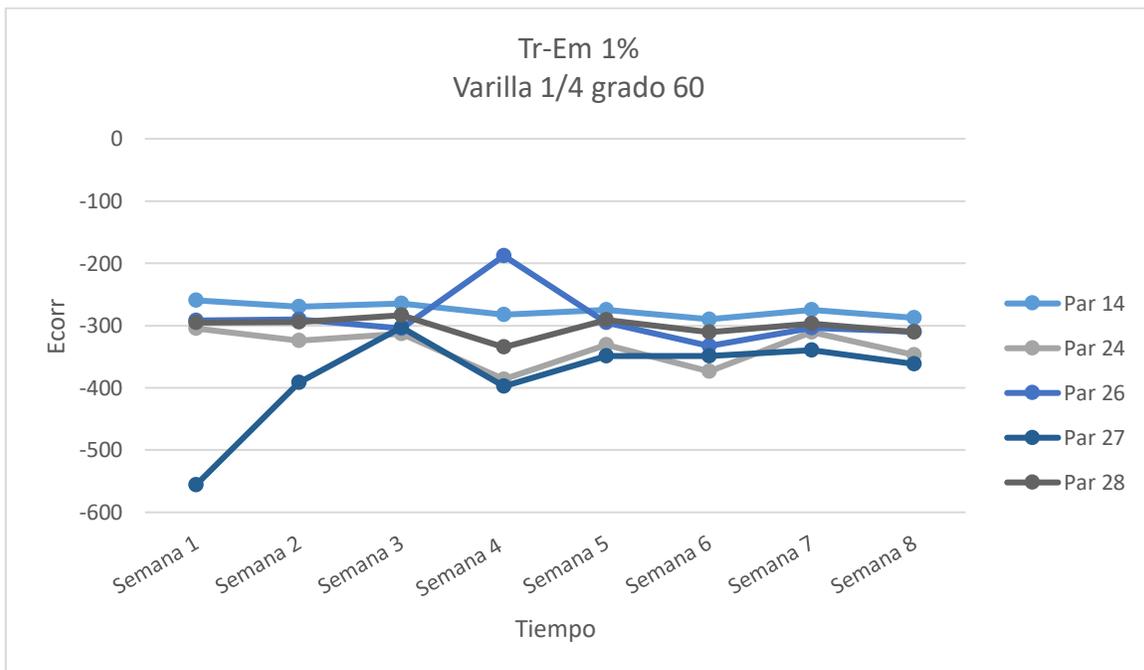


Ilustración 23 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

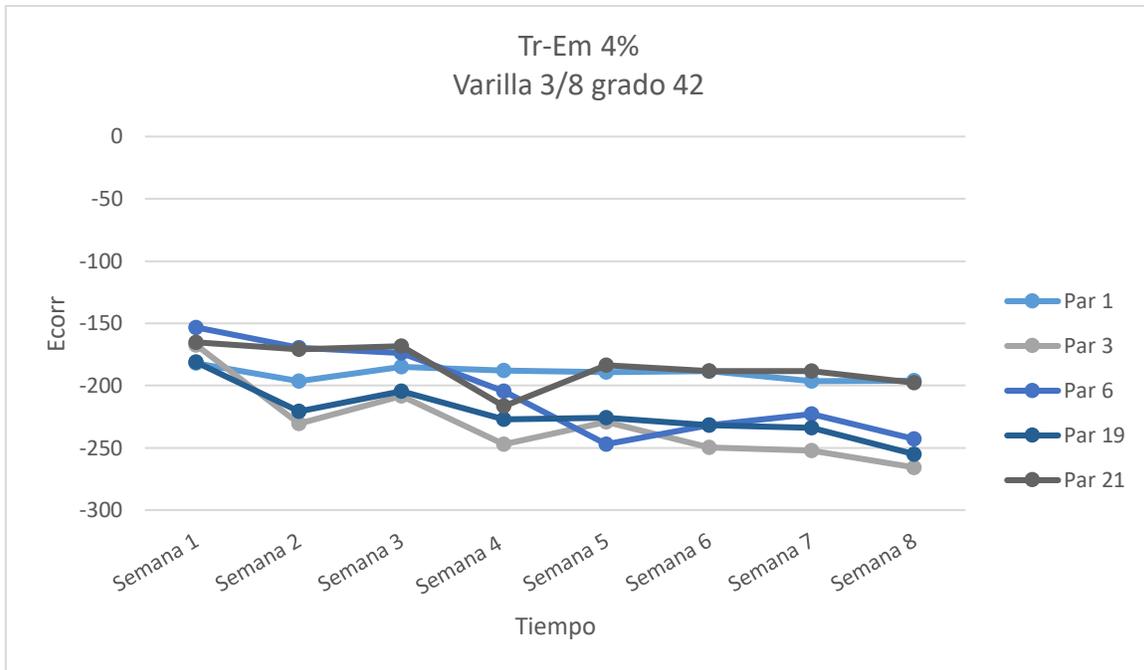


Ilustración 24 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

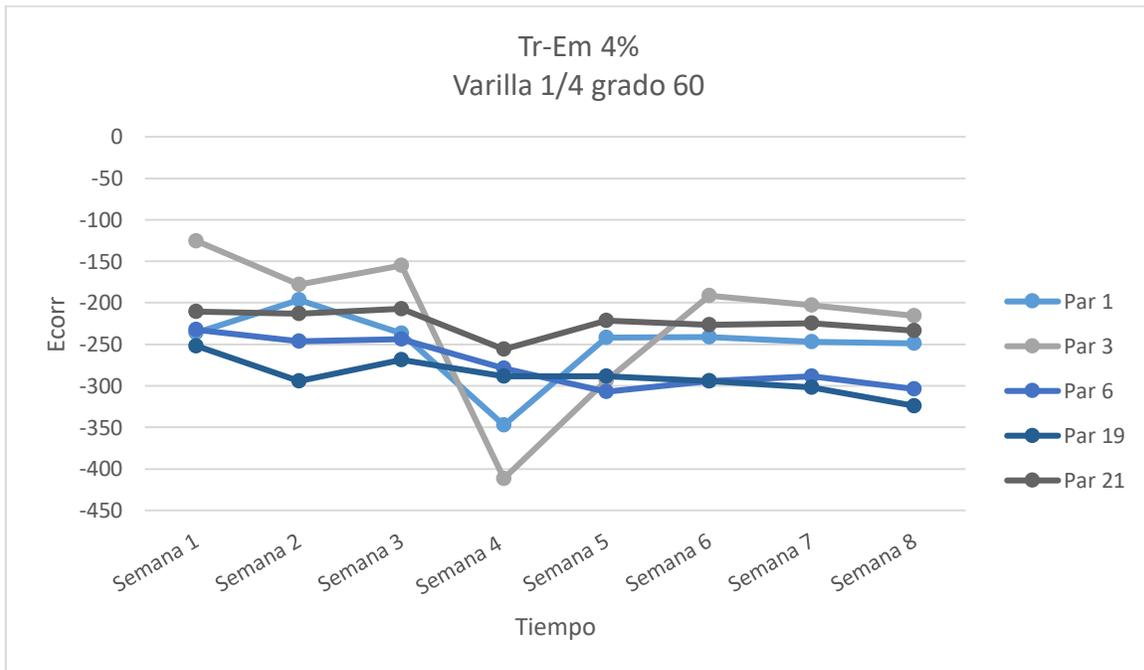


Ilustración 25 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

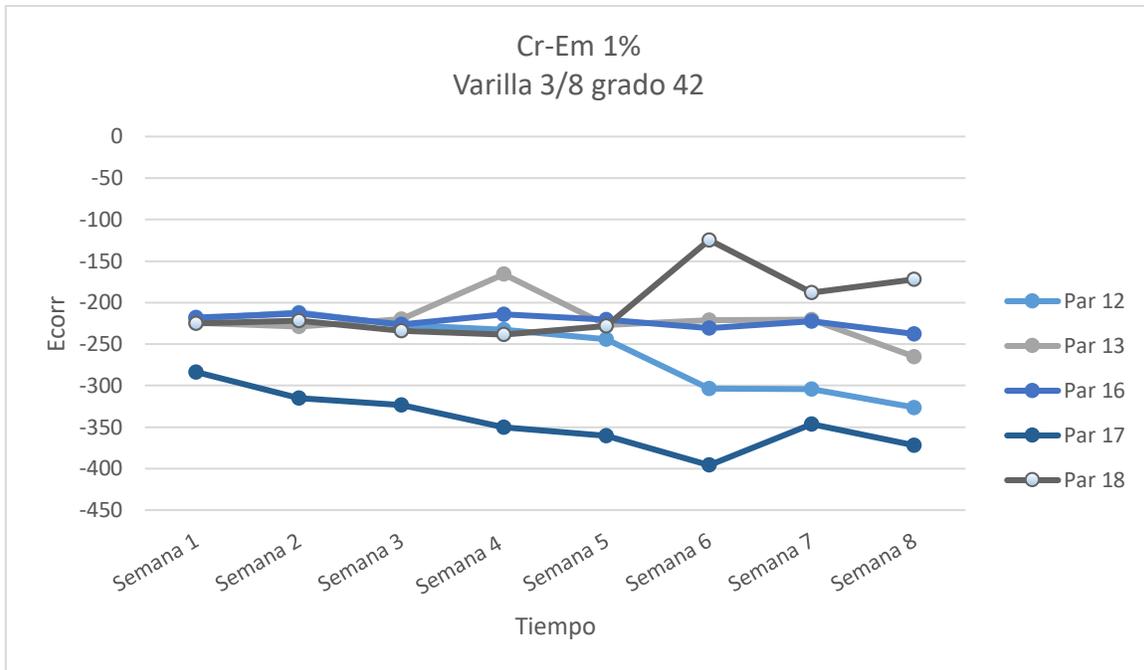


Ilustración 26 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

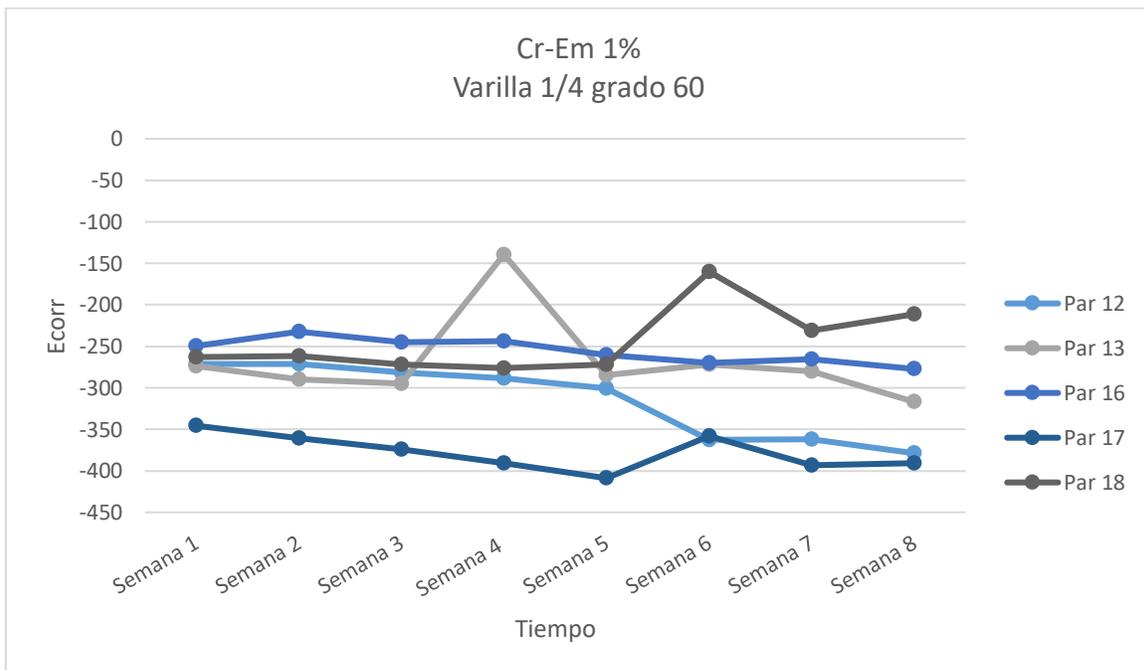


Ilustración 27 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.

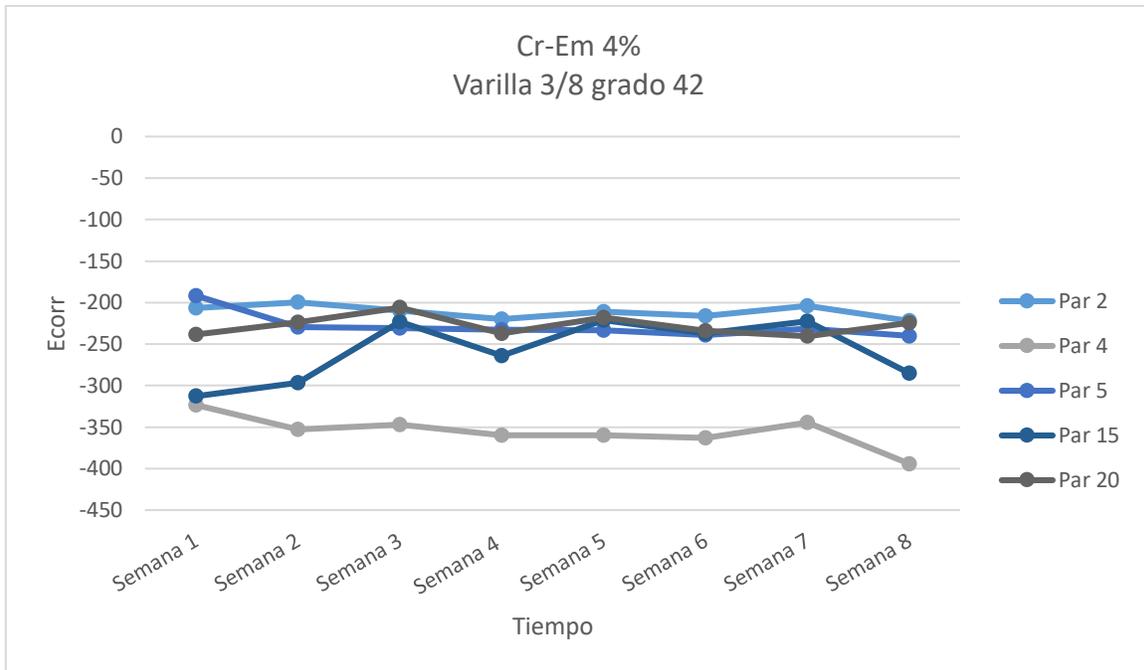


Ilustración 28 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

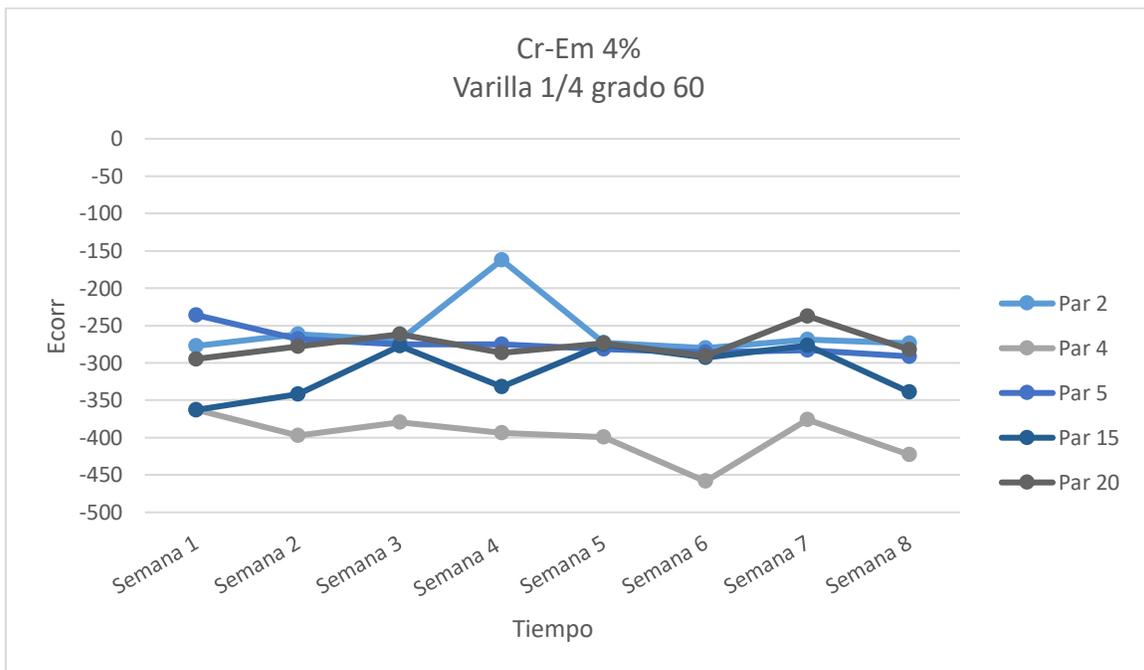


Ilustración 29 Potenciales de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.



En los gráficos anteriores (Ilustración 18-29) podemos observar los valores de potencial de corrosión (E_{corr}), obtenidos mediante el monitoreo de los cilindros con acero embebido, una varilla de 3/8 y una varilla de 1/4. Se puede observar que las varillas estuvieron en intervalos de entre -100 mV y -400 mV, salvo algunos casos en los que se dispararon los datos hasta -600 mV. Lo cual indica que el acero estuvo activo en el momento. No teniendo algún cambio significativo el porcentaje de emulsión agregado a la mezcla en los potenciales.

El hecho de que el potencial estuviera tan activo en las mezclas no indica la presencia de una velocidad de corrosión elevada (Andrade & González, 1978).

No obstante, cuando se observa un potencial de corrosión constante se puede inferir que bajas resistencias permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Si relacionamos este hecho con la pérdida de especies metálicas, nos indica que bajas resistencias a la polarización (R_p) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Velocidad de corrosión.

Se recurrió a utilizar un valor de B de 0.026 V, el cual indica un fenómeno de corrosión libre. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década, y para obtener los 0.026 V del valor de B, se considera solo el segundo valor (Rodríguez Gómez, 2000).

Los valores de i_{corr} o velocidad de corrosión en términos de vida útil es la siguiente:

Tabla 29 Clasificación de valores i_{corr} [Red Durar]

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

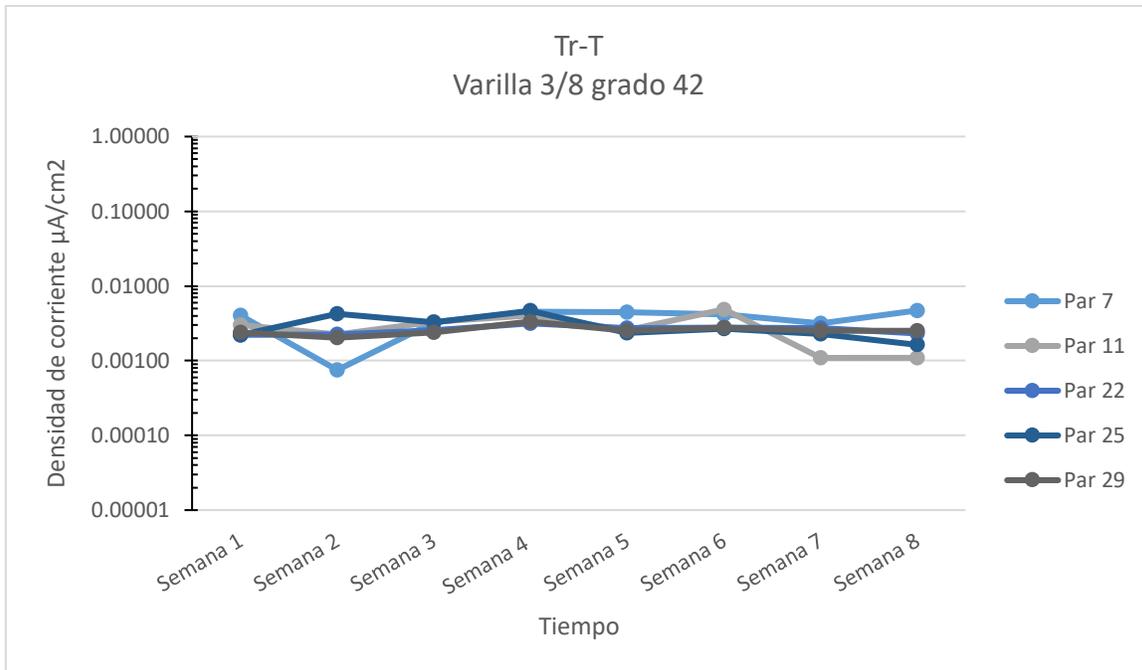


Ilustración 30 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

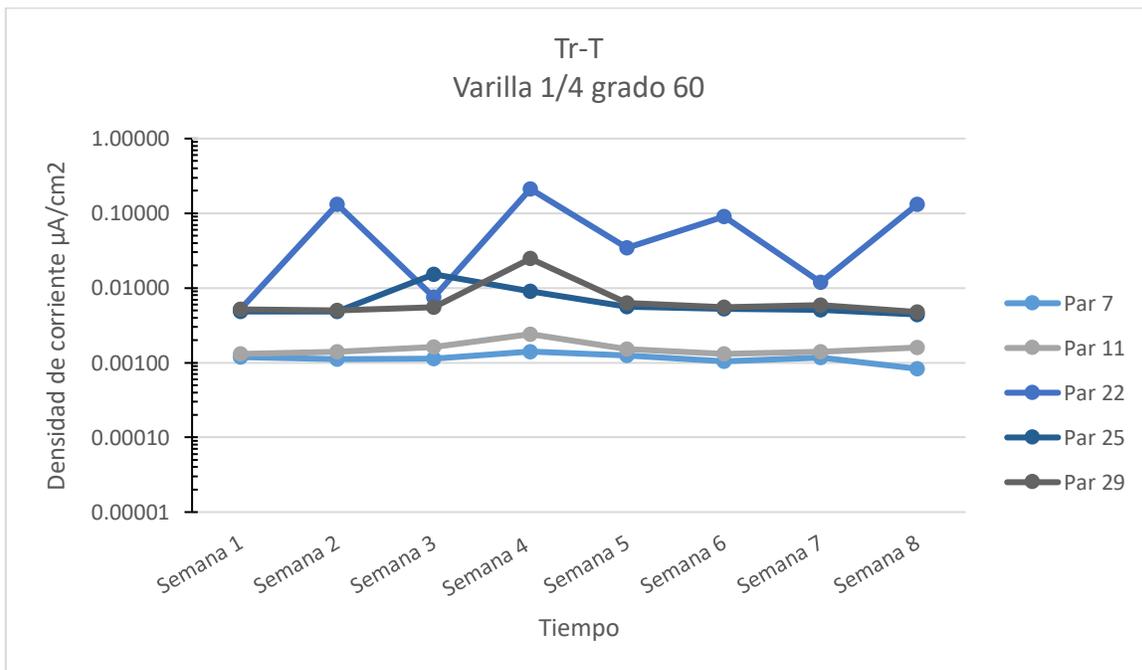


Ilustración 31 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

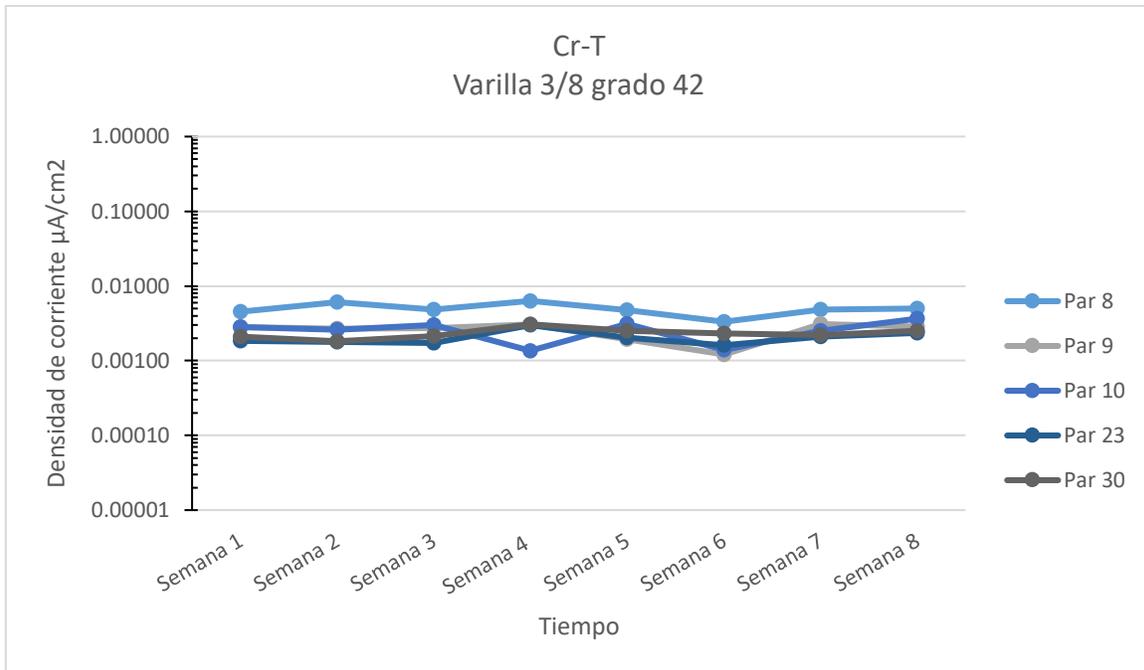


Ilustración 32 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

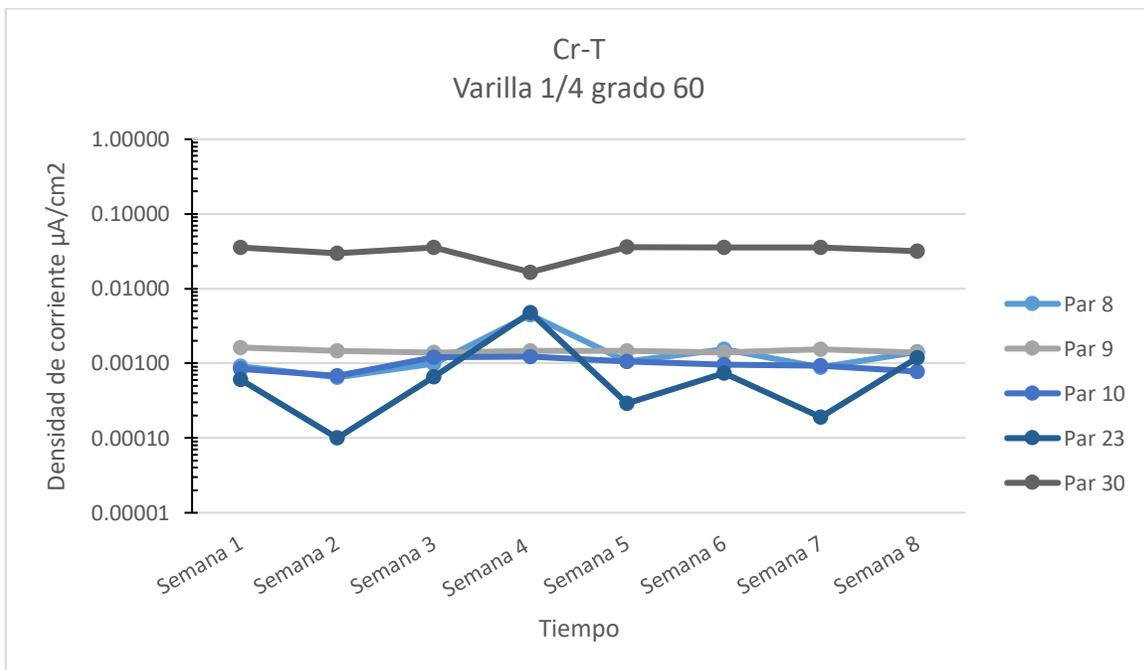


Ilustración 33 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas testigo con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.

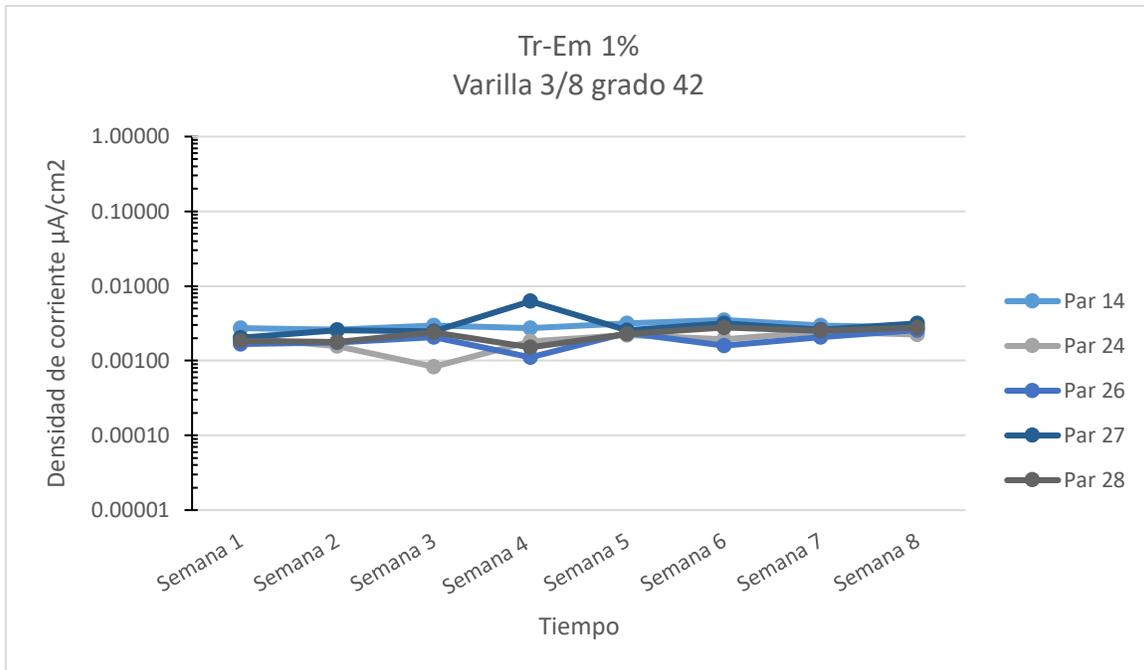


Ilustración 34 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

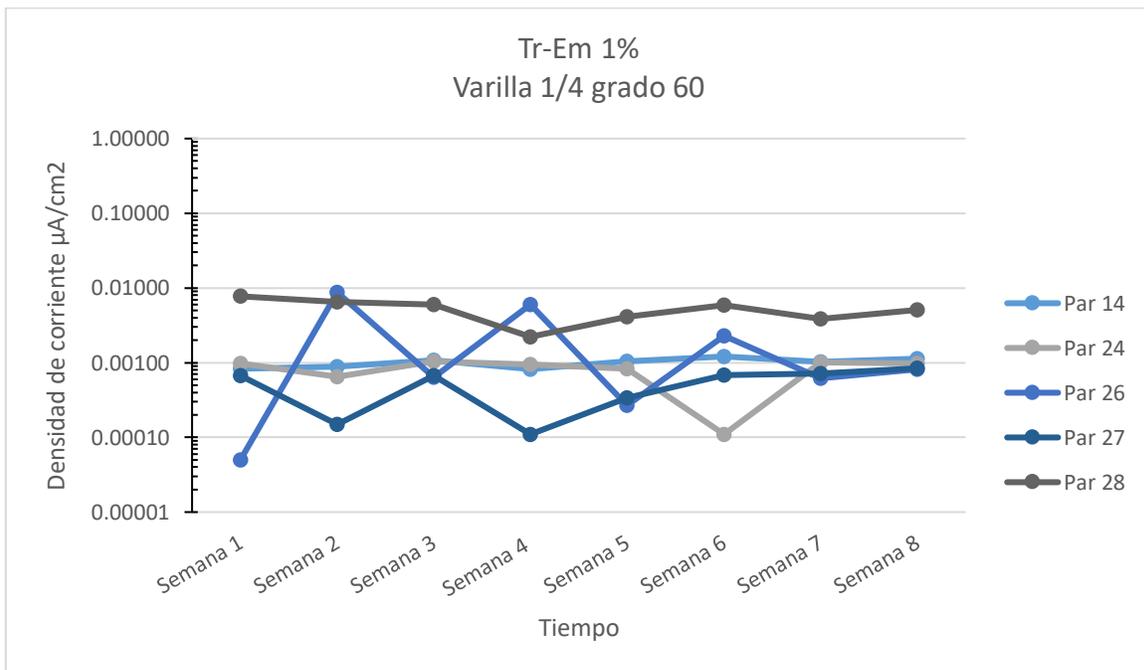


Ilustración 35 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

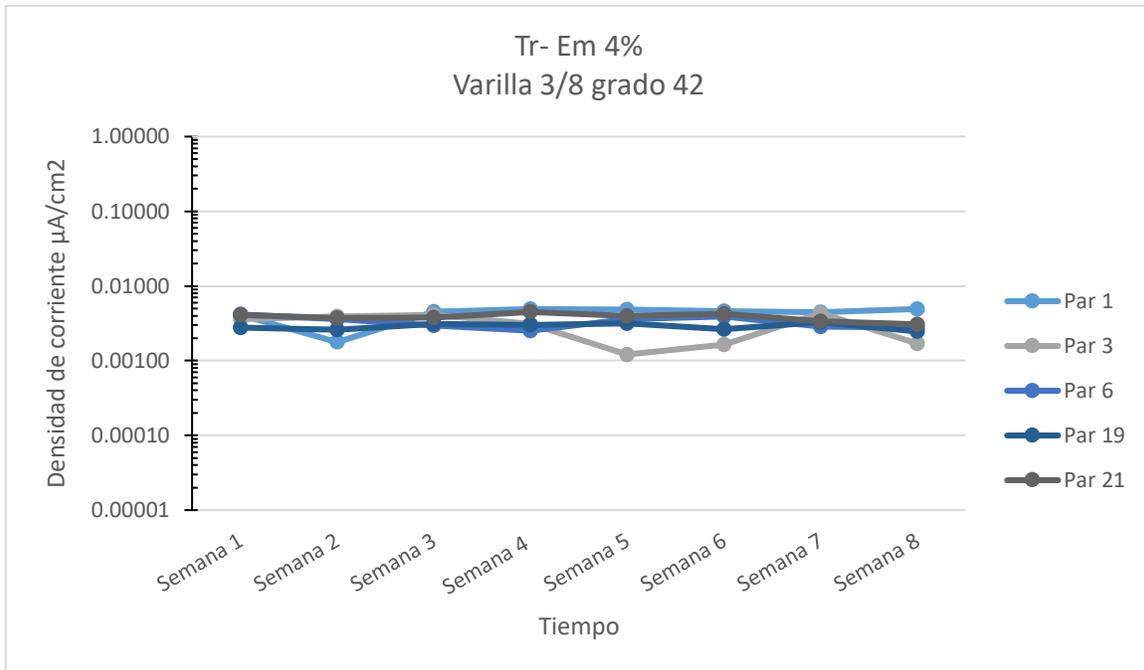


Ilustración 36 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 42.

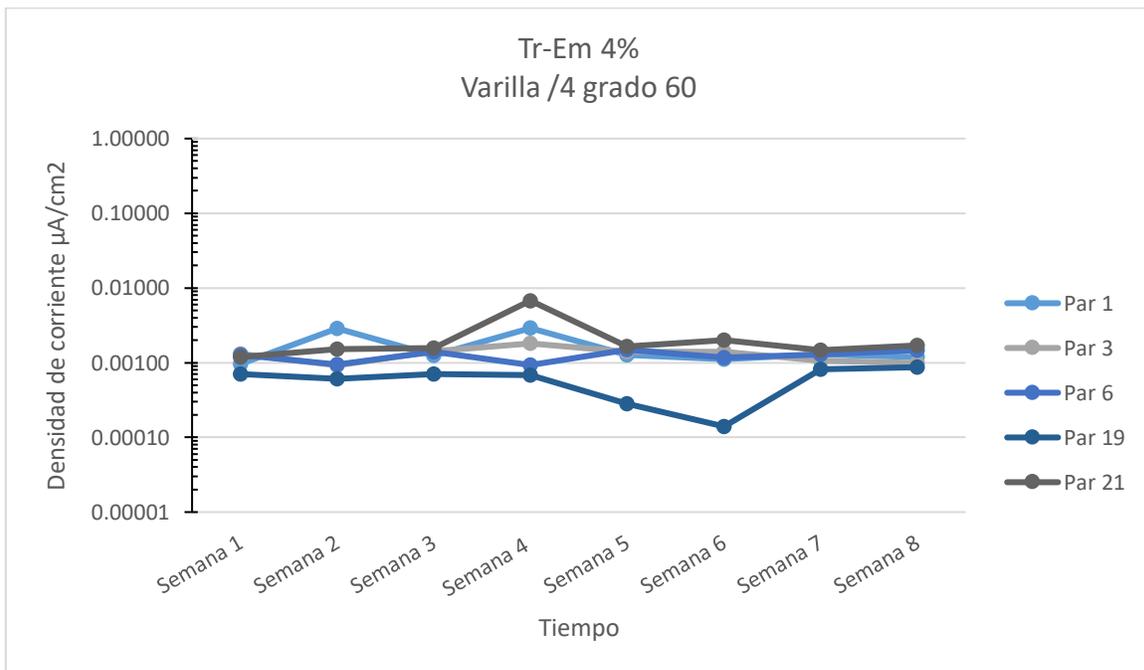


Ilustración 37 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado natural triturado, acero embebido grado 60.

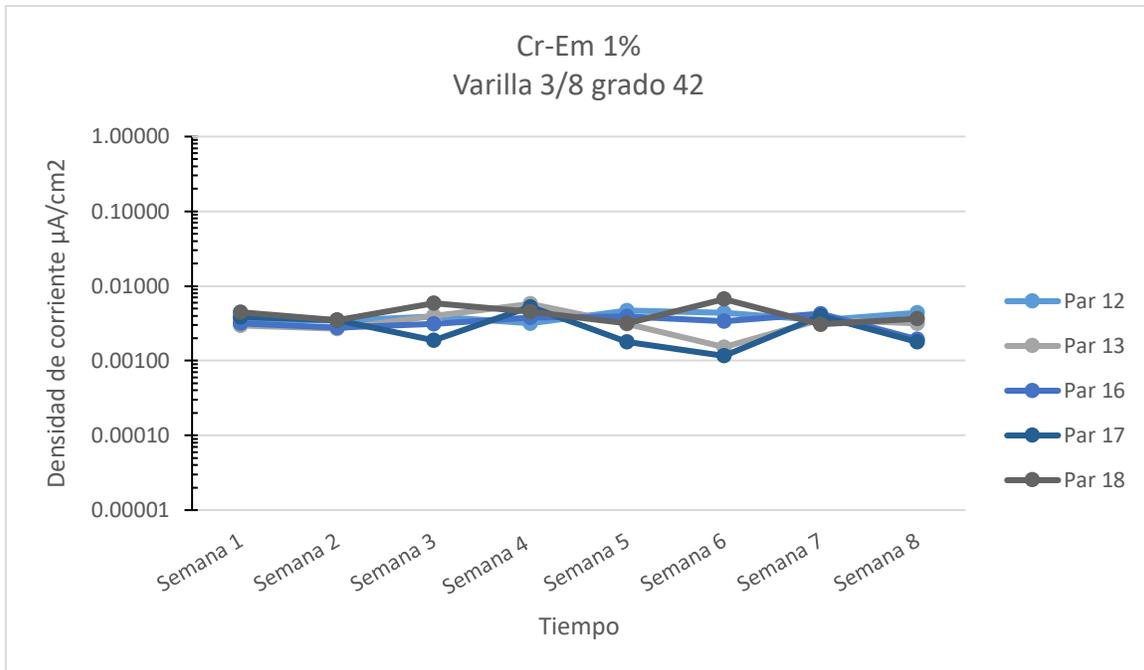


Ilustración 38 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

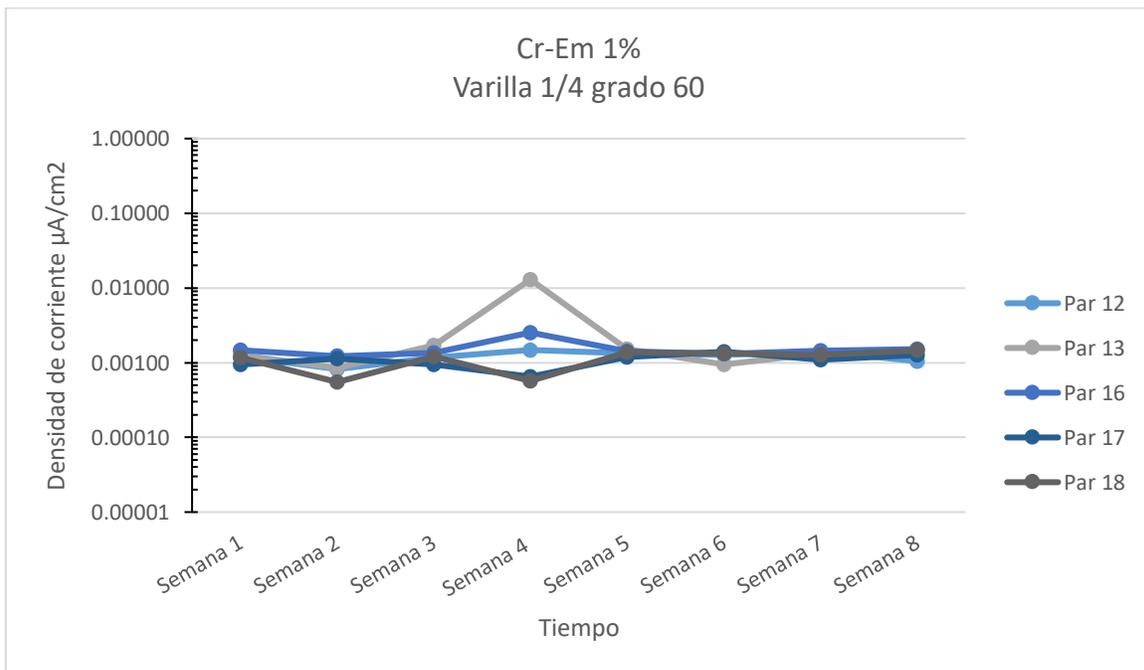


Ilustración 39 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 1% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.

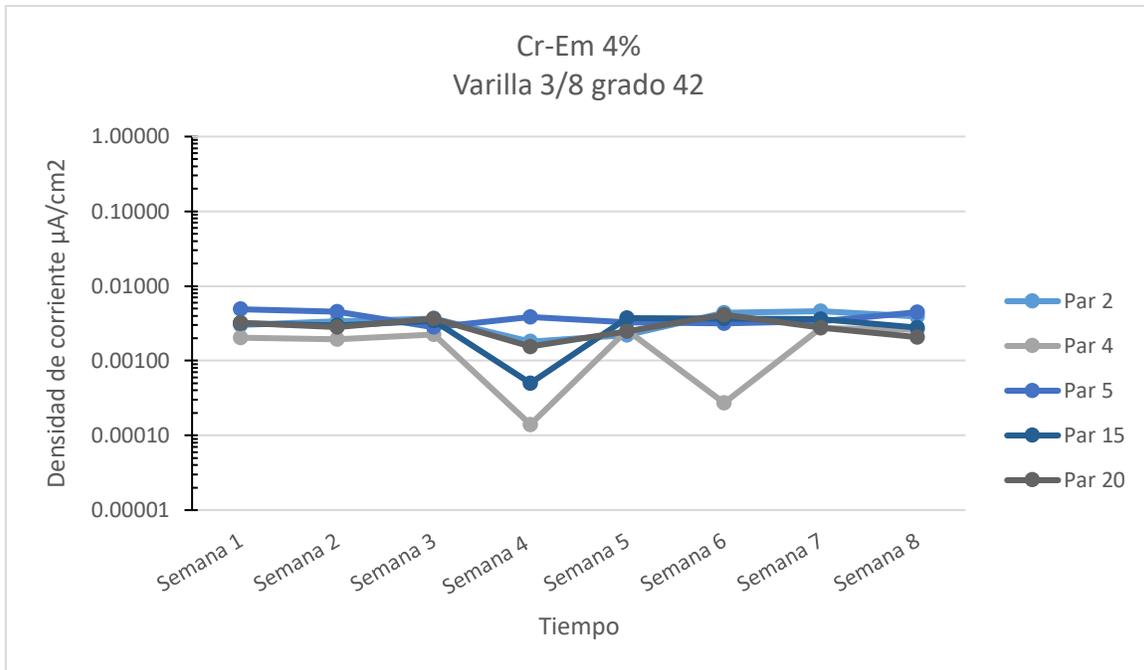


Ilustración 40 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 42.

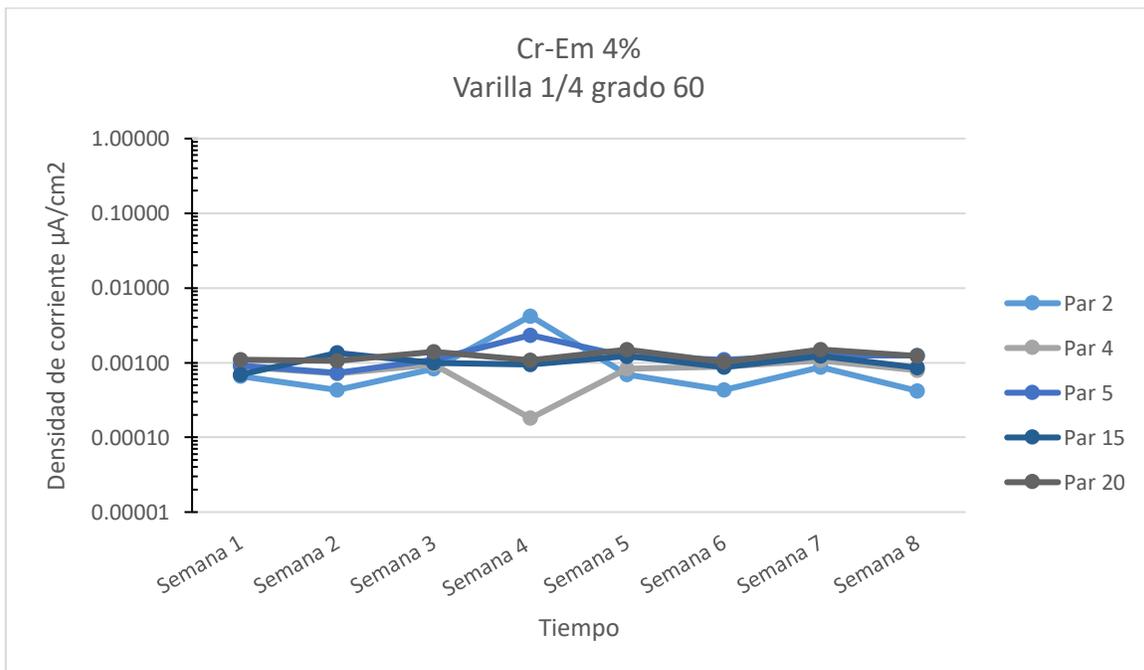


Ilustración 41 Velocidades de corrosión obtenidos de las mezclas con emulsión 4% con agregado concreto reciclado, acero embebido grado 60.



Los valores que se muestran en las gráficas anteriores (Ilustración 30-41), ubican los resultados dentro de un nivel de corrosión despreciable. Los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de $100\text{-}200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Armaduras que se corroen a $0.1 - 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ produciendo óxidos expansivos provocaran en 10 – 20 años la figuración del recubrimiento (DURAR, 1998).

Las velocidades de corrosión del acero inmerso, comienza con un valor despreciable, siendo constante este valor en todas las muestras. Los valores oscilan, esto se debe a las condiciones húmedo-seco de las muestras.



ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

El fenómeno de la corrosión obedece a varios factores, entre ellos destaca el material utilizado, como el agregado grueso. Es innegable el agotamiento que este material va sufriendo, ya sea triturado o volcánico, como una alternativa y solución a este problema se emplea el uso de concreto reciclado como agregado grueso. Por ello se deben de realizar más estudios sobre los posibles usos para el concreto reciclado.

En la comparativa de los resultados de este trabajo, para el fenómeno de corrosión, entre concreto con agregados gruesos triturados y agregados gruesos de concreto reciclado, como era de esperar, el agregado natural triturado presenta mejores resultados en pruebas como densidad y absorción. Estos dos valores, por si solos, nos pueden prever un escenario satisfactorio de los concretos con agregado triturado para su utilización en zonas costeras, contra los concretos elaborados con agregado de concreto reciclado. El agregado de concreto reciclado presenta menor densidad y mayor absorción, las cuales le confieren características no deseables ante el ataque por cloruros.

Los potenciales de corrosión que se obtuvieron mediante el monitoreo de los cilindros con acero embebido (G-42 y G-60), nos muestran resultados que indican que el acero estuvo activo en el momento que se realizaron las pruebas. Mas sin embargo el hecho de que los potenciales sea activo, no precisamente indica la presencia de corrosión en los especímenes.

Los resultados de velocidad de corrosión obtenidos son muy bajos, los cuales se ubican dentro de un nivel de corrosión despreciable, según la Red DURAR. Los valores obtenidos no superan el $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, salvo un espécimen que presentó valores superiores, esto se puede atribuir al proceso de elaboración de los especímenes, en los cuales, esta probeta pudo resultar contaminada desde su inicio. Las armaduras que se corroen a estas velocidades provocaran estragos en el concreto dentro de 10-20 años.

Los valores de potencial de corrosión constante se pueden traducir en bajas resistencias eléctricas, que permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Si relacionamos este hecho con la perdida de especies metálicas, nos indica que bajas resistencias a la polarización (R_{pl}) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa. Los valores tanto de velocidad de corrosión como de potenciales de corrosión, oscilan, esto se debe a las condiciones húmedo-seco de las muestras.



Algunos especímenes fueron adicionados con la emulsión base poliestireno en 1% y 4%. Los resultados de la prueba de tiempos de fraguado muestran que la emulsión actúa como un retardante, así mismo, esta emulsión proporciona fluidez extra a la mezcla de concreto. En su desempeño para mitigar el fenómeno de corrosión, no se observó algún cambio significativo de los testigos respecto a los especímenes adicionados con la emulsión, sin embargo, se pueden seguir realizando pruebas para tiempos más prolongados de exposición al ataque de cloruros.

Todos los especímenes contaron con un recubrimiento de 2 a 2.5 cm, bibliografía citada menciona recubrimientos de 5 a 7 cm como parte de la protección del acero ante al ataque de cloruros. Ninguna de las probetas presentó agrietamientos, lo cual indica pocas o nulas fuerzas de tensión en el interior de la probeta



BIBLIOGRAFÍA

- ACPC, A. C. (2013). Protección de estructuras en contacto con el medio marino. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 26-33.
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*, 7-38.
- Aïtcin, P.-C. (2008). *Binders for Durable and Sustainable Concrete (Modern Concrete Technology)*. London & New York: Taylor & Francis.
- Alaejos, P., & Fernández, M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix. *ACI Materials journal*, pág. 326.
- Andrade, C., & González, J. (1978). *Determinación electroquímica cuantitativa de la velocidad de corrosión de un acero de construcción. Evaluación de la susceptibilidad al ataque por picaduras. Parte II: ensayos en morteros*. C. S. Científicas.
- ASTM C136, A. s. (2014). *Método de ensaye estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados*. ASTM.
- ASTM C29, A. s. (2007). *Método de ensaye estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados*. ASTM.
- ASTM C876, A. s. (2009). *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. ASTM Standards.
- ASTM G3, A. s. (2004). *Práctica estándar para los convenios aplicables para las mediciones electroquímicas en las pruebas de corrosión*. ASTM.
- ASTM G5, A. s. (2014). *Método de prueba estándar de referencia para realizar medidas potenciodinámicas de polarización anódica*. ASTM.
- ASTM G57, A. s. (2012). *Método de prueba estándar para la medición de campo de la resistividad del suelo. Uso del método de cuatro electrodos de Wenner*. ASTM.
- ASTM G59, A. s. (2014). *Método de prueba estándar para la realización de mediciones potenciodinámicas resistencia a la polarización*. ASTM.
- Barreto Santos, M., de Brito, J., & Santos Silva, A. (2009). Reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. *Revista Ingeniería de Construcción*, 141-152.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Cavalcante-da Silva, C., Barreto-Monteiro, E., & A, D.-G. (2011). Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado. *Revista Académica de la FI-UADY*, 9-17.
- Cement Concrete & Aggregates Australia. (2008). *Use of recycled aggregates in construction*. Australia: Cement Concrete & Aggregates Australia.



- Cerón, M., Duarte, F., & Castillo, W. (1996). *Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida*. México: Boletín académico FIUADY.
- Chan Yam, J. L., Romel, S. C., & Moreno, É. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 39-46.
- Chan, P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *ACI Materials journal*, pág. 357.
- Climent Llorca, M. Á., Garcés Terradillos, P., & Zornoza Gómez, E. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado*. San Vicente: Editorial Club Universitario.
- Contreras Marin, E. (2016). *Evaluación de Agregados Reciclados, para su implementación en Pavimentos Rígidos*. Morelia.
- DURAR, R. (1998). *Manual de Inspección. Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado*. Río de Janeiro: CYTED Program.
- Fernandes, M. (2005). *Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra*. Porto: Tese de Doutoramento em Geologia.
- Ghambir, M. (2013). *Concrete Technology*. New Delhi: McGraw Hill.
- González Fernández, J. A., & Miranda Vidales, J. (2007). *Corrosión en las estructuras de hormigón armado: fundamentos, medida, diagnosis y prevención*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Harsem, T. E. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*. Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois, EE.UU: Portlan Cement Assosiation.
- Kosmatka, S., & Panarese, W. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. *IMCYC*, 32-34.
- Mather, B. (1975). Nueva Preocupación sobre la Reacción Álcali-Agregado. *Technical Paper by National Aggregates Association and National Ready Mixed Concrete Association*.
- Mejía, R., & Rodríguez, P. (1999). Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. *CYTED*.
- Neville, A. M., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. Inglaterra: Pearson.
- Newman, J., & Seng Choo, B. (2003). *Advanced Concrete Technology*. Elsevier.
- NMX-C-073-ONNCCE-2004, O. n. (2004). *Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados*. ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE-1997, O. n. (1997). *Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos*. . ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004, O. n. (2004). *Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-. Especificaciones y métodos de prueba*. . ONNCCE.



- NMX-C-164-ONNCCE-2014, O. n. (2014). *Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso*. . ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014, O. n. (2014). *Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino*. . ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE-2006, O. n. (2006). *Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporado por secado*. . ONNCCE.
- NMX-C-177-1997-ONNCCE, O. n. (1997). *Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración*. ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE-2014, O. n. (2014). *Industria de la construcción - cementantes hidráulicos - especificaciones y métodos de ensayo*. ONNCCE.
- Noricumbo, M., Vidaud Quintana, E. d., & Vidaud Quintana, I. N. (2014). Una alternativa sustentable frente al ataque de la corrosión en el concreto armado. . *Construcción y tecnología en concreto*., 32-35.
- Pancorbo, F. J. (2013). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. México: Alfaomega.
- Rodríguez Gómez, F. (2000). *Resistencia a la Polarización*. UNAM.
- Santos Silva, A. (2006). *Degradação do betão por reacções álcalis-silica - Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção*. Minho: Doutoramento em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Stanton, T. E. (2004). Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. En S. H. Kosmatka, B. Kerckhoff, W. C. Panarese, & J. Tanesi, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (pág. 121). New York: Portland Cement Association.
- Stanton, T., Porter, O., Meder, L., & Nicol, A. (1942). *California experience with the expansion of concrete trough reaction between cement and aggregate*. U.S.A: Proc. Am. Concrete Instituto.
- Torres Acosta, A., del Valle Moreno, A., Martínez Madrid, M., Pérez Quiroz, J. T., & Backhoff Polhs, M. (2010). PLAN NACIONAL DE EVALUACIÓN DE PUENTES FEDERALES, LIBRES DE PEAJE DAÑADOS POR CORROSIÓN (2000-2005). UNA CUANTIFICACIÓN DE RESULTADOS, PROYECTOS Y COLABORACIONES. *Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica 327*.
- Torres Espinal, D. P. (2016). Cómo hacer más durables las estructuras marinas. *Construcción y Tecnología en Concreto* , 24-29.
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera, E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS. *Dyna*, 52-59.
- Uribe, R. (1991). *El control de calidad en los agregados para concreto 3a parte*. México.



ESTADO DE LA INTEGRIDAD DE ACERO G42 Y G60 EMBEBIDO EN CONCRETO CON AGREGADOS: NATURAL TRITURADO Y CONCRETO RECICLADO; MATRICES ADICIONADAS CON EMULSIONES, CASO DE ATAQUE ACELERADO.



Valdez, T., Fajardo, S., Hermosillo, M., & Flores, V. (2008). Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado. *Ciencia UANL*.

Veronelli, D. J. (1978). *Durabilidad de los hormigones: Reacción árido-álcalis*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Vidaud Quintana, E. d. (2015.). Concreto autoconsolidable elaborado con agregados reciclados. *Construcción y tecnología en concreto.*, 12-15.

Vidaud Quintana, E. d., & Vidaud Quintana, I. N. (2015). Propiedades físico-mecánicas de los concretos reciclados. *Construcción y tecnología en concreto* , 22-27.

WBCSD, C. m. (2009). *Recycling Concrete*. Suiza: Consejo mundial empresarial para el desarrollo sostenible.