

Universidad Michoacana de
San Nicolas de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Civil

Síntesis y Caracterización de Recubrimientos Híbridos
Anticorrosivos para Estructuras de Concreto Reforzado
de Resistencia Media utilizando Nanocementos.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

Presenta:
Rafael Hurtado Solórzano

Asesor:
Dr. José Carlos Rubio Ávalos



Morelia Michoacán México, Marzo 2008

“Agradecimientos”

A mis padres:

Tarsicio Hurtado Chávez y Cirenía Solórzano Pérez Negrón

Porque gracias a su guía, cariño y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mí se depositó y con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecido.

A mi hermano:

Tarsicio A. Hurtado Solórzano

Por extenderme su mano cada que lo he necesitado y ayudarme a superar esos pequeños obstáculos que me encontré a lo largo de mis estudios... Sin tu ayuda y apoyo hubiese sido difícil.

A mi familia:

Gracias por su ejemplo de superación incansable, por su sacrificio en algún tiempo incomprendido, por su comprensión y confianza, por su amor y amistad incondicional, por que sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de mi carrera. Por lo que haya sido y será... Gracias

A mis amigos:

Que me han enseñado a valorar y respetar su amistad, a comprender la importancia de la sinceridad y humildad en este juego que es la vida. Gracias por los buenos momentos que he pasado con ustedes, gracias por la incalculable cantidad de risas y sinsabores que hemos compartido juntos, gracias por estar ahí cuando he necesitado de ese amigo sincero, gracias por enseñarme que son una parte fundamental de mi vida, gracias por ser lo que son... “¡mis amigos!”

A mis Profesores:

Gracias Dr. José Carlos Rubio Avalos por permitirme ser parte de este gran proyecto de investigación, gracias por el apoyo incondicional y tutela que me brindó durante el tiempo que duró este proyecto, el cual se ve materializado en la culminación de esta tesis.

Gracias Dra. Elia M. Alonso Guzmán, por la confianza que deposito en mí al abrirme las puertas del Laboratorio de Materiales, permitirme ser parte de esa gran familia que ahí labora y hacerme sentir como en casa.

“Agradecimientos”

Gracias M. A. Wilfrido Martínez Molina por la buena disposición que siempre tuvo hacia mí y hacia este proyecto, así como por su apoyo y colaboración brindado durante todo el proceso de investigación.

A mis compañeros de Laboratorio:

Un agradecimiento especial a los Técnicos Académicos Jesús Zauno, Rubén Hernández y Jaime Chora por el apoyo y asesoramiento que me ofrecieron durante la realización de las pruebas hechas dentro del laboratorio. También agradecer a los amigos que hice y conocí dentro del laboratorio, por los buenos momentos que pase disfrutando de su compañía, muchas gracias.

Rafael Hurtado Solórzano

Marzo 2008

UMSNH - Facultad de Ingeniería Civil

Síntesis y Caracterización de Recubrimientos Híbridos Anticorrosivos para Estructuras de Concreto Reforzado de Resistencia Media utilizando Nanocementos.

Tesis

Rafael Hurtado Solórzano
Marzo 2008

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1 ¿Qué es el concreto?.....	3
2.1.1 Cemento ó Concreto.....	4
2.1.2 Procesos químicos generados durante la hidratación del cemento.....	6
2.2 ¿Qué es la corrosión?.....	8
2.2.1 La Corrosión del Acero como una Preocupación.....	9
2.2.2 ¿Por qué se corroe el acero en el concreto?.....	9
2.3 Mecanismos de Corrosión en el Concreto.....	9
2.4 Diagrama de Pourbaix.....	11
2.5 Tipos de Corrosión.....	12
2.5.1 Corrosión Localizada.....	12
2.5.2 Corrosión Uniforme/Generalizada.....	15
2.5.3 Corrosión Galvánica.....	15
2.6 Causas de la Corrosión en Estructuras de Concreto.....	15
2.6.1 Carbonatación.....	15
2.6.2 Cloruros.....	20
2.6.3 Sulfatos.....	29
2.6.4 Ataque por Acido.....	31
2.6.5 Ataque de Agentes Biológicos.....	32
2.6.6 Ataque de Productos Industriales.....	32
2.7 Métodos de Protección y Control contra la Corrosión.....	33
2.7.1 Recubrimientos.....	37
3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	41
4. SÍNTESIS DEL CONCRETO.....	42
4.1 Estudio de Agregados.....	42
4.1.1 Cuarteo de Arena.....	42
4.1.2 Humedad Superficial y Humedad de Absorción en Arenas.....	43
4.1.3 Determinación del Peso Volumétrico Seco y Suelto de una Arena (PVSS).....	44
4.1.4 Determinación del Peso Volumétrico Seco y Varillado de una Arena (PVSV).....	46

4.1.5 Análisis Granulométrico en Arena.	47
4.1.6 Densidad de la Arena.	50
4.1.7 Cuarteo de Gravas.....	52
4.1.8 Humedad de Absorción en Gravas.....	52
4.1.9 Densidad en Gravas.	54
4.1.10 Peso Volumétrico Seco y Suelto en Gravas (PVSS).	55
4.1.11 Peso Volumétrico Seco y Varillado en Gravas (PVSV).....	56
4.1.12 Granulometría en Gravas.....	57
4.2 Proporcionamiento del concreto.	60
5. SÍNTESIS DEL RECUBRIMIENTO	63
5.1 Diseño de la mezcla base.	63
5.2 Uso de Agregados.....	64
5.3 Uso de Nuevos Agregados.....	74
5.3.1 Síntesis de los Recubrimientos Realizados.	79
6. SÍNTESIS DEL RECUBRIMIENTO COMPOSITE	90
6.1 Resultados de la Síntesis	90
7. EVALUACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO Y DEL RECUBRIMIENTO	93
7.1 Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto.	93
7.2 Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto Recubiertos.	95
7.3 Resistencia a la Compresión Simple en Cubos de Recubrimiento Compuesto.....	97
7.4 Resistencia a Flexión del Concreto.....	98
8. EVALUACIÓN DE DURABILIDAD.....	101
8.1 Prueba de resistencia al ataque de sulfatos en vigas de concreto con y sin recubrimiento.	101
8.1.1 Procedimiento de la Prueba.....	101
8.1.2 Registro de Resultados.....	102
9. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ANTICORROSIVAS.....	109
9.1 Prueba de Resistividad Eléctrica.....	109
9.1.1 Resistividad Eléctrica en los cubos.....	110
9.1.2 Resistividad eléctrica en cilindros, con y sin recubrimiento.	111
10. CONCLUSIONES	116
11. REFERENCIAS	118

| 1. Introducción

1. INTRODUCCIÓN

Durante siglos el hombre ha usado diferentes materiales con propiedades cementantes para dar fuerza, resistencia y seguridad a sus construcciones, como antecedentes tenemos a los egipcios los cuales ya usaban morteros para unir bloques al preparar una mezcla de arena y algún cementante y por supuesto que no podemos dejar atrás a los griegos y romanos que comenzaron a mezclar material de depósitos volcánicos, calizas y arena para producir un mortero muy resistente y así edificar y levantar esos majestuosos templos y palacios, los cuales hasta la fecha algunos siguen en pie y nos siguen maravillando. Pero no fue hasta el siglo XIX que se comenzaron a usar cementos a base de caliza quemada, hierro, sílice y alúmina, mezcla mejor conocida como “cemento Portland”. La utilización del cemento y de su producto resultante que es el concreto ha cambiado el aspecto del mundo, hoy en día es un material esencial en la construcción, gracias a la durabilidad manejabilidad y resistencia que éste tiene.

Por otro lado, tenemos al acero, uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado debido a su resistencia, trabajabilidad y precio relativamente bajo. El uso del acero se remonta al año 3000 A.C. utilizado por los egipcios para la fabricación de utensilios, pero no solo los egipcios comenzaron a producir el acero, durante siglos distintas culturas trabajaron en la producción del acero utilizando distintas técnicas de producción y como es de imaginarse algunos mejores que otros como el llamado acero *wootz*, mejor conocido como el acero Damasco popular por su durabilidad, pero con el tiempo las técnicas de producción se fueron perfeccionando.

No fue hasta el siglo XVIII cuando se produce un vertiginoso uso del acero, debido a que surge la construcción en acero. Se comenzó a usar el acero como elemento estructural en obras de arquitectura para la construcción de estaciones ferroviarias y salones de exposición, es decir, para cubrir grandes espacios. Posteriormente la construcción de edificios de altura usando acero surge a fines del siglo XVIII y principios del XIX, donde la estructura se rellena con obra de mampostería.

Al hablar de concreto, acero y construcción no podemos dejar de lado el hablar del concreto reforzado, clasificado en ciencia e ingeniería de materiales como un composite o material compuesto; es uno de los materiales más populares y prácticos, en cuanto al aprovechamiento de forma eficiente de diversas características, tales como: buena resistencia a la compresión, durabilidad, resistencia al fuego y moldeabilidad que presenta el concreto fusionándolas con las de alta resistencia en tensión y ductilidad que tiene el acero. El surgimiento de estos novedosos materiales de construcción, principalmente el acero, dio paso a un replanteamiento de la situación, los diseños de construcción se vuelven cada vez más



Estación de Pennsylvania, Estados Unidos.

atrevidos por parte de ingenieros y arquitectos; grandes claros, mayor altura, edificios más fuertes, formas novedosas y de gran atractivo visual pero aun con todo esto, no escapan a la corrosión.

Cuando pensamos en acero, pocas veces lo asociamos con la palabra “corrosión”, podría decirse que no le damos la importancia ni el dimensionamiento que dicha palabra implica. La corrosión es vista por la gente normalmente como algo desagradable, eso que hace que las cosas se vean viejas y parezcan estar en el olvido, pero para otros la corrosión es sinónimo de grandes pérdidas económicas, altos costes de mantenimiento, condiciones inseguras, destrucción y un fenómeno al cual encontrarle una solución.

La corrosión es un fenómeno ampliamente estudiado a nivel mundial y el cual sigue sin ser comprendido completamente debido a la complejidad de sus procesos. El uso de recubrimientos anticorrosivos no es algo novedoso; podemos remontarnos un par de siglos atrás y decir que el uso de la pintura material que usaban los artistas, la cual era hecha por ellos mismos con resinas naturales y aceites fue uno de los primeros recubrimientos anticorrosivos. Pero no fue hasta el siglo XX que con el gran desarrollo industrial que existía se comenzó a explotar este mercado, partiendo por supuesto de la fabricación de pinturas, posteriormente la constante investigación vendría a revolucionar la manufactura de estos productos razón por la que en la actualidad encontramos una gran variedad de productos cuya finalidad es la de prevenir o retardar la corrosión. Dentro de esta variedad de productos encontramos productos que son fáciles de manejar así como accesibles económicamente, hasta métodos que implican complejidad y un fuerte gasto económico, obviamente todo esto se refleja en la funcionalidad y las ventajas que cada uno de estos productos nos ofrecen.

Por último me gustaría agregar que este trabajo se basa en la investigación y aplicación de conocimientos para el diseño de un recubrimiento que impida la corrosión en el acero de refuerzo haciendo para esto uso de la nanotecnología.

2. Estado del Arte

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 *¿Qué es el concreto?*

El concreto es un material durable y resistente pero, dado que se trabaja en su forma líquida, prácticamente puede adquirir cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular para exteriores. Ya sea que adquiera la forma de un camino de entrada amplio hacia una casa moderna, un paso vehicular semicircular frente a una residencia, o una modesta entrada delantera, el concreto proporciona solidez y permanencia a los lugares donde vivimos.

En la forma de caminos y entradas, el concreto nos conduce a nuestro hogar, proporcionando un sendero confortable hacia la puerta. Además de servir a nuestras necesidades diarias en escalones exteriores, entradas y caminos, el concreto también es parte de nuestro tiempo libre, al proporcionar la superficie adecuada para un patio.

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales: cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Consecuentemente con ello, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

- Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante endurecida.
- La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
- La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no representen el punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

De la esmerada atención a estos tres aspectos básicos, depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto, como material de construcción, para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones en que debe prestar servicio. Pero esto, que sólo representa la previsión de emplear el material potencialmente adecuado, no basta para obtener estructuras resistentes y durables, pues requiere conjugarse con el cumplimiento de previsiones igualmente eficaces en cuanto al diseño, especificación, construcción y mantenimiento de las propias estructuras.

2.1.1 Cemento ó Concreto

Debemos recordar que el cemento no es lo mismo que el concreto, es uno de los ingredientes que se usan en él. Sus primeros usos datan de los inicios de 1800 y, desde entonces, el cemento portland se ha convertido en el cemento más usado en el mundo. Su inventor le dio ese nombre porque el concreto ya curado es del mismo color que una piedra caliza que se obtiene cerca de Portland, Inglaterra. Este tipo de cemento es una mezcla de caliza quemada, hierro, sílice y alúmina, y las fuentes más comunes donde se pueden obtener estos materiales son el barro, la piedra caliza, esquisto y mineral de hierro. Esta mezcla se mete a un horno de secar y se pulveriza hasta convertirlo en un fino polvo, se empaca y se pone a la venta. Existen cinco tipos de cemento portland, cada uno con características físicas y químicas diferentes. Todos los cementos para concreto hidráulico que se producen en México son elaborados a base de clinker portland.

Para la elaboración del clinker portland se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de fierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo.

La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1400 C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm, cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker portland.

Las reacciones químicas producidas dan resultado a nuevas especies químicas, las cuales son los principales minerales que componen el cemento:

ELEMENTO	FORMULA	SÍMBOLO
Silicato Tricálcico	3CaO SiO_2	C3S
Silicato Bicálcico	2CaO SiO_2	C2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Una vez frío, el clinker se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento portland simple. Además durante, la molienda, el clinker puede combinarse con una escoria o un material puzolánico para producir un cemento mezclado portland-escoria o portland-puzolana, o bien puede molerse con determinados materiales de carácter sulfo-calcio-aluminoso para obtener los llamados cementos expansivos. En la siguiente figura podemos apreciar el proceso de fabricación del cemento.

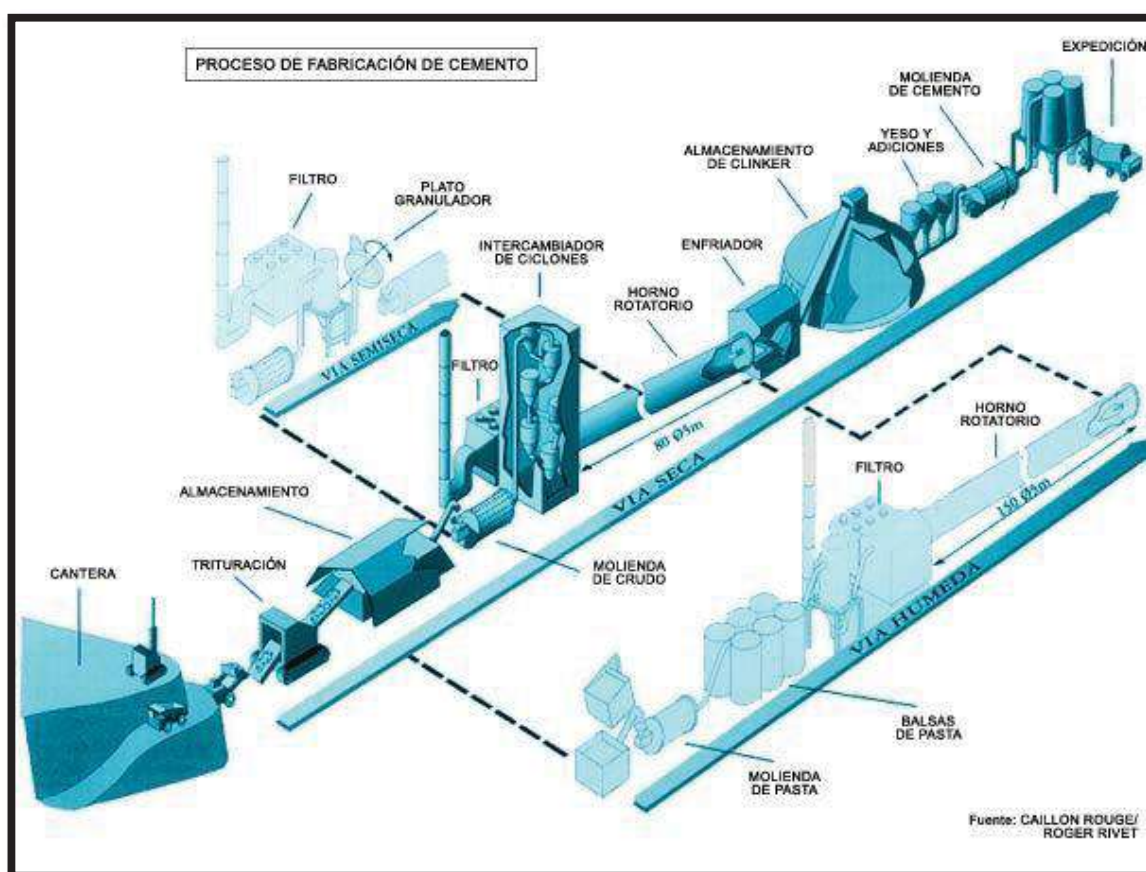


Figura 1. Proceso de fabricación del cemento. El clinker es el producto de la fusión a 1,500°C de la mezcla de caliza (CaCO_3) y arcilla (Al_2O_3 , Fe_2O_3 + sílica).

También es factible incorporar aditivos durante la molienda del clinker, siendo de uso frecuente los auxiliares de molienda y los inclusores de aire. Estos últimos dan por resultado los cementos inclusores de aire para concreto, cuyo empleo es bastante común en EUA pero no se acostumbra en México.

De conformidad con lo anterior, a partir del clinker portland es posible fabricar tres principales grupos o clases de cementos hidráulicos para la elaboración de concreto:

1. Los cementos portland propiamente dichos, o portland simples, moliendo solamente el clinker y el yeso sin componentes cementantes adicionales.
2. Los cementos portland mezclados, combinando el clinker y el yeso con otro cementante, ya sea este una escoria o una puzolana.
3. Los cementos expansivos que se obtienen añadiendo al clinker otros componentes especiales de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso.

El primer grupo constituye los cementos que se han utilizado tradicionalmente para la fabricación del concreto hidráulico en el país. Los del segundo grupo son cementos destinados al mismo uso anterior, y cuya producción se ha incrementado en los últimos 20 años, al grado que actualmente representan más de la mitad de la producción nacional.

Finalmente, los cementos del tercer grupo son más recientes y aún no se producen regularmente en México, si bien su utilización tiende a aumentar en EUA para las llamadas estructuras de concreto de contracción compensada. Así, mediante ajustes en la composición química del clinker, o por medio de la combinación con otros cementantes, o por la adición al clinker de ciertos materiales especiales, es factible obtener cementos con características y propiedades adecuadas para cada uso específico del concreto hidráulico.

2.1.2 Procesos químicos generados durante la hidratación del cemento

La hidratación del cemento es función de las reacciones entre los minerales del cemento (C3S, C2S, C3A, y C4AF) y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados, así:

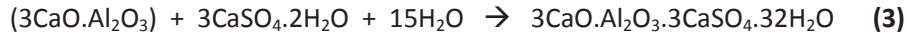
El C3S (alita) es el silicato cálcico más inestable de los procesos presentes en el cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, así:



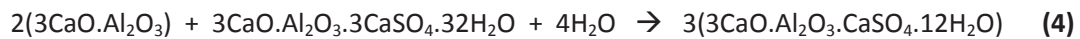
El silicato dicálcico (C2S – belita) al hidratarse también se convierte en tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de (1) se produce menos hidróxido de calcio:



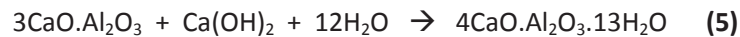
El aluminato de calcio (C3A – celita) al combinarse con yeso y agua produce la etringita:



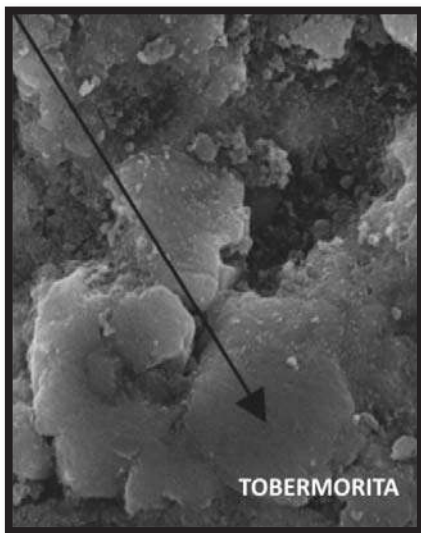
El aluminato de calcio con la etringita y con agua se convierte en monosulfato:



El aluminato de calcio (C3A) con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado:



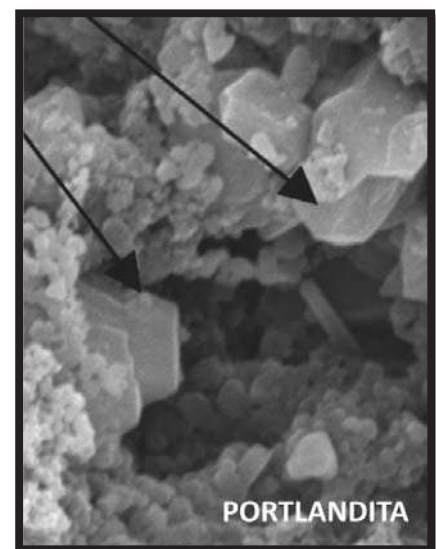
Caracterizar las partículas del cemento es complicado debido a su diminuto tamaño, formas complejas y la presencia de multifases naturales. Por lo cual, para caracterizarlo al igual que a la pasta e identificar sus componentes mineralógicos se usan técnicas como: microscopía electrónica, difracción de rayos X y análisis térmico, entre otras. Una precisa caracterización debería servir para una mejor predicción del comportamiento del cemento y para un modelamiento más real del desarrollo microestructural (Bentz y Stutzman, 1994). Las características de los minerales principales del cemento son:



Tobermorita gel (CSH). Es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de esta con los áridos en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados (Calleja, 2001) por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo.

Portlandita (hidróxido de calcio). Tiene efectos positivos en tanto que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (12 – 13) pues actúa como una “reserva alcalina”, mantiene a los concretos armados protegidos contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de concretos y morteros con áridos calizos, ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el caso de los áridos silíceos (Calleja, 2001).

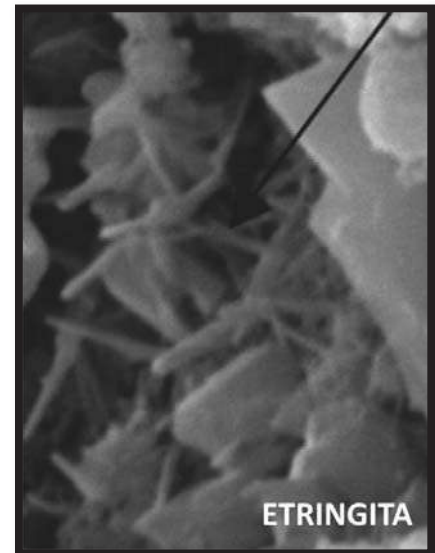
También tiene efectos negativos tales como: solubilidad en agua y fácilmente lixiviable por disolución; puede reaccionar sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600°C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura (Calleja, 2001). Varios de estos aspectos negativos pueden controlarse con la adición



de puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de hornos, etc.).

En el microscopio electrónico la portlandita se presenta normalmente en forma de plaquetas hexagonales delgadas, a menudo de decimas de micrómetros de ancho, pero después se convierten en depósitos masivos (Diamond 1976, en Neville 1995).

Etringita (trisulfoaluminato de calcio). Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva, pues la que genera expansión se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades tardías (mayores a 28 días) según lo afirman Marusin et al 2000: *“...la etringita se encuentra generalmente en las fisuras del concreto dañado, alrededor de las partículas de agregado o en microfisuras de la pasta del cemento”*. Autores como Abo-el-Enein, Salah A.; Salem, Th. M.; Hekal, Eisa E. (1988) han sugerido que la formación de etringita conlleva a una expansión debido a su crecimiento orientado. Estos últimos autores plantean también que la expansión asociada a la formación de etringita depende de las condiciones de curado.



2.2 ¿Qué es la corrosión?

“La corrosión es la deterioración que ocurre cuando un material (generalmente un metal) reacciona debido a la interacción con su medio ambiente.”

La terminología de la ASTM (G15) define la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”.

La presencia de la corrosión puede tener consecuencias directas e indirectas, tales como:

- Destrucción de equipo.
- Alto costo de mantenimiento y reposición.
- Pérdida de propiedades mecánicas.
- Tiempos muertos.
- Condiciones inseguras del personal.
- Apariencia desagradable.

Para el acero embebido en el concreto (*hormigón*), la corrosión da como resultado la formación de óxido que tiene 2 a 4 veces el volumen del acero original y la pérdida de sus óptimas propiedades mecánicas. La corrosión produce además descascaramiento y vacíos en la superficie del acero de refuerzo, reduciendo la capacidad resistente como resultado de la reducción de la sección transversal.

2.2.1 La Corrosión del Acero como una Preocupación

El concreto reforzado utiliza acero para aportarle las propiedades de resistencia a la tracción que son necesarias en el concreto estructural. Esto evita la falla de las estructuras de concreto que están sujetas a esfuerzos de tensión y flexión debido al tráfico, los vientos, las cargas muertas y los ciclos térmicos. Sin embargo, cuando el refuerzo se corroe, la formación de óxido conduce a la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto y la subsecuente delaminación y exfoliación. Si esto se ha dejado sin revisar, la integridad de la estructura puede verse afectada. La reducción del área de sección transversal del acero reduce su capacidad resistente. Esto es especialmente dañino en el desempeño de los cables de alto límite elástico en el concreto pretensado.

2.2.2 ¿Por qué se corroe el acero en el concreto?

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. Debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo por tanto permeable a líquidos y gases. Esto es de una gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el oxígeno como el agua pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto.

El acero en el concreto se encuentra usualmente en condición pasiva, no corroído. Sin embargo, el concreto reforzado con acero es frecuentemente utilizado en ambientes severos donde está presente el agua de mar o las sales de deshielo. Cuando los cloruros se mueven dentro del concreto, provocan la ruptura de la capa pasiva de protección del acero, causando que éste se oxide y se delamine.

La carbonatación del concreto es otra causa de la corrosión del acero. Cuando el concreto se carbonata hasta el nivel de la barra de acero, el ambiente normalmente alcalino que protege el acero de la corrosión, es reemplazado por un ambiente más neutral. Bajo estas condiciones el acero no permanece pasivo y comienza una corrosión rápida. El ritmo de corrosión debido al recubrimiento de concreto carbonatado es más lento que la corrosión inducida por cloruros.

Ocasionalmente, la falta de oxígeno que rodea la barra de acero causará que el metal se disuelva, conduciendo a un líquido de pH bajo.

2.3 Mecanismos de Corrosión en el Concreto

La dosificación y la calidad de los componentes que conforman una estructura de concreto armado son fundamentales para lograr las mejores propiedades que garanticen un periodo de vida útil prolongado.

La barrera de protección que le proporciona el concreto a la varilla de acero es reforzada por el valor de pH alcalino que se alcanza después de las reacciones de hidratación del cemento, que pasivan al elemento metálico y lo protegen químicamente. Sin embargo, la interacción con el medio ambiente provoca que la protección se vea disminuida. Los principales agentes agresivos son los cloruros en regiones marinas y la carbonatación en zonas rurales e industriales. La combinación de los agentes agresivos tiene un efecto sinérgico, acelerando el proceso de degradación de las estructuras de concreto armado.

Cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, éstos penetran a través de él cuando la estructura es puesta en servicio. Al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene. Una vez que la corrosión se ha desencadenado, ésta se manifestará bajo tres vertientes:

- 1) Sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica.
- 2) Sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero-concreto, provoca fisuras y desprendimientos.
- 3) Sobre la adherencia acero/concreto.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto, Tutti definió un modelo muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto proporcionando servicios para los cuales ha sido diseñada. Este modelo se divide en dos periodos.

Periodo de iniciación: Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector.

Periodo de propagación: Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable.

Estos periodos se ilustran al final del siguiente párrafo.

Durante el periodo de iniciación los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes más comunes son los iones cloruro y la neutralización de la pasta de concreto conocida como carbonatación.

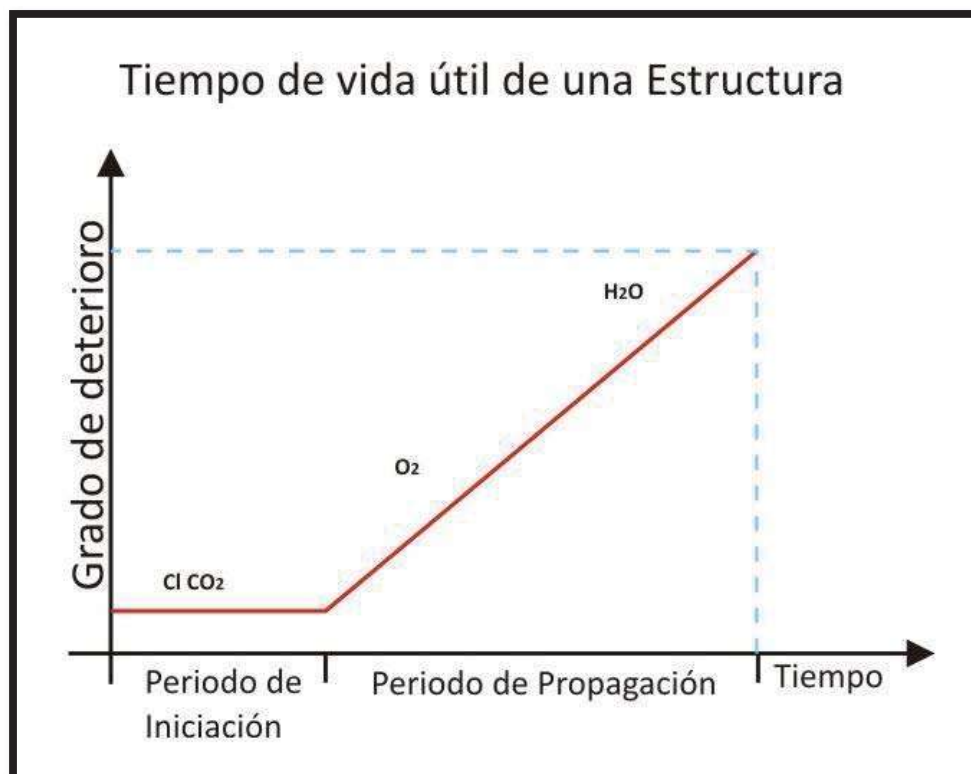


Figura 2

2.4 Diagrama de Pourbaix

En la mayoría de medios naturales, la presencia de agua es un factor destacable para la corrosión. Por tanto, el estudio de los procesos de corrosión naturales deberá centrarse en el de las reacciones en medios acuosos.

Una buena aproximación para el estudio del comportamiento de los distintos materiales en medio acuoso lo constituyen los diagramas de Potencial de reducción (Eh) contra Acidez (pH), o también llamados de Pourbaix, en honor a quien los introdujo. En éstos, se observan distintas zonas de estabilidad, entre las que cabe distinguir las de INMUNIDAD, de CORROSION activa y de PASIVIDAD (fig. 1).

La zona de inmunidad, o zona de predominio de las reacciones de reducción, corresponde a la zona donde el material se encuentra en condiciones estables.

La zona de corrosión activa se caracteriza por el predominio de las reacciones de oxidación, que causan la destrucción por combinación o disolución continuada del material. El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con la de pasividad.

La zona de pasivación, corresponde a una zona de corrosión, donde la fase formada constituye una película protectora, que evita el avance del proceso de corrosión. La formación de imperfecciones en la misma (pasivación imperfecta) conlleva la aparición de corrosiones locales (por ejemplo, de picaduras).

Pueden estudiarse para todos los metales las zonas de inmunidad, de corrosión activa, y de pasivación, pudiendo determinarse para cada caso las condiciones de Eh-pH que supone tal comportamiento, lo que ayudará en cada caso concreto a diseñar estrategias adecuadas de lucha contra la corrosión.

En especial, debemos hacer hincapié en el diagrama Eh-pH para el hierro y el acero, por ser el material más usado para construcciones mecánicas. Éste muestra una zona de inmunidad para pH inferiores a 11, a partir de un potencial estándar de -0,53 V con respecto al electrodo normal de hidrógeno, o -0,85 V con respecto a la pila de cobre/sulfato de cobre, que constituye el fundamento de la protección catódica de aplicación industrial.

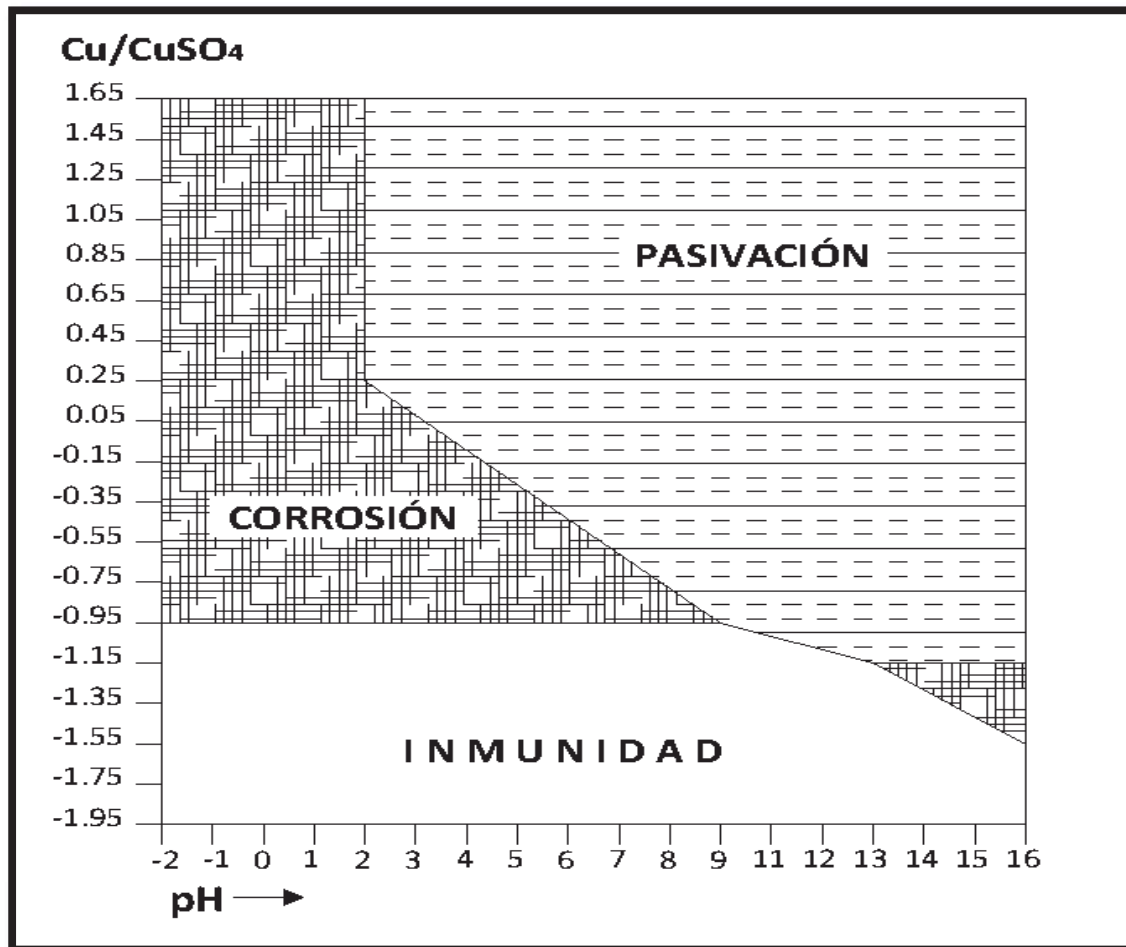


Figura 3. Diagrama de Pourbaix mostrando zonas de corrosión, pasivación e inmunidad del hierro frente a potenciales respecto un electrodo de Cu/CuSO_4 .

2.5 Tipos de Corrosión

En el concreto armado, las formas que puede adoptar la corrosión de la armadura son diversas. Fontana a clasificado los diferentes tipos /formas de corrosión de acuerdo a la apariencia física del ataque. Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes:

2.5.1 Corrosión Localizada

Corrosión por picaduras. Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o por que fueron incorporados en la masa de concreto.

Corrosión

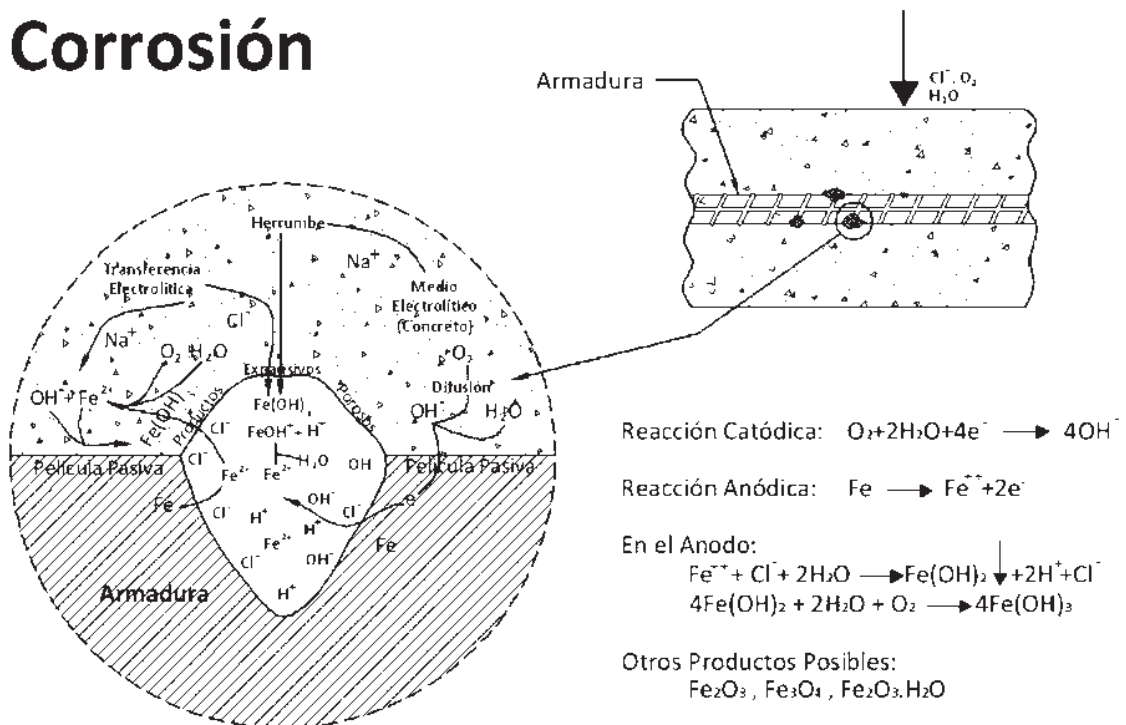


Figura 4. Mecanismo de corrosión por picadura de la armadura.

De esta manera, se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en el cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras. Como ya es conocido, las picaduras son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento.

En el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruros favorecen la hidrólisis de 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.

Corrosión en Espacios Confinados. La corrosión de este tipo 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 celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo.

Existen varias situaciones que pueden inducir a este daño. Entre ellas se puede mencionar la inyección de grietas (estructurales o por corrosión) con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al refuerzo, siendo esta zona donde la corrosión se aceleraría por falta de acceso de oxígeno. Otro ejemplo puede ser la corrosión de acero de refuerzo con revestimientos, como por ejemplo en el caso del uso de

epóxicos, cuando la adhesión entre este y el acero se ha deteriorado. Adicionalmente, si hay iones de cloruro en el concreto, estos pueden acumularse en el intersticio resultante entre el recubrimiento y el acero. El pH dentro de ese espacio confinado se disminuye y el proceso de corrosión se sigue agravando por un proceso autocatalítico, similar al de corrosión por picadura, todo lo cual origina una mayor pérdida de adherencia. El deterioro de la adherencia entre el acero y el recubrimiento se puede producir por daño mecánico (durante el doblado de las varillas) o por procesos electroquímicos que pudieran darse en el concreto aun antes que los iones cloruro lo penetren.

Corrosión bajo Tensión. Este tipo de corrosión ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre preferencialmente en concreto pre o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrogeno atómico difundido a través del metal. Este hidrogeno puede provenir de diferentes fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. Este daño produce también fragilidad por hidrogeno. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del concreto (mal relleno de las vainas), o a la presencia de determinados iones, generalmente aportados por algunos aditivos, o al uso de un determinado tipo de acero (templado y revenido) que se ha utilizado preferentemente en Alemania.

En el caso de aceros pretensados, la presencia de picaduras por corrosión causadas por iones cloruro, pueden inducir a que el acero presente corrosión por tensiones. La única manera de confirmar la fragilidad por hidrogeno o la corrosión bajo tensión es mediante la observación microscópica de las superficies de fractura. Este daño es considerado del tipo catastrófico, ya que está asociado a una pérdida de ductilidad y a la fractura de la armadura.

Corrosión por corrientes de interferencia. Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga (términos utilizados en algunos países), 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 corrosión por corrientes de interferencia debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene el efecto más pronunciado sobre la corrosión, ya que esta fluye 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 pronunciado.

Las fuentes más comunes de este tipo de corrientes son: sistemas de protección catódica operando en las cercanías de estructuras de concreto armado, especialmente en medios de muy baja resistividad, como lo es el agua salobre (agua que posee entre 0.5 y 30 gramos de sal por litro); 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 en un medio electrolítico son manifestaciones de diferencias de voltaje. Si en el entorno de estos gradientes de voltajes, se encuentra situada una estructura de concreto reforzado con acero, puede existir un intercambio de corriente del mismo, donde el punto de entrada de corriente actuaría como cátodo, pero la salida sería la zona anódica que podría causar la disolución del metal, corroyéndolo.

Es importante indicar que si el acero se encuentra pasivado en un hormigón no contaminado por cloruros esta corriente de interferencia no producirá la corrosión del refuerzo, ya que lo podría mantener pasivo o llevar a la zona de inmunidad. Por el contrario, si el concreto contiene cloruros, la corrosión del refuerzo se vería acelerada drásticamente por el efecto de estas corrientes.

2.5.2 Corrosión Uniforme/Generalizada

La corrosión uniforme es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, resultante de la carbonatación del concreto y/o la presencia de excesiva cantidad de iones cloruro. También puede ocurrir por efecto de la “lixiviación” del concreto producida por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas. Más adelante se encuentra una figura donde se puede observar el mecanismo mediante el cual ocurre corrosión por efecto de la carbonatación.

2.5.3 Corrosión Galvánica

Este tipo de corrosión se puede dar cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. En el caso del acero en hormigón, esta situación se dará cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actuará como cátodo. También se podría presentar cuando el refuerzo se encuentre en contacto con otros conductores más nobles. En general, se asocia al funcionamiento de una macrocelda. Un ejemplo típico es el caso de armaduras exteriores que se corroen al ingresar los cloruros, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas.

2.6 Causas de la Corrosión en Estructuras de Concreto

La carbonatación y la presencia de iones cloruro son dos de las causas más comunes de corrosión en estructuras de concreto, pero también podemos mencionar otros agentes corrosivos como: sulfatos, ácidos, agentes biológicos, productos industriales, H₂O, oxígeno.

2.6.1 Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos.

Uno puede preguntarse por qué razón un proceso tan común y natural como la carbonatación no ha sido ampliamente reconocido como una causa seria de corrosión de las varillas de refuerzo. Algunos creen que la carbonatación es causada por los calentadores que queman combustible y que se usan en interiores. Aunque estos calentadores pueden liberar grandes cantidades de dióxido de carbono (el culpable de la

carbonatación), sólo se requiere una pequeña concentración de CO_2 , que normalmente se encuentra en la atmósfera (0.03 por ciento) para que ocurra la carbonatación del concreto. Hay quien piensa que la carbonatación del concreto es un problema que ocurre únicamente en Europa y cita como una razón las mezclas de concreto de menor calidad y los estándares europeos. Sin embargo, la única diferencia de consecuencias reales entre el concreto de Europa y el del resto del mundo es su edad: el de Europa, en general, es más viejo. Consecuentemente, el primer lugar donde hubo que encarar la corrosión del concreto inducida por la carbonatación fue Europa.

¿Qué es la carbonatación?

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. ¿Por qué es un problema la pérdida de pH? Porque el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la

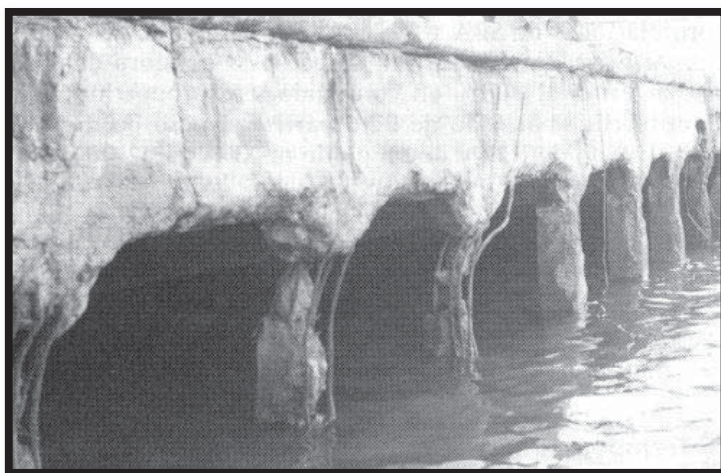


Figura 5. En el concreto armado, la carbonatación produce compuestos que se disuelven en el agua, dando lugar a la oxidación de la armadura, que se expande provocando el desprendimiento del concreto. Foto del Puerto de Santander, España.

superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales desgelantes y ambientes marinos.

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión,

resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor -100 ppm o menos-. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de carbonatación.

Afortunadamente para los propietarios, especificadores y contratistas, la carbonatación es una condición relativamente sencilla de identificar y diagnosticar. La manera más fácil de detectar la carbonatación en una

estructura es romper un pedazo de concreto (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del sustrato, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del concreto. Existen otros métodos y otros indicadores para detectar la carbonatación, pero éste es, con mucho, el método más fácil y común de detección.

Las agencias de prueba calificadas realizan estas pruebas rutinariamente como parte de una investigación de la condición en edificios y estructuras de concreto. Además de las pruebas de carbonatación, estas investigaciones de la condición incluyen con frecuencia pruebas de resistencia del concreto, valoraciones de la profundidad del recubrimiento, contenido de cloruro y permeabilidad del concreto.

Factores que afectan la carbonatación

Tal como se mencionó antes, el proceso de carbonatación es completamente natural. También se ve afectado por variables naturales que se encuentran en el concreto. El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y permeabilidad del concreto.

Contenido de humedad del concreto. Para que tenga lugar la carbonatación, debe haber presencia de humedad. La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55 por ciento. A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Por encima de 75 por ciento de humedad, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente con agua.

Aunque esto permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso del dióxido de carbono. Así se explica por qué diferentes lados de la fachada de un edificio de concreto, por ejemplo, pueden variar grandemente en la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido constantemente alto de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en los otros lados del edificio.

Permeabilidad del concreto. El concreto permeable se carbonatará rápidamente. Muchos años de protección contra la carbonatación pueden sumarse al concreto reforzado si los constructores simplemente siguen las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado.

Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él.

Recubrimiento del concreto y defectos de superficie. La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aun en concreto de alta calidad. Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie tales como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo. No pasará mucho tiempo antes de que el acero en el área de las grietas empiece a corroerse debido a la pérdida de pasivación.

Del mismo modo, los pequeños hoyos pueden, a veces, dar como resultado la pérdida de 12 mm o más del recubrimiento protector del concreto. Si ha de usarse un recubrimiento protector anticarbonatación, los pequeños hoyos y otros defectos de la superficie deben rellenarse primero con un "mortero nivelante" para evitar roturas en el recubrimiento protector.

Los bordes del recubrimiento de concreto son notables por su susceptibilidad a la corrosión inducida por carbonatación. Si el acero en estas áreas no tuviera un recubrimiento de concreto adecuado, la carbonatación conduciría a la corrosión y podría causar astillamiento en los bordes en muy pocos años. Durante la construcción original, las esquinas son también áreas donde con frecuencia el concreto no está bien compactado. Los huecos y los agregados expuestos de la superficie reducen el recubrimiento de concreto, permitiendo que la carbonatación alcance rápidamente el acero.

Finalmente podemos agregar que la carbonatación se presenta comúnmente en medios rurales y con mayor incidencia en zonas urbanas, en las que se alcanzan grandes concentraciones de óxidos sulfurosos (SO_x) y nitrosos (NO_x), que son combinados con el agua de la humedad ambiental formando los respectivos ácidos sulfurosos y nitrosos. En zonas de alta contaminación ambiental y altas precipitaciones pluviales, el pH llega a tomar valores cercanos a 4, lo que se conoce como lluvia ácida, que afecta las estructuras de concreto de la misma forma que la carbonatación.

Estrategias de reparación y protección

La investigación de la condición debe siempre constituir la base para un enfoque de reparación y protección. Antes de que pueda prescribirse un remedio apropiado, debe completarse un diagnóstico minucioso. Para estructuras a las que se ha diagnosticado corrosión, agrietamiento y astillamiento inducidos por la carbonatación, existen pocas opciones de reparación.

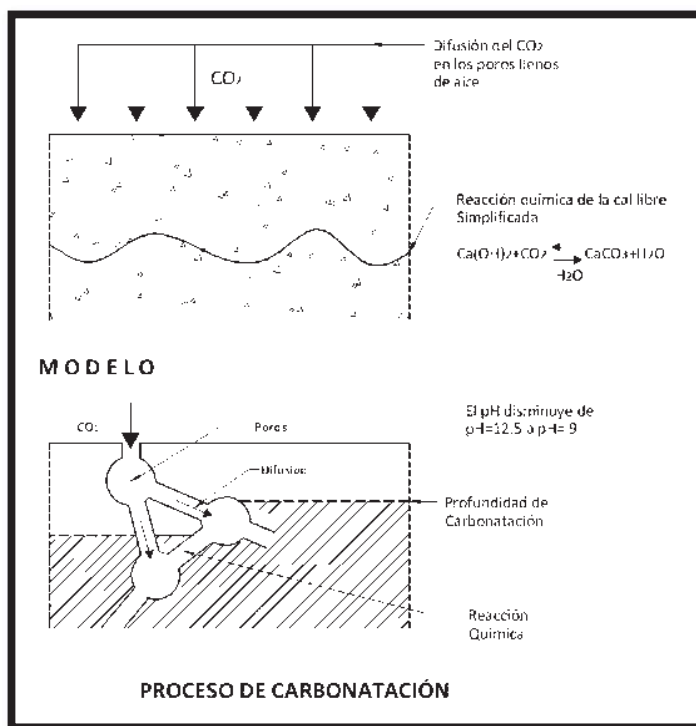


Figura 6 . El proceso de la Carbonatación

Se puede elegir la protección catódica (PC) si el daño por corrosión es severo.⁵ Sin embargo, esta es una opción costosa y requiere la continuidad eléctrica del refuerzo, así como también costos sustanciales para el mantenimiento progresivo. La realcalinización es una técnica bastante nueva que pretende restaurar la alta alcalinidad del recubrimiento de concreto extrayendo electroquímicamente un químico con alto contenido de pH en la estructura.⁶ Se trata también de una opción costosa con un historial muy limitado.

Con frecuencia, la opción más factible es reparar y proteger el concreto. Esta es una técnica de reparación directa que atiende claramente la necesidad inmediata del propietario.⁷ Sin embargo, la reparación del daño visible es sólo el primer paso para una reparación duradera del concreto dañado por la corrosión. Las áreas resanadas cubren usualmente sólo alrededor de 15 por ciento de toda el área de la superficie, pero el área total de ésta ha sido carbonatada. Si sólo se resana el daño visible, sin preocuparse por las causas subyacentes, no pasará mucho tiempo antes de que ocurra mayor astillamiento. Con frecuencia, un propietario ha pagado mucho dinero por un enfoque de reparación para verse finalmente ante más astillamientos en nuevas áreas en el término de dos años. Esto se debe a que el problema de la carbonatación nunca se resolvió de manera efectiva.

Recubrimientos anticarbonatación. Para detener efectivamente el avance del "frente de carbonatación", con frecuencia se emplean recubrimientos anticarbonatación. Al contrario de las pinturas de mampostería o los recubrimientos elastoméricos comunes, los recubrimientos anticarbonatación están específicamente diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono. Existen en Europa métodos de prueba estandarizados para evaluar la resistencia al dióxido de carbono de un recubrimiento. La figura 6 muestra la ilustración de una de tales pruebas, donde puede medirse el coeficiente de difusión del CO₂ de un material. Estas pruebas han demostrado que un recubrimiento anticarbonatación de alta calidad puede agregar protección a la varilla de refuerzo en una cantidad igual a muchos centímetros de recubrimiento de concreto. Los recubrimientos anticarbonatación deben ser recubrimientos respirables que puedan obtenerse en variedades rígidas o capaces de puentear grietas.

Es importante entender que no todos los recubrimientos resisten el dióxido de carbono. Muchos recubrimientos elastoméricos impermeables al agua no forman una barrera efectiva para el CO₂. El uso de tal recubrimiento puede, en efecto, acelerar la carbonatación, secando el concreto a tal grado que permita el ingreso más rápido del CO₂.

De manera similar, los selladores penetrantes con frecuencia se usan erróneamente para proteger contra la carbonatación. Los materiales a base de silicón tales como los silanos y los siloxanos son repelentes del agua, pero no evitan que entre el dióxido de carbono a los poros del concreto. Y al secar el concreto, también pueden incrementar la rapidez de carbonatación.⁴

Inhibidores de corrosión. Refiriéndonos nuevamente a la figura 2, la gráfica inferior muestra que el frente de carbonatación ha alcanzado ya la profundidad del refuerzo de acero. En situaciones como ésta, el recubrimiento anticarbonatación, aunque detiene el progreso ulterior de la carbonatación, no podrá detener la corrosión existente que ya está teniendo lugar. La investigación ha demostrado que existe todavía suficiente humedad en el concreto para continuar corroyendo la varilla de refuerzo.⁸

La tecnología actualmente en desarrollo de los inhibidores de corrosión puede ayudar a resolver la corrosión existente. En estas situaciones, los inhibidores de corrosión aplicados a la superficie, y que se pueden difundir a través del concreto que sirve de recubrimiento, pueden aplicarse en spray o con rodillos en la superficie de concreto antes de aplicar un recubrimiento anticarbonatación.

Este enfoque utiliza el inhibidor de corrosión para tratar la corrosión existente en la varilla de refuerzo, y el recubrimiento anticarbonatación agrega una protección efectiva. Los inhibidores de corrosión pueden probar su efectividad cuando se usan en situaciones similares, con selladores y membranas, donde los cloruros han alcanzado ya el nivel del refuerzo.

Es necesario que en Estados Unidos se reconozca la carbonatación como una causa seria de la corrosión del acero de refuerzo. A diferencia de los cloruros, el papel de la carbonatación en la corrosión de la varilla de refuerzo se ha descuidado con mucha frecuencia. Para evitar esto, las pruebas de la profundidad de la carbonatación deben siempre incluirse en la evaluación del concreto dañado por corrosión.

2.6.2 Cloruros

La corrosión inducida por cloruro se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino. Los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también los desplace el viento de la brisa marina a la zona costera y los deposite en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado, lo cual aumenta el alto riesgo de corrosión.

De acuerdo al modelo de vida útil, también es necesario que los iones cloruro avancen desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla. Una vez que llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión. Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros, lo que constituye la disolución poro. La siguiente figura ilustra los tres casos, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto.

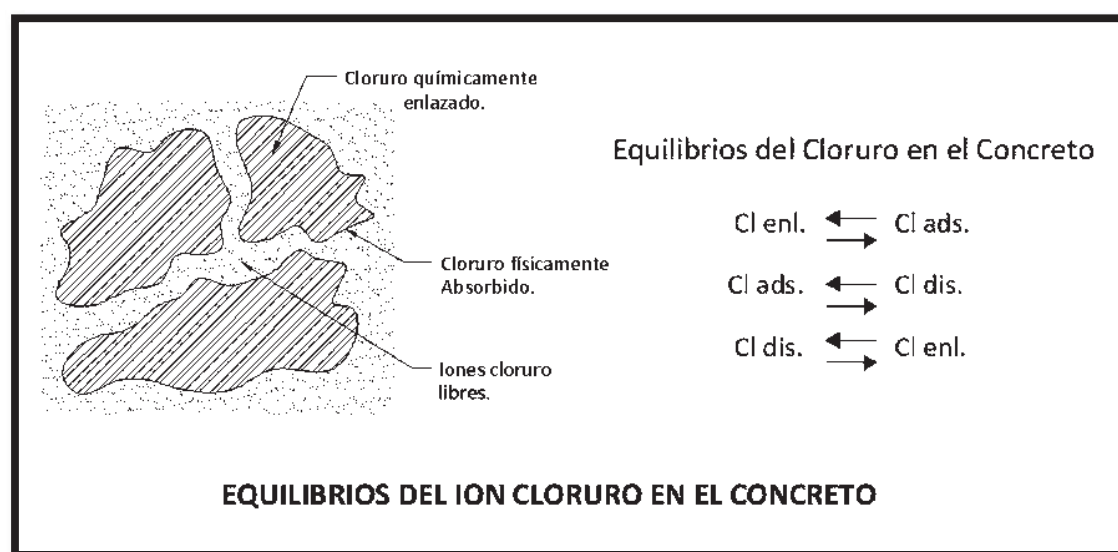


Figura 7. Equilibrios del Ion Cloruro en el Concreto.

Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos.

Cuando se utiliza agua de amasado con cloruros, cierta cantidad reacciona con los compuestos hidratados del concreto para formar las sales de Friedel, otra cantidad se adsorbe en la superficie de las paredes de los poros y sólo una parte queda disuelta. Esta distribución depende del tipo y la cantidad de cemento con que se dosifique al concreto.

En el caso de una fuente externa de iones cloruro, el acceso es a través de los poros del concreto. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se adsorbe y otra fracción queda disuelta. El medio de exposición es determinante para el ingreso de los iones cloruro. En una estructura sumergida en agua de mar, el mecanismo lo determina la diferencia de concentración entre el exterior y el interior del concreto, es decir, se favorece un proceso difusivo. En obras que se hallan a la intemperie, durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando parcialmente llenos. Si la brisa marina deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion es por succión capilar, o sea cuando que la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua (punto de rocío) que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. En la succión, la sal que se depositó durante el día es arrastrada por el agua condensada y penetra al interior del concreto. Una combinación de las dos formas de ingreso de cloruro se observa en la zona de variación de marea, en la que los poros eliminan agua durante marea baja y se saturan en marea alta.

Efectos en el acero de refuerzo

Como ya se ha referido anteriormente, la pasta de cemento no carbonatada tiene un pH mínimo de 12.5 y el acero de refuerzo no se corroe en esa circunstancia, fundamentalmente por la presencia de una película pasivante microscópica de óxido que evita su disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos tales como la carbonatación, la corrosión puede iniciarse. El efecto de la carbonatación puede disminuir el pH a niveles de 8 o 9, resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruro disueltos en agua en niveles por encima de 0.2 por ciento relativos a la masa de cemento, lo cual acelera la corrosión.

Cabe destacar que, en opinión de diversos autores, la corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo, aun en ambientes con un pH superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

La corrosión electroquímica de los elementos consiste básicamente en la conexión eléctrica o electrolítica entre un cátodo y un ánodo. En relación con el acero embebido en el concreto, las barras de refuerzo actuarán como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito. Durante el proceso de corrosión, el oxígeno es consumido y genera los productos de corrosión; el agua se necesita para permitir que el proceso de corrosión se mantenga y continúe, su presencia se relaciona con la generación de óxido férrico. Así, el resultado principal y más grave de la acción de los cloruros sobre el acero de refuerzo lo constituye la corrosión acelerada que éste sufre a consecuencia de su acción como catalizador en ese proceso electrolítico.

En muchas estructuras de concreto localizadas en ambientes marinos cercanos a las costas, en las que el daño se ha iniciado a través de una incipiente penetración de cloruros hacia el acero –como consecuencia de una permeabilidad natural excesiva del concreto, su carbonatación o el agrietamiento de las secciones–, la acción de la corrosión y del incremento de diámetro de las varillas causan por sí mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando las estructuras a daños irreversibles en periodos notablemente cortos. Así, ante la sospecha de ataque, se deberán incorporar de inmediato programas de reparación y mantenimiento de los elementos afectados.

Incidencia del agrietamiento

La existencia de grietas en el concreto no es condición indispensable para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo, pero su presencia favorece la ocurrencia de este fenómeno, pues la película pasivante en la superficie del acero se rompe en un área estrictamente confinada, lo cual resulta equivalente a un severo ataque por carbonatación en el concreto y genera zonas de máxima vulnerabilidad en la tasa de corrosión. Debido a ello es necesario, para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, prevenir la formación de grietas o suministrar un tratamiento adecuado de obturación a las que ya se hayan presentado.

Las grietas en el concreto pueden dividirse en dos grandes grupos: las que se producen por esfuerzos debidos al funcionamiento estructural y las que se deben a esfuerzos que se originan en el seno mismo del concreto. Así, la formación de grietas depende de factores tales como el diseño estructural, las características de los materiales, la composición del concreto, las prácticas constructivas, las condiciones ambientales y la manifestación de situaciones anómalas y de eventos extraordinarios.

En el caso de las grietas comunes, asociadas con el propio funcionamiento y naturaleza del concreto, con anchos que fluctúan de 0.15 a 0.35 mm, tienen un comportamiento autosellante en ambientes no agresivos, por efecto de calcificación, polvo y depósitos de óxido. No obstante, en ambientes agresivos colaboran también a la acumulación de sales que pueden agravar esa magnitud de agrietamiento a consecuencia de su cristalización. Asimismo, las grietas que se desarrollan perpendiculares al refuerzo resultan menos peligrosas que las de dirección paralela a éste, por la menor exposición que propician.

Los factores que principalmente pueden vincularse con determinados sitios o regiones geográficas son las características de los agregados y las condiciones ambientales, que influyen sobre los agrietamientos atribuibles a las contracciones –plástica y por secado– y a las reacciones deletéreas que eventualmente se producen entre los álcalis del cemento y algunos agregados.

En la república mexicana, las características de los agregados y las condiciones ambientales son muy variables; existen casos en los que tales características y condiciones se muestran favorables a motivar este tipo de agrietamiento en el concreto. Habría que considerar como riesgo potencial todos aquellos sitios del país donde los agregados contuvieran rocas y minerales reactivos con los álcalis.

Durabilidad del concreto

El medio ambiente

Las estructuras de concreto están expuestas durante su vida útil al ataque químico y físico de diferentes agentes. La durabilidad del concreto variará entonces conforme tales factores sean más o menos agresivos, y también de acuerdo con las propiedades de sus componentes, el proporcionamiento de la mezcla y las condiciones de colado y curado que se hayan aplicado en su construcción.

La planeación y el diseño deberán entonces no solamente estar basados en el uso de la estructura, sino también en las condiciones ambientales y en la vida útil esperada de la misma. Estas definiciones básicas deberán estar reflejadas en los materiales y especificaciones de construcción, y tanto en el concepto como en los detalles estructurales.

En el contexto de la práctica común, se diseña y detalla no sólo para las cargas que actuarán en la vida útil de una estructura, sino también para los efectos de agrietamiento y temperatura; in embargo, sólo se consideran condiciones especiales de exposición para grupos muy particulares de estructuras.

Es muy común que los códigos y normas actuales sólo prescriban las variaciones adecuadas de la relación agua/cemento y del recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo de acuerdo con una clasificación muy simple de las condiciones de exposición. Sin embargo, en la práctica se encuentran muchas y más diversificadas condiciones de exposición, y no sólo en relación con el medio ambiente, sino también según el uso pretendido de la estructura.

En condiciones de ambientes eminentemente agresivos, las precauciones y los cuidados en la construcción deben realmente extremarse. No obstante, existen condiciones no tan claramente agresivas, por lo que, con el fin de obtener estructuras durables se ha considerado que éstas son afectadas por el viento y la humedad marítima que contienen grandes cantidades de sal, así como por los ciclos de humedecimiento y secado. Se vuelve entonces muy importante la detección y el estudio de las características climáticas más relevantes de la región en la que se ubicará la estructura, es decir, los cambios estacionales de la dirección de los vientos, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación pluvial; inclusive, podría en muchos casos resultar deseable y útil contar con el análisis de la composición química del agua de mar.

Como se mencionó anteriormente, existen dos factores preponderantes en la determinación de la tasa de corrosión: la resistividad eléctrica del concreto y la disponibilidad de oxígeno en el cátodo, los cuales se relacionan con los siguientes factores:

Contenido de humedad en el concreto. Mientras que un incremento de la humedad en el concreto reduce su resistividad, reduce también la penetración y difusión de oxígeno, que se vuelve mínima para el concreto saturado; de esa forma, el concreto permanentemente sumergido en agua de mar sufre corrosión lenta, mientras que los concretos expuestos a humedecimiento y secado intermitentes son más susceptibles de corroerse.

Temperatura. Estudios de campo y de laboratorio han mostrado que la corrosión en el acero de refuerzo se acelera con el incremento de la temperatura, en virtud de que ésta afecta directamente la solubilidad del oxígeno y también la movilidad de sustancias tales como los cloruros que participan preponderantemente en el proceso de corrosión. También, los cambios bruscos de temperatura en el aire ambiental pueden resultar en condensación de agua sobre la superficie de concreto y cambiar así su contenido de humedad.

Presencia de sales. La presencia de sales provoca generalmente dos efectos que resultan opuestos uno al otro: reducen la resistividad del electrolito, incrementando así la velocidad de corrosión, y en

concentraciones altas disminuye la solubilidad del oxígeno y puede por lo tanto disminuir la velocidad de corrosión.

El contenido de C_3A en el cemento forma un complejo insoluble, hidrato de cloroaluminato de calcio, el cual inhibe cierta proporción de los cloruros totales y disminuye así el riesgo de corrosión. Sin embargo, en un ambiente con presencia de sulfatos y cloruros, los iones sulfato alteran ese complejo debido a la formación preferencial de hidrosulfoaluminato de calcio, lo que resulta en la liberación de algunos cloruros ligados que quedan así disponibles para la corrosión del acero. Un proceso similar de liberación de cloruros se genera bajo la acción del dióxido de carbono presente en la atmósfera, ya que también puede descomponer los hidratos de cloroaluminato.

El dióxido de carbono puede asimismo penetrar en el concreto, aunque su tasa de penetración se puede controlar eficazmente mediante la impermeabilidad de un concreto de buena calidad. El CO_2 , el dióxido de sulfuro y el óxido nítrico, considerados importantes contaminantes del aire, reaccionan también con los hidróxidos en el concreto y los convierten en carbonatos. Así, todos ellos, en condiciones naturales de exposición, dan lugar a procesos de carbonatación del concreto, por lo que la carbonatación (ver) es hoy su mecanismo dominante de neutralización.

Potencial de cloruros en el aire

a) Aire marítimo. Estudios realizados en otros países indican una gran diversidad de componentes químicos en el agua de mar, con una amplia gama de concentraciones. Resulta entonces improductivo generalizar una presencia promedio de elementos nocivos para el buen comportamiento de las estructuras de concreto. Podemos citar como ejemplo una reciente investigación en Japón, que detectó una variación en cloruros del agua de mar que osciló entre 0.01 y 0.20 mg de cloruro de sodio por cm^2 . Otro estudio encontró concentraciones particularmente elevadas del ion cloruro, las cuales variaban alrededor de 21,700 ppm. Asimismo, se detectaron contenidos de sulfatos sobre 3800 ppm, y los más altos valores de sulfitos registrados en el mundo.

Aun cuando en nuestro país no se conocen datos concretos, resulta evidente la presencia de sulfitos, carbonatos y cloruros en el agua de mar, los cuales necesariamente resultan dañinos para las estructuras de concreto. Así, con el agravante de la acción de la temperatura, casi constante en todo el año, asociada al clima tropical de nuestros litorales y a la acción de los vientos también propios de estas zonas, se conjuntan todos los factores que generan ambientes altamente propicios para que se produzca la corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras de concreto, tal y como se refirió al describir la incidencia de cada uno de esos aspectos en el proceso general.

b) Zonas industriales. La presencia de contaminantes en el medio ambiente, generados por la emisión de las industrias, provoca una diversidad de componentes químicos (con diferentes grados de concentración cada uno) mayor de la que se podría observar en un ambiente marítimo natural, aunque es altamente probable la preponderancia del óxido de carbono, algunos sulfatos y nitratos que, como se refiere, inciden en la disminución del pH natural del concreto y en procesos de carbonatación que favorecen la entrada de humedad y agentes corrosivos hacia el acero de refuerzo.

Como se señaló en el inciso anterior, las zonas costeras cuentan con condiciones que propician la corrosión del acero de refuerzo por los componentes químicos que flotan en el aire. Por lo tanto, la emisión de contaminantes de zonas industriales en esas áreas viene a agudizar la problemática, pues la gran

aleatoriedad en la presencia de cada componente impide el establecimiento de normas o recomendaciones en cuanto a cuidados específicos y hace necesario el estudio de cada caso en particular, con el apoyo del conocimiento que pueda proporcionar el estado del arte actual en cuanto a tecnología del concreto.

Procedimientos de Control

Durante la fabricación del concreto

a) Cemento. La pasta de cemento portland bien hidratada contiene de 15 a 30 por ciento de hidróxido de calcio por peso de cemento, siendo éste el responsable de la alcalinidad del concreto y de la formación de la película de óxido gamma férrico sobre la superficie del acero. También contribuye a inhibir la corrosión del acero el aluminato tricálcico, que al combinarse con los cloruros forma compuestos no solubles de cloroaluminato cálcico, reduciendo el contenido de cloruros libres que promueven el proceso de corrosión. Diversas experiencias muestran que a mayor contenido de aluminato tricálcico, mejor es el comportamiento de la pasta para inhibir la corrosión. Así, un cemento que contenía 9.5 por ciento de C3A mejoró 1.62 veces su comportamiento respecto a otro que contenía 2.8 por ciento; también se probaron cementos con 9, 11 y 14 por ciento de C3A, lo cual mejoró su comportamiento en 1.75, 1.93 y 2.45 veces respectivamente en relación con el que contenía sólo 2.8 por ciento. Con lo anterior se evidencia que la relación composición/tipo del cemento incide de manera directa sobre la etapa de iniciación del proceso de corrosión, aunque en la práctica se ha observado que su efecto puede ser relativamente pequeño si se lo compara con el de una pobre calidad del concreto, falta de recubrimiento, prácticas de baja calidad en la construcción, curado inadecuado, etcétera.

Por otra parte, la estructura de los poros de la matriz de la pasta de cemento es uno de los factores que reducen la movilidad de los iones de cloruro en el concreto. Ciertos tipos de cemento que contienen cenizas volantes o escoria de alto horno muestran una gran capacidad para restringir la movilidad de los iones cloruro. También con la estructura de los poros resultantes en la matriz de la pasta tiene que ver la finura del cemento empleado, pues se encontró experimentalmente que el tiempo de ataque fue de 3.9 años cuando la superficie específica fue de 444 m²/kg, en contraste con 2.5 años para una superficie específica de 300 m²/kg.

La permeabilidad del concreto elaborado con cantidades apropiadas de escoria o puzolana puede llegar a ser tan baja como un décimo o centésimo de la de un concreto de resistencia comparable elaborado sin esas adiciones.

b) Agua y agregados. La permeabilidad del concreto es probablemente el factor aislado más importante que incide en el proceso de corrosión puesto que, para un recubrimiento dado, la permeabilidad determina el grado de penetración de agentes agresivos desde el ambiente. A la vez, concretos de alta permeabilidad tendrán también baja resistividad, como se manifestó en su oportunidad.

La permeabilidad del concreto está intrínsecamente relacionada con la relación agua/cemento, particularmente cuando ésta excede de 0.6, pues entonces la permeabilidad resultante crece de manera exponencial. En términos generales, las investigaciones al respecto coinciden en mantener la relación agua/cemento por debajo de 0.5 para condiciones moderadas de exposición, e incluso limitarla hasta 0.4 para condiciones muy severas, lo cual se refleja en la mayor parte de las normas y reglamentos vigentes.

El agua empleada en la elaboración del concreto deberá tener un contenido máximo de cloruros tal que la suma de los cloruros presentes en los constituyentes de la mezcla, incluyendo los aditivos, no sobrepase las recomendaciones citadas en el primer capítulo de este documento.

En cuanto a agregados comunes, existe poca posibilidad, si no es que ninguna, de que contengan cloruros en concentración representativa, incluso cuando se empleen agregados tales como arenas de playa en la elaboración del concreto. Se debe tener especial cuidado en respetar la máxima concentración permisible de cloruros totales en la mezcla, para lo cual habrá que revisar la presencia de cloruros solubles en los agregados con esa clase de origen.

Durante el colado

a) Efectos de vibrado. Una plena compactación es esencial para expeler todo el aire atrapado, para consolidar el concreto, reducir el riesgo de agrietamiento por contracción o asentamiento, así como para asegurar una buena liga tanto entre las capas de concreto colocado como con el acero de refuerzo, con el resultado de un elemento homogéneo. Un vibrado inadecuado resultará en un incremento del número y tamaño de los huecos y, por consiguiente, en un notable incremento de la permeabilidad, con las consecuencias que se han discutido anteriormente.

b) Recubrimiento del acero. Como ya se dijo, tanto la carbonatación como los cloruros penetran en el interior del concreto; si en su penetración alcanzan el acero de refuerzo, éste iniciará su proceso de corrosión. Diversos estudios han demostrado que la velocidad de avance de tal penetración se relaciona con una función de la raíz cuadrada del tiempo, es decir, si el recubrimiento se reduce a la mitad en un elemento de concreto, la etapa de penetración alcanzará su valor crítico en menos de una cuarta parte del tiempo; esto hace patente la importancia de un recubrimiento adecuado.

La tendencia general de las normas y reglamentos de construcción define la cantidad de recubrimiento requerido para garantizar la vida útil de una estructura en función de su grado de exposición a agentes agresivos, variando desde 1 cm para las condiciones más benignas, hasta 7.5 cm para aquellas muy agresivas. Es responsabilidad del proyectista emplear la elección adecuada.

Los recubrimientos son generalmente definidos como la distancia libre desde el punto más cercano de la superficie de concreto al refuerzo; no obstante, es preciso considerar tanto el refuerzo principal como el transversal. La superficie permanente más cercana se define como la superficie de concreto terminado libre de cualquier recubrimiento posterior.

El constructor y el supervisor tienen influencia decisiva en este aspecto. Algunos estudios de campo han demostrado que existen variaciones con amplia dispersión en la magnitud real del recubrimiento en las secciones de concreto; destacan que 62 por ciento de las construcciones investigadas tenían un recubrimiento menor que el especificado en el proyecto, con una media de 5 mm, lo cual en la mayor parte de los casos se debió a que se había desplazado el refuerzo de su posición original para permitir el acomodo de las instalaciones. Así, en caso de dudarse de que los requerimientos vayan a ser cumplidos, bajo la tolerancia especificada, deberá estipularse en el proyecto una magnitud mayor, en el sentido de tener en cuenta las tolerancias incrementadas.

Aunque la magnitud del recubrimiento es muy importante, no provee por sí misma la protección suficiente para el refuerzo, ya que si bien los factores dominantes en el proceso de corrosión se vinculan estrechamente con ella, también tienen que ver con la calidad del concreto.

Después del colado

a) Recubrimientos y protecciones. Aunque no constituyen estrictamente un recubrimiento o protección permanente, los agentes de curado son de primordial importancia en la obtención de un concreto de buena calidad, puesto que las superficies de concretos no curados son inevitablemente más permeables y, por lo tanto, menos durables que las del concreto curado.

El curado inicial es vital para los efectos de la durabilidad, y cualquier día menos de aplicación del mismo equivale a alrededor de tres meses de exposición al efecto intermitente de humedecimiento y secado.

En lo que respecta a proporcionar protección al acero contra la corrosión, existen aditivos que la inhiben al generar una película de espesor molecular que protege y estabiliza la capa pasiva, y su efecto se mantiene aun en ausencia de contacto directo con el concreto. Estos productos muestran la propiedad de migrar a través del concreto por distancias de 1 a 2 metros, con lo cual, además de utilizarse como constituyente de la formulación original del concreto, puede extenderse su uso y desempeñarse como tratamiento preventivo de la corrosión cuando el concreto original no haya sido tratado, o como tratamiento correctivo en casos en los que esté desarrollándose un proceso de corrosión para detener el avance del mismo.

Existen en el mercado materiales para la protección posterior del concreto, reducir su permeabilidad superficial e incluso impedir el paso de cualquier agente agresivo, los cuales están elaborados con una amplia gama de componentes que van desde las parafinas hasta los productos epóxicos. Evidentemente, la elección de uno u otro producto será función directa del grado de exposición del elemento, así como del grado de vulnerabilidad propia que de origen posea.

En general, el éxito de estos recubrimientos estriba en su aplicación, pues todos ellos requieren que la superficie se encuentre libre de agua, grasa u objetos extraños, de tal manera que permitan una estrecha adherencia sobre la superficie del elemento que se ha de proteger. Para que puedan considerarse efectivos, debe garantizarse que la resistencia adhesiva con el concreto sea cuando menos igual a la resistencia en tensión del concreto en la superficie.

Es importante remarcar que cualquiera de estas protecciones es temporal –unas tienen mayor durabilidad que otras– y, por lo tanto, todas requieren una supervisión y mantenimiento programados. Asimismo, cualquier agrietamiento en la superficie de concreto, incluyendo aquellos que ocurren después de la aplicación de la protección, se reflejarán a través de ésta si la estructura está sujeta a movimientos por cambio de temperatura o cargas externas. Este movimiento del concreto puede llegar a anular la habilidad de la barrera para brindarle protección al concreto.

Estructuras dañadas

a) Procedimientos de evaluación. Ya se había dicho que existen dos etapas en el proceso de afectación; en la primera, la de iniciación, no se aprecia el daño a simple vista, y se han de emplear técnicas apoyadas en análisis e indicadores químicos. En la segunda, la de propagación, el daño se manifiesta a través de fisuras

paralelas al acero de refuerzo, acompañadas de manchas de color rojizo; en casos extremos se observan desprendimientos del recubrimiento y una disminución del área útil de la barra.

Cualquiera que sean la causa y el avance del daño, es esencial determinar su extensión y averiguar si la estructura posee la calidad suficiente para poder colocar una reparación sana. Sobre la base de esta información podrán elegirse el tipo y extensión de la reparación. Este es el paso más delicado, en el cual se requiere un profundo conocimiento de la materia y un juicio maduro por parte del ingeniero. Si el daño es resultado de una exposición moderada sobre un concreto de calidad inferior, su reemplazo por otro de calidad suficiente asegurará buenos resultados. Por otra parte, si es un concreto de buena calidad el que ha sido destruido, el problema se torna más complejo y se requerirá un concreto de calidad superior.

En el caso específico de ataques por cloruros, puede haber una variación considerable de un punto a otro de la estructura; habrá necesidad entonces de tomar muestras en varios puntos sobre la totalidad de la estructura. Se recomienda para esto la extracción de corazones de concreto de 10 cm de diámetro para agregado de 20 mm, o de 15 cm de diámetro para agregado de 40 mm. Alternativamente, se pueden practicar barrenos de 10 mm de diámetro a diferentes profundidades, de manera de recolectar el polvo que se obtiene en la barrenación y proceder a su análisis químico.

Cuando se extraen corazones de concreto, éstos son seccionados en discos de espesor constante, sin utilizar agua de refrigeración. La determinación del perfil de afectación se lleva a cabo siguiendo técnicas de lixiviación o bien mediante el análisis del líquido de poros extraído de las muestras; pueden complementarse o apoyarse con métodos colorimétricos, tiñendo el concreto con soluciones al 0.1 de nitrato de plata.

b) Esquemas de reparación. Es difícil particularizar sobre la utilización detallada de uno u otro método, pues ésta depende del grado de afectación y extensión que muestren los elementos; sin embargo, pueden definirse dos esquemas básicos.

El primero consiste en el reemplazo general del concreto dañado con concreto de proporcionamiento y consistencia adecuadas, de tal manera que se integre plenamente con el concreto base. Este es el método que ha de seguirse en los casos en que el grado de afectación sea importante en cuanto a magnitud o profundidad; cantidades considerables de concreto habrán de ser removidas hasta que se tenga plena certeza de haber alcanzado concreto sano. Se requerirá siempre la utilización de cimbra.

Una variante de este esquema, en el caso de una afectación de poca extensión pero de gran profundidad, consiste en el empleo del retacado con mezclas muy secas o de tipo epóxico, colocadas en capas delgadas; de esta forma, prácticamente no ocurrirá contracción y se desarrollará una resistencia igual o superior a la del concreto original.

El segundo método consiste en la aplicación de concreto lanzado, el cual tiene una excelente adherencia con el concreto existente y es frecuentemente la solución más satisfactoria y económica para hacer reparaciones superficiales; se adapta particularmente a superficies verticales o sobrecabeza, donde es capaz de soportarse por sí mismo sin la necesidad de cimbras. Existen en la actualidad morteros predosificados y equipos especiales simplificados a costos accesibles.

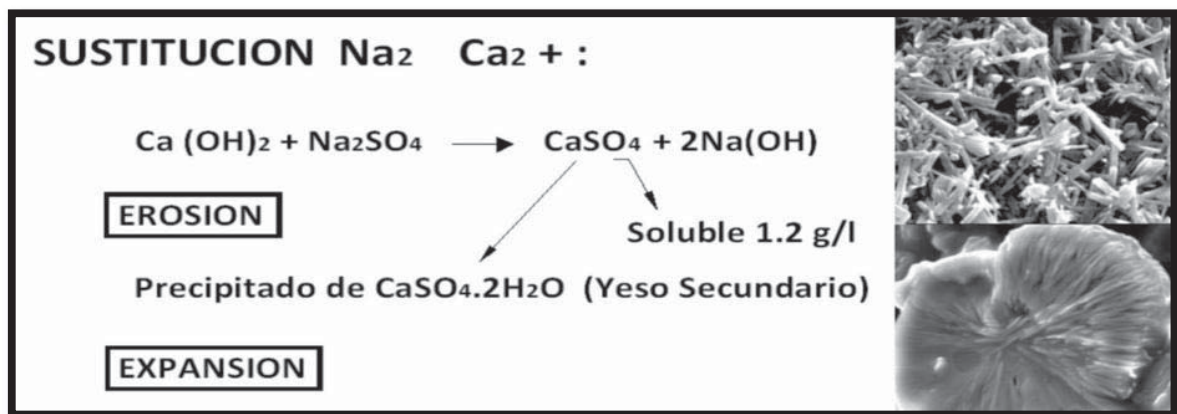
Principal atención ha de prestarse al acero de refuerzo; en el caso de observarse una profundidad tolerable de corrosión, podrá simplemente limpiarse mediante medios mecánicos o con chorro de arena; no obstante, cuando su grado de afectación sea mayor, deberá reemplazarse por completo.

2.6.3 Sulfatos

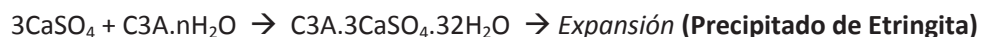
Una de las formas más frecuentes de ataque químico al concreto es la acción de los sulfatos. Se estima que el 75% de las publicaciones que tratan de la durabilidad del concreto se ocupan de este tema. El ión sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales.

En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario. Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio, de sodio y calcio, todos ellos de diferente solubilidad. La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio C3A y el ferroaluminato tetracálcico C3FA. El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfato aluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita). La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.



Acción del yeso secundario sobre aluminatos de cemento:



Debe distinguirse que en yeso secundario, que produce expansión en el agrietamiento difiere de la acción del Yeso que se agrega al clinker, en la molienda, que no se encuentra en estado libre en el concreto endurecido. Asimismo, la etringita que se forma durante el fraguado del cemento, se transforma rápidamente en monosulfatoaluminato cálcico.

Control de los Sulfatos

Para impedir la acción destructiva de los sulfatos, es indispensable la buena compacidad de los concretos. El humo de sílice es muy efectivo para mejorar la resistencia a los sulfatos mediante la conversión del hidróxido de calcio en CSH. Otras puzolanas, tales como la ceniza volante, pueden también mejorar la resistencia a los sulfatos, pero es necesario tomar algunas precauciones. Debido a su bajo contenido de calcio, la ceniza volante de clase F es más efectiva que la ceniza volante de clase C para mejorar la resistencia a los sulfatos. Sin embargo, algunos tipos de ceniza volante de clase F con un alto contenido de alúmina no son efectivos para mejorar la resistencia a los sulfatos. La ceniza volante de clase C con bajo contenido de calcio es con frecuencia efectiva, pero la ceniza volante de clase C con alto contenido de calcio a menudo es ineficaz y puede disminuir la resistencia a los sulfatos. En general, se logran los mejores resultados si la ceniza volante se agrega al concreto en vez de utilizarse como un reemplazo del cemento.¹

Los aditivos inclusores de aire mejoran la resistencia a los sulfatos, principalmente debido a que la inclusión del aire permite una menor relación agua / cemento que disminuye la permeabilidad.³ Por la misma razón, los aditivos reductores de agua también mejoran la resistencia a los sulfatos, permitiendo relaciones de agua / cemento de 0.45 o más bajas, para exposiciones severas, sin sacrificar la trabajabilidad. Conviene evitar el empleo de aditivos reductores de agua que contengan cloruro de calcio, ya que las bajas concentraciones de cloruros disminuyen la resistencia a los sulfatos.¹

Además de utilizar aditivos para incrementar la resistencia a los sulfatos, otras estrategias eficaces incluyen:

- Uso de cemento tipo II o tipo V.
- Uso de cementos con bajo contenido de cal (que contienen menos silicato tricálcico, lo que produce hidróxido de calcio cuando se hidrata, y más silicato dicálcico).
- El incremento del contenido de cemento.
- Ampliación del periodo de curado para reducir la permeabilidad.

Debe considerarse que los climas cálidos, la temperatura incrementa la solubilidad de las sales y posteriormente su reacción con los productos de hidratación del cemento. Adicionalmente, estas reacciones se ven sujetas a una mayor velocidad de reabastecimiento del sulfato que se pierde en la reacción con el cemento.

La Tabla IV del ACI expresa una importante experiencia.

Exposición a los Sulfatos	Suelos con aguas sulfatadas (% peso)	Contenido de sulfato en el agua (PPM)	Tipo de cemento	Concreto con agregado normal (Relación agua-cemento máximo por peso)
Insignificante	0.00 – 0.10	0 – 150	----	----
Moderada	0.10 – 0.20	150 – 1500	II (IP) (MS) IS, (MS)	0.50
Severa	0.20 – 2.00	1500 – 10,000	V	0.45
Muy severa	Sobre 2.00	Sobre 10,000	V mas puzolana +	0.45

2.6.4 Ataque por Acido

Los ácidos atacan las bases y las sales básicas formadas por la hidratación del cemento, deteriorándolo por la formación de sales solubles y procesos de disolución que eliminan el hidróxido de sodio. Los parámetros que gobiernan el ataque estrictamente ácido son la fuerza del álcali y su concentración, es decir el valor del pH.

El concreto de cemento portland no resiste bien los ácidos. Sin embargo, la velocidad con que éstos destruyen el concreto depende de:

- La resistencia a los ácidos y su concentración.
- La temperatura de la solución de ácido.
- Las condiciones de exposición: soluciones ácidas estáticas o móviles.
- La solubilidad de productos reactivos.

Los ácidos sulfúricos, hidroclorehídricos y nítricos son fuertes y altamente agresivos. La agresividad se incrementa al aumentar la concentración y la temperatura del ácido. Las soluciones móviles son más agresivas que las estáticas, debido a que constantemente nuevo ácido llega a estar en contacto con el concreto. Y los ácidos que forman productos solubles reactivos, generalmente son más agresivos que los ácidos que forman productos insolubles de reacción.¹

El ácido ataca al concreto disolviendo los productos de hidratación del cemento o a través de reacciones químicas ácido-base. El hidróxido de calcio, el producto de reacción que se disuelve más rápidamente, es atacado aun por las concentraciones leves o bajas de soluciones de ácido. Los ácidos más fuertes y más concentrados atacan a todos los hidratos de silicato de calcio.

Los ácidos orgánicos tienen una actividad menos predecible que la de los ácidos inorgánicos, por ejemplo, el ácido exálico, que forma una sal de calcio casi insolubles no tiene efecto sobre los concretos del cemento portland, mientras que el ácido acético, el cual forma una sal de calcio soluble, es muy perjudicial. El Ácido láctico, que se encuentra en las leches agrias, ataca al concreto y ha causado deterioro de pisos y secadores en las lecherías y plantas de fabricación de mantequilla y queso. El ácido butírico que también es producto de la rancidez puede asociarse con el ácido láctico y se piensa que tiene un efecto perjudicial similar. Contra esta evidencia se ha encontrado que los tanques de concreto de cemento portland tienen una vida razonable cuando se usa para almacenar productos de fermentación conteniendo entre otros, ácidos butírico, láctico y acético.

Puesto que ningún concreto de cemento portland es totalmente inmune al ataque de los ácidos, los aditivos pueden emplearse sólo para disminuir la tasa de deterioro. Los aditivos reductores de agua, incluyendo los súper plastificadores, reducen la relación agua/cemento y, por lo tanto, la permeabilidad. Sin embargo, a medida que el concreto se deteriora, nuevas superficies están expuestas al ácido, especialmente cuando los productos de la reacción son solubles. Los ácidos oxálico y fosfórico forman productos de reacción insolubles que no se pueden quitar fácilmente. En el caso de los concretos expuestos a estos ácidos, al reducir la permeabilidad con aditivos tales como reductores de agua o puzolanas se puede incrementar la vida de servicio.

También se ha utilizado humo de sílice para mejorar la resistencia al ataque de los ácidos, convirtiendo el hidróxido de calcio en CSH, y reduciendo la permeabilidad del concreto. En un estudio, dosis de humo de sílice de hasta 30 por ciento en peso del cemento incrementaron la resistencia del concreto a algunos ácidos. Se remojaron alternativamente cilindros de concreto de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de alto en una solución de ácido durante varios días. Después se secaron durante siete días antes de volver a sumergirse en una solución fresca.⁴ El criterio de falla fue una pérdida de peso de 25 por ciento. Los cilindros hechos con 30 por ciento de humo de sílice y empapados en una solución al 5 por ciento de ácido acético no habían fallado todavía después de 60 ciclos. Y una dosis de 15 por ciento de humo de sílice fue suficiente para lograr que los cilindros soportaran 50 ciclos en una solución de ácido fórmico de 5 por ciento sin fallas.

Sin embargo, inclusive las grandes dosis de humo de sílice no mejoraron marcadamente la resistencia a los ácidos fuertes. Los cilindros que contenían 25 por ciento de humo de sílice fallaron después de solamente cinco ciclos en una solución de ácido sulfúrico de 5 por ciento, y los cilindros con 30 por ciento de humo de sílice soportaron únicamente 32 ciclos en una solución de ácido sulfúrico del 1 por ciento.

2.6.5 Ataque de Agentes Biológicos

Los agentes biológicos que pueden actuar sobre el concreto generando un deterioro de orden químico, son diferentes tipos de microorganismos: bacterias, hongos y líquenes, estos últimos en cuanto forman colonias de tamaño microscópico. El desarreglo que generan es superficial y sólo se produce en concretos carbonatados, húmedos, cuya superficie se encuentra sucia o ha acumulado materia orgánica que sustente su crecimiento, el ataque no es directo sino por la acción química del metabolismo.

Los microorganismos no pueden existir dentro del concreto, por constituir un ambiente hostil, no sólo carente de nutrientes orgánicos sino con un valor de pH alto que impide su vida. Se han comprobado también deterioros en los concretos en obras marítimas y en zonas costeras, especialmente en climas cálidos por la acción de moluscos marinos que llegan a perforar el material con una acción combinada química y mecánica.

2.6.6 Ataque de Productos Industriales

Dentro de los ataques por productos industriales tenemos a los azúcares, estos se encuentran en variedad de vegetales que constituyen insumos industriales. Los azúcares atacan el concreto formando sales de calcio denominadas sacaratos, con el hidróxido de calcio de la pasta, originando la ruptura de la fase de silicatos y la pérdida de resistencias.

Las grasas y aceites tanto animales como vegetales, son dañinos cuando están compuestos de glicerinas y un ácido graso. Esto abarca el cebo y la manteca, el aceite de palma y otros aceites vegetales. Los aceites de petróleo no reaccionan químicamente con el concreto. El número de sustancias químicas industriales es muy amplio. El ACI ha efectuado un estado comentado de más de 200 sustancias químicas que se encuentran en la industria en la publicación "*A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete*".

2.7 Métodos de Protección y Control contra la Corrosión

Los métodos de protección y control de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). Diversos métodos se han utilizado para proteger al concreto de la corrosión comenzando por la calidad de los constituyentes de la mezcla (controlando las propiedades físico-químicas). Indirectamente, se puede minimizar la corrosión con pinturas, revestimientos del acero y recubrimientos sobre el concreto, con protección catódica, agregando inhibidores de corrosión, removiendo los iones cloruros y realcalinizando el concreto. Estos dos últimos métodos se encuentran en periodo de investigación.

Protección Catódica. Este es el único sistema de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la armadura se comporte como cátodo, por lo que se ha demostrado su gran utilidad en estructuras de concreto reforzado existentes, aun cuando en los últimos años se ha estado aplicando en estructuras nuevas. En la práctica, en general por razones técnicas y económicas, no se llega a detener la corrosión sino a alcanzar una disminución que garantice el tiempo de servicio. Actualmente existen normas europeas y norteamericanas que dan instrucciones sobre la aplicación de este sistema de control de corrosión en hormigón armado. En todo caso, es imprescindible que todo el acero de refuerzo tenga buena continuidad eléctrica para que la protección catódica sea efectiva. La protección catódica en concreto reforzado es una aplicación relativamente nueva de una vieja tecnología.

La protección catódica se puede aplicar por ánodos de sacrificio (**FIG. 8**) o por corriente impresa (**FIG. 9**), siendo este ultimo el sistema más usado a nivel mundial. La protección por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como el ánodo. Resultados de laboratorio y escala piloto en campo han demostrado efectividad en el uso de ánodos de aluminio y cinc. Este último ha sido aplicado en diferentes pilotes en campo con resultados satisfactorios. También se ha usado para protección de tuberías de hormigón reforzado y pretensado, en suelo de baja resistividad.

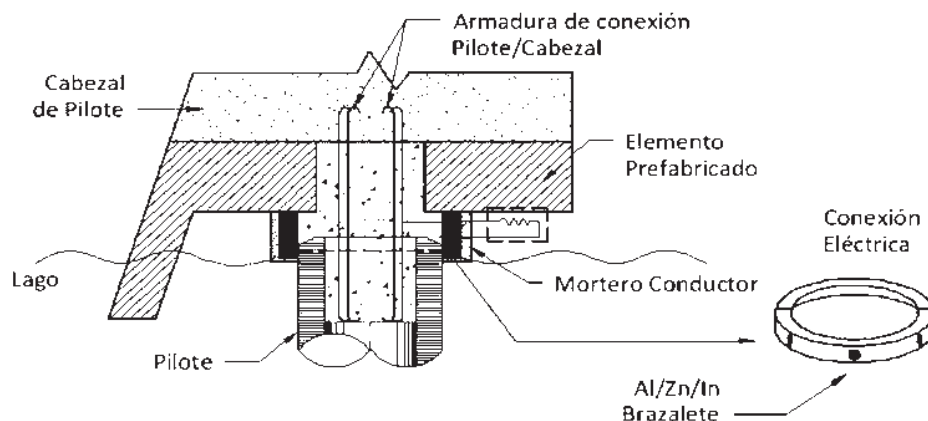


Figura 8. Protección catódica por ánodos de sacrificio de la armadura que une un pilote con su cabezal. Note el brazalete de ánodos de Al/Zn/In embebido en el concreto.

En el caso de corriente impresa en el ánodo podría ser cualquier material, ya que se utiliza una fuente de energía de corriente continua para inducir corriente que entra en la estructura a proteger, haciéndola cátodo. Sin embargo, en el caso de la protección del acero en concreto en estructuras aéreas, es necesario el uso de materiales (que van a actuar como ánodos) que no produzcan deterioro del concreto, por lo cual deberían ser inertes o con muy bajas velocidades de oxidación.

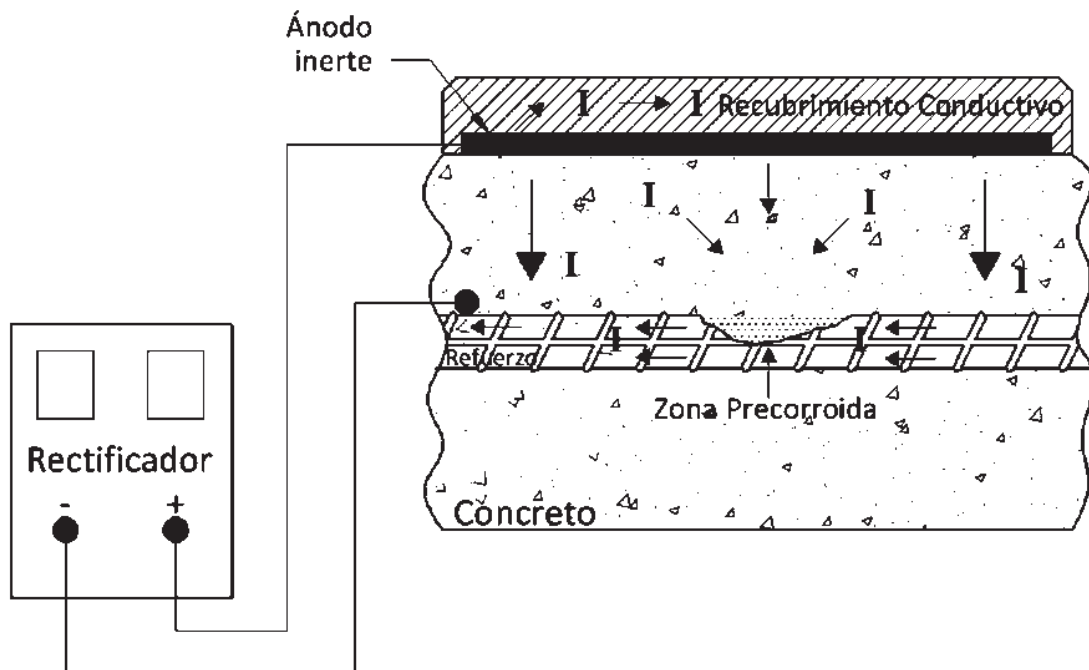


Figura 9. Protección catódica por corriente impresa.

PROTECCIÓN INDIRECTA A TRAVÉS DEL CONCRETO.

Morteros de Reparación.

Son materiales constituidos por una mezcla de agregado fino seleccionado y un aglomerante cementante que puede ser de base cemento Portland u orgánica (acrílicos, epóxicos, poliuretanos u otro polímero orgánico). A estos morteros se les puede agregar algunos aditivos (microsílica, ceniza volante, fibra sintética, escoria de alto horno, etc.).

En general, los materiales basados en resinas se prefieren cuando las secciones a reparar son delgadas y en el caso de reparaciones grandes es preferible utilizar materiales en base cemento Portland. Sin embargo, al ser utilizados en concreto contaminado con iones cloruro, esta reparación puede agravar el problema creando celdas locales de corrosión. Esto es si se utiliza material polimérico aislante se crearía una celda diferencial de oxígeno, donde el acero por debajo de la reparación, actuaría como ánodo, ya que es la zona donde no llegaría oxígeno. Si se repara con morteros cementicios, se restablecería la película pasiva en el

acero debajo de la reparación, el cual actuaría como cátodo, siendo entonces el acero que esta alrededor de la reparación el que actué como ánodo (activo), acelerándose su corrosión por la formación de una celda galvánica. En cualquier caso se debe remover todo el concreto contaminado antes de reparar.

Revestimientos.

Estos al igual que los anteriores, son aplicados sobre el concreto y actúan principalmente como barrera física. Entre ellos se pueden incluir:

Revestimientos Hidrófugos: Son materiales a base de silicona que no solo repelen la humedad y resisten el desgaste, sino que permiten al sustrato de concreto respirar naturalmente. Al aplicarse sobre la superficie la penetran impregnándose en ella.

Membranas Orgánicas Prefabricadas: Son usadas para colocarse sobre la superficie de concreto de manera temporal o permanente.

Polímeros Impregnados sobre el Concreto: Son aplicados como una mezcla reaccionante (monómero + catalizador) sobre una superficie de concreto previamente deshidratada, la cual penetran considerablemente (aproximadamente 1 a 3 cm), polimerizando luego y sellando los poros.

Otros Revestimientos: Son aplicados sobre el concreto en forma líquida, formando una película protectora. Han sido eficaces para retardar/evitar la carbonatación del hormigón y a la vez son responsables de presentar la buena apariencia necesaria de las edificaciones de hormigón. Entre los más importantes están los epóxicos, acrílicos y poliuretanos. Es bueno destacar que los productos emulsionados con agua comúnmente llamados látex, a base de acrílicos y muy usados a nivel domestico, no son eficaces. Se utilizan distintos tipos, siendo los más efectivos barnices para concreto arquitectónico, como los acrílicos y poliuretanos alifáticos. Para protección con pinturas convencionales, está extendido el uso de vinílicos, epóxicos y poliuretanos, entre otros.

c. Extracción de los iones cloruro del concreto.

Está en una técnica electroquímica, actualmente en desarrollo, donde se aplican un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ion cloruro para ser atraído por un ánodo colocado externo a la superficie de la estructura tratada. En la protección catódica propiamente este efecto se lograría también, pero a largo plazo. La remoción de la mayor parte del cloruro libre y la producción de OH^- permite restablecer la pasivación de la armadura.

d. Realcalinización.

Como el anterior, este es un proceso que todavía se encuentra en desarrollo. Es un tratamiento temporal que incrementa el pH de la solución acuosa en los poros del hormigón, debido a la penetración de un electrolito alcalino desde la superficie exterior. Este proceso repasa la armadura debido a las reacciones electroquímicas que ocurrirían en su superficie. Esta técnica puede ser utilizada para el caso de concretos carbonatados.

El principio de la realcalinización electroquímica se muestra en la **FIGURA 10**. La técnica involucra el paso de una corriente, a través del concreto, hacia la armadura, por medio de un ánodo colocado externamente sobre la superficie de concreto. Al igual que en la protección catódica se utiliza una fuente de energía de corriente continua, lográndose realcalinizar el hormigón mediante varios mecanismos, siendo los más importantes: la electrolisis en los electrodos (alrededor de la armadura cátodo), se generan iones OH^- (por electrolisis del agua y reducción del O_2 difundido en el concreto) y electroósmosis, movimiento del electrolito en el concreto hacia el cátodo. Los hidróxidos de sodio y de calcio son generalmente utilizados como electrolitos cubriendo el concreto y, al penetrar en los poros del mismo, prevendrían futuros decrecimientos del pH, atrapando el CO_2 que pudiese ingresar desde el exterior.

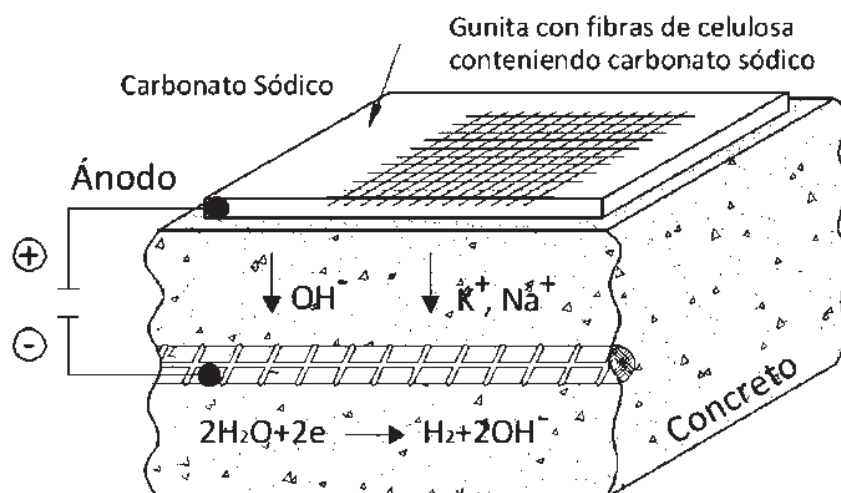


Figura 10. Principio de realcalinización electroquímica.

e. Inhibidores de Corrosión. El inhibidor de corrosión es una sustancia que se agrega a la mezcla de concreto para proteger la armadura contra el ataque corrosivo, aunque puede ir en detrimento de las propiedades del concreto. Este método podría ser la mejor solución en aquellos casos donde el concreto se prepara con aguas salobres o marinas, o con arena con alto contenido de cloruros (prácticas no recomendadas). También, en aquellos casos donde se ejecutan construcciones/reparaciones y en zonas de salpique en ambientes marinos.

Uno de los primeros inhibidores de corrosión utilizados en campo ha sido el nítrico de calcio, pero su efectividad depende de la concentración de iones cloruro en el concreto y de la calidad del mismo. Ha sido utilizado como un aditivo del concreto y más recientemente por impregnación en hormigón endurecido. Últimamente se ha estado comercializando con otros inhibidores, pero no se tienen resultados de estudios a largo plazo.

A nivel de laboratorio se han estudiado otros inhibidores como el ZnO con resultados satisfactorios, sin embargo su evaluación en campo es muy reciente.

2.7.1 Recubrimientos

En la actualidad existen una gran diversidad de recubrimientos cuya formulación o composición obedecen a la resolución de un problema en específico, mencionar cada uno de estos recubrimientos existentes sería difícil e impráctico para los fines de esta tesis por lo cual se clasificaran y resumirán de la siguiente forma:

A) Por el tipo de función que va a desempeñar el recubrimiento una vez aplicado.

A.1) Recubrimientos anticorrosivos. Su finalidad es proteger un sustrato de un medio corrosivo por aislamiento. Estos recubrimientos con fines de formulación, requieren del uso de resinas y pigmentos altamente resistentes que permitan una alta eficiencia de protección contra los agentes de la corrosión.

A.2) Pinturas arquitectónicas. Se utilizan esencialmente con fines decorativos para embellecer y proteger superficies interiores y exteriores, pisos, azoteas, albercas, etc. Las materias primas utilizadas en este tipo de recubrimiento son de menos resistencia, pero permiten obtener una gran diversidad de colores, tonos y efectos especiales.

B) Por el procedimiento que requiere el recubrimiento para alcanzar sus propiedades o características de operación o comportamiento.

B.1) Recubrimientos de secado al aire, un solo componente. La primera etapa de este proceso, considera una eliminación de solventes por evaporación a temperatura ambiente y posteriormente por una interacción con el aire, las moléculas de la resina o agente aglutinante se unen o polimerizan en forma entrelazada dando lugar a películas relativamente continuas de resina-pigmento. Los recubrimientos alquidáticos, vinílicos y acrílicos son ejemplos de este tipo.

B.2) Recubrimientos de secado al aire, dos componentes. Nuevamente la primera etapa es una eliminación de solventes a temperatura ambiente desarrollándose simultáneamente una reacción de enlazamiento tridimensional entre las resinas de cada uno de los componentes, una de las cuales se denomina comúnmente catalizador.

El tiempo requerido para que se lleve a cabo esta reacción de “curado” o polimerización es del orden de 3 a 7 días, el cual es muy superior a la etapa de eliminación de solventes, por lo tanto el recubrimiento no debe ponerse en operación en medios corrosivos fuertes o inmersos antes de este tiempo. Los recubrimientos epóxicos y de poliuretano secan y curan de esta forma.

B.3) Recubrimientos de curado a alta temperatura. La primera etapa considera la eliminación de solventes a temperatura ambiente, posteriormente y ante la incapacidad de la resina para reaccionar con el aire a bajas temperaturas, es necesario exponer el recubrimiento a temperaturas arriba de 100 °C, lográndose en esa forma el entrelazamiento o curado requerido para alcanzar las características de operación o protección. Dentro de este procedimiento de curado trabaja a temperatura ambiente, y los recubrimientos resistentes a

altas temperaturas utilizados en la protección de instalaciones que operan a temperaturas muy superiores a la ambiente.

C) Por el tipo de resina usada en la fabricación de los mismos.

Dado que la resistencia del recubrimiento y por lo tanto su eficiencia de protección contra la corrosión dependen esencialmente de las características y propiedades de los componentes de la película seca, representados por la resina y el pigmento, con frecuencia se asocia o establece un cierto grado de calidad o eficiencia de protección con el tipo de resina utilizada.

Basados en esta clasificación, los principales tipos de recubrimientos, hasta ahora considerados dentro de la industria como la mejor solución para problemas de corrosión son:

C.1) Recubrimientos alquidáticos. Son recubrimientos económicos y sobrepasan a los demás de tipos de recubrimientos en cuanto a versatilidad para conservación o mantenimiento industrial en condiciones de exposición normales ya que su durabilidad es buena en exposiciones de intemperismo normal. Estos recubrimientos tienen buena retención de brillo, buena resistencia a medio ambiente seco sin salinidad o gases corrosivos. Secan por evaporación de solventes e interacción con el aire.

Sus limitaciones están representadas por su baja resistencia a solventes fuertes como: aromáticos, cetonas, éteres, alcoholes, esteres y disolventes clorados, aun cuando presentan regular resistencia a los disolventes alifáticos.

Los recubrimientos no son recomendables para inmersión continua, su resistencia química es pobre y especialmente mala en condiciones alcalinas. No se recomienda para exposiciones superiores a 60 °C.

C.2) Recubrimientos vinílicos. Son recubrimientos no tóxicos y muy durables, superan a los recubrimientos alquidáticos en conservación del brillo y duración. Son muy resistentes a la abrasión y resisten la inmersión continua en agua dulce o salada, resisten soluciones diluidas de la mayor parte de los ácidos orgánicos e inorgánicos, incluyendo el ácido clorhídrico, ácido nítrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido cítrico, etc. No son afectados por derivados del petróleo tales como gasolina, diesel, petróleo crudo entre otros.

Los recubrimientos vinílicos proporcionan una superficie que va desde mate (sin brillo) hasta semibrillante, con una alta resistencia a la intemperie aun en condiciones altamente húmedas y corrosivas. Como su resistencia al agua es excelente puede usarse para servicio de inmersión continua en agua.

Entre sus limitaciones principales se encuentran su baja resistencia a disolventes tipo éter y cetona, a la inmersión prolongada en alcoholes, esteres, hidrocarburos clorados y disolventes con más del 30% de aromáticos. Con el tiempo los recubrimientos son afectados por los rayos del sol, presentando un caleo superficial. Seca por evaporación de solventes y no se recomienda para exposiciones superiores a 65 °C.

C.3) Recubrimientos epóxicos. En términos generales el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia a los métodos corrosivos de los recubrimientos epóxicos no ha sido superado por ningún otro tipo de recubrimientos actuales. Puede aplicarse sobre superficies de concreto, metálicas, galvanizadas o inorgánicas de zinc; presenta una excepcional resistencia a medios alcalinos y buena resistencia a los

medios ácidos; soporta salpicaduras, escurrimientos e inmersiones continuas de la mayoría de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, etc.

Presentan un alto grado de impermeabilidad permaneciendo inalterable ante la exposición e inmersión de agua dulce, salada y vapor de agua. Estas características no las adquiere por sí solo, requiere de un agente de polimerización o entrecruzamiento denominado catalizador, el cual usualmente está constituido por una solución de resinas amínicas o poliamídicas.

Su principal limitación considera la formación de un caleo superficial sin menoscabo a sus propiedades de película, así como su alto costo relativo; además a largo plazo tiende a fragilizarse. A corto plazo alcanza a desarrollar una superficie lisa y continua, la cual puede presentar problemas de adherencia durante el repintado o mantenimiento requiriendo un mordentador.

C.4) Recubrimientos epoxi – alquitrán de hulla. Este recubrimiento se ha desarrollado específicamente para resolver problemas de inmersión continua en agua salada por muy largo tiempo y en el cual se combina la alta resistencia y características de un recubrimiento epóxico con la alta impermeabilidad del alquitrán de hulla; no obstante, su resistencia a los solventes es afectada, por lo que no se recomienda una inmersión continua a los mismos; además por influencia del alquitrán de hulla, el recubrimiento tiende a cuartearse ya calearse, cuando se expone por largo tiempo a la acción de los rayos del sol.

C.5) Recubrimientos acrílicos. Estos recubrimientos secan por simple evaporación de solventes. Poseen una muy buena retención del brillo y resistencia al caleo, no se recomiendan para exposiciones en atmosferas industriales donde se presenten salpicaduras y derrames de componentes industriales como ácidos, álcalis, agentes oxidantes y solventes.

No se recomiendan para inmersión en agua, su resistencia a la abrasión es buena al igual que su dureza, su estabilidad al calor es limitada. Estos recubrimientos pueden usarse sin problema en ambientes húmedos y lluviosos.

C.6) Recubrimientos fenólicos. Son recubrimientos duros, brillantes y muy adherentes; en términos generales su resistencia a los solventes, medios ácidos y alcalinos va de buena a excelente por lo que se recomiendan para inmersión continua. Su eficiencia de protección contra la corrosión es superior a la de los epóxicos. Si el recubrimiento fenólico es horneado, su resistencia al agua y a los solventes se incrementa considerablemente.

Este tipo de recubrimientos se recomienda para estar en contacto con medios ácidos a bajas concentraciones y con medios básicos hasta muy altas concentraciones. Su estabilidad al calor, dureza y resistencia a la abrasión son excelentes

C.7) Recubrimientos de silicón. Este tipo de recubrimientos es muy especial y su utilización está reservada para aplicaciones donde se requiere una estabilidad térmica hasta de 500 °C, la película de recubrimiento resultante es muy resistente a la intemperie y a atmosferas contaminadas. Con respecto al curado de este tipo de materiales, las resinas de silicón curan en un mínimo de 60 minutos a 250 °C para alcanzar sus propiedades óptimas.

C.8) Recubrimientos antivegetativos. Es un recubrimiento desarrollado para prevenir el crecimiento de organismos marinos en superficies sumergidas por largos periodos. En su formulación se incluyen resinas vinílicas, brea y óxido cuproso o tóxicos orgánicos metálicos que permiten esta acción de inhibición. Estos recubrimientos requieren de una formulación muy cuidadosa a fin de que el toxico abandone el recubrimiento paulatinamente y en cantidad suficiente para inhibir el crecimiento de organismos marinos.

El empleo de este tipo de recubrimientos es muy delicado y deberán tomarse grandes medidas de seguridad en el momento de su aplicación a fin de evitar problemas de envenenamiento.

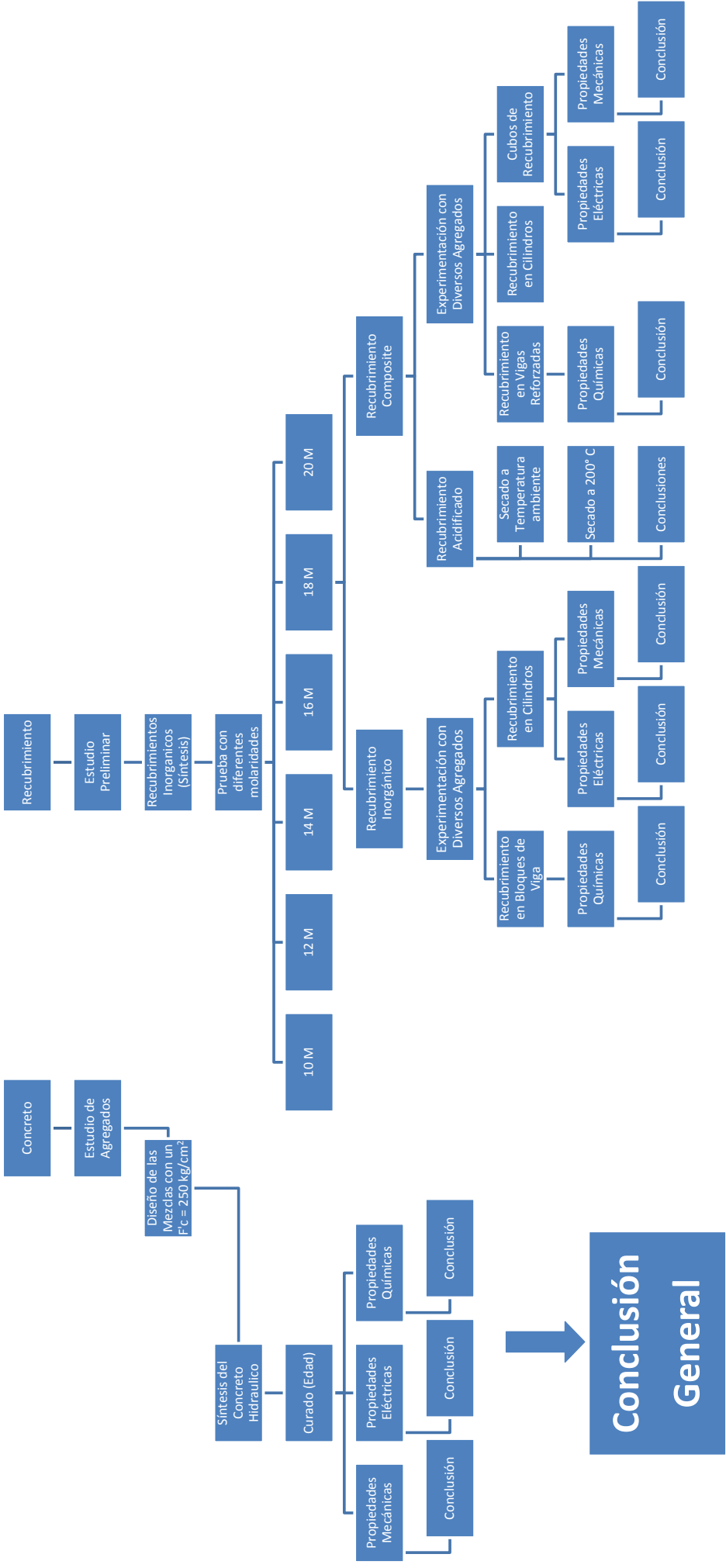
C.9) Recubrimientos de zinc 100% orgánicos. En cierta forma este recubrimiento es un “galvanizado en frío”, en el cual la película es formada por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de zinc y una solución acuosa de silicato orgánico o inorgánico; la eliminación de agua y solventes e interacción de los componentes antes mencionados permite obtener una película de silicato de zinc con inclusiones de zinc en polvo, por lo que finalmente su naturaleza es inorgánica.

El mecanismo de protección de este recubrimiento difiere del correspondiente a los recubrimientos mencionados anteriormente; en lugar de presentar una barrera impermeable al medio corrosivo, se antepone a este una película de zinc con alta conductividad eléctrica capaz de sacrificarse anódicamente para proteger el acero, es decir lo protege a partir del principio de la protección catódica. Dado que el espesor recomendado de la película y por lo tanto la cantidad de material disponible para el sacrificio es muy pequeña (2 a 3 milésimas de pulgada) es necesario recubrirlo posteriormente con un acabado de tipo epóxico o vinil-epóxico a fin de que la película de inorgánico de zinc o protección catódica solo actúe en presencia de discontinuidades, grietas o raspaduras.

Es un material muy resistente a la abrasión, poco flexible y muy adherente. No se recomienda para inmersiones en ácidos álcalis; resiste todos los solventes.

3. Diseño Experimental

3. DISEÑO EXPERIMENTAL



4. Síntesis del Concreto

4. SÍNTESIS DEL CONCRETO

Para este proyecto de tesis se propuso trabajar con un concreto de resistencia $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, el cual se diseñó siguiendo las normas establecidas y siguiendo los procedimientos descritos en el manual de Análisis de Materiales, que publica la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. A continuación se describe y anexan los resultados que se obtuvieron a lo largo del proceso de la síntesis del concreto.

4.1 Estudio de Agregados

Los agregados pétreos, fino como grueso que se utilizaron para la elaboración de nuestro concreto son originarios del Banco de Joyitas ubicado en Morelia Michoacán. Los análisis a los que fueron sometidas dicha grava y arena son los siguientes:

ARENA	ANÁLISIS	GRAVA	ANÁLISIS
	• Cuarteo de arena.		• Cuarteo de gravas.
	• Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.		• Humedad de absorción en gravas.
	• Determinación del peso volumétrico seco y suelto de una arena (PVSS).		• Densidad en gravas.
	• Determinación del peso volumétrico seco y varillado de una arena (PVSU).		• Peso volumétrico seco y suelto en gravas (PVSS).
	• Granulometría o análisis granulométrico en arena.		• Peso volumétrico seco y varillado en gravas (PVSU)
	• Densidad de la arena.		• Granulometría en gravas.

4.1.1 Cuarteo de Arena

Objetivo: Obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado, para la prueba de que se trate, de la muestra obtenida en el campo.

Equipo:

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Brochas o cepillos de pelo.
- Bascula
- Divisor de muestras

Procedimiento para divisor de muestras:

1. Se toma la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vacía sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.

2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.



Cuarteo de arena usando un divisor de muestras.

4.1.2 Humedad Superficial y Humedad de Absorción en Arenas.

Objetivo: Determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

Equipo:

- Muestra representativa, aproximadamente 2 kilogramos.
- Balanza.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Cono metálico.
- Pisón
- Espátula.

Procedimiento:

1. Se satura durante 24 hrs. La muestra representativa.
2. Al término de ese tiempo se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico.
3. Cuando la arena está seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando este peso como peso saturado y superficialmente seco (Ph).
4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Una vez completamente seco el material, se procede a pesarlo y registrar el peso como peso seco del material (Ps).

Cálculos:

$$\% \text{ DE HUMEDAD DE ABSORCIÓN} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

D a t o	1	2
PESO HUMEDO (Ph)	367.8	290
PESO SECO (Ps)	353.9	280.3
AGUA ABSORBIDA (Ph-Ps)	13.9	9.7
ABSORCION [(Ph-Ps)/Ps]*100	3.928	3.461
P R O M E D I O =	3.694	

**Pesos se encuentran dados en gramos*

% DE HUMEDAD DE ABSORCIÓN = 3.694



Saturado del agregado y uso del cono metálico.

4.1.3 Determinación del Peso Volumétrico Seco y Suelto de una Arena (PVSS).

Objetivo: Determinar el peso por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

Equipo:

- Una muestra de arena completamente seca.
- Recipiente de volumen y peso conocido.
- Varilla lisa punta de bala (5/8 de diámetro).
- Bascula.
- Cucharón y pala.

Procedimiento:

Se vacía la arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 cm, llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla como se observa en las fotografías y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo. Al peso obtenido anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener el peso de la arena.

Cálculos:

$$PVSS = \frac{P}{V}$$

Donde:

- Peso de la arena (P)
- Volumen del recipiente (V)
- Peso Volumétrico Seco y Suelto (PVSS)
-

DATOS	1	2
PESO BRUTO	5256	5281
TARA	1823	1823
PESO NETO (Pn)	3433	3458
VOLUMEN (V)	2782	2782
PESO VOLUMETRICO Pn/V	1.234	1.243
PROMEDIO =	1.238	

**Pesos dados en gramos.*

Peso Volumétrico Seco y Suelto (PVSS) = 1.238

*Peso y enrasado del agregado.*

4.1.4 Determinación del Peso Volumétrico Seco y Varillado de una Arena (PVSV)

Objetivo: Obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Equipo:

- Muestra de arena completamente seca.
- Recipiente de peso y volumen conocido.
- Varilla punta de bala (5/8 de diámetro)
- Báscula.
- Cucharón y pala

Procedimiento:

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 cm, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.

Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores. Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener el peso neto del material.

Cálculos:

$$PVSS = \frac{P}{V}$$

Donde:

- Peso de la arena (P)
- Volumen del recipiente (V)
- Peso Volumétrico Seco y Suelto (PVSS)

DATOS	1	2
PESO BRUTO	5320	5391
TARA	1823	1823
PESO NETO (Pn)	3497	3568
VOLUMEN (V)	2782	2782
PESO VOLUMETRICO Pn/V	1.257	1.283
PROMEDIO =	1.27	

**Pesos dados en gramos.*

Peso Volumétrico Seco y Suelto (PVSS) = 1.27



Compactación del agregado por medio del varillado.

4.1.5 Análisis Granulométrico en Arena.

Objetivo: Pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el modulo de finura.

Equipo:

- Juego de mallas (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100) y charola con su respectiva tapa.
- Balanza.
- Charolas, espátulas y parrilla.
- Cepillos.
- Hojas de Papel.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena.
2. Se seca la muestra hasta un peso constante (Temperatura < 110° C).
3. Se coloca la muestra dentro de las mallas ya ordenadas en orden decreciente y se comienza a agitar el juego de mallas durante 10 minutos como mínimo.
4. Se separan las mallas y sobre las hojas de papel se coloca el material retenido en cada una de dichas mallas, se utiliza el cepillo para desalojar el material que se queda atrapado en las mallas.
5. Se procede a pesar cada uno de los materiales retenidos para posteriormente ser anotados en el registro.



Peso, agitación y distribución de la arena para la realización del análisis granulométrico.

Cálculo:

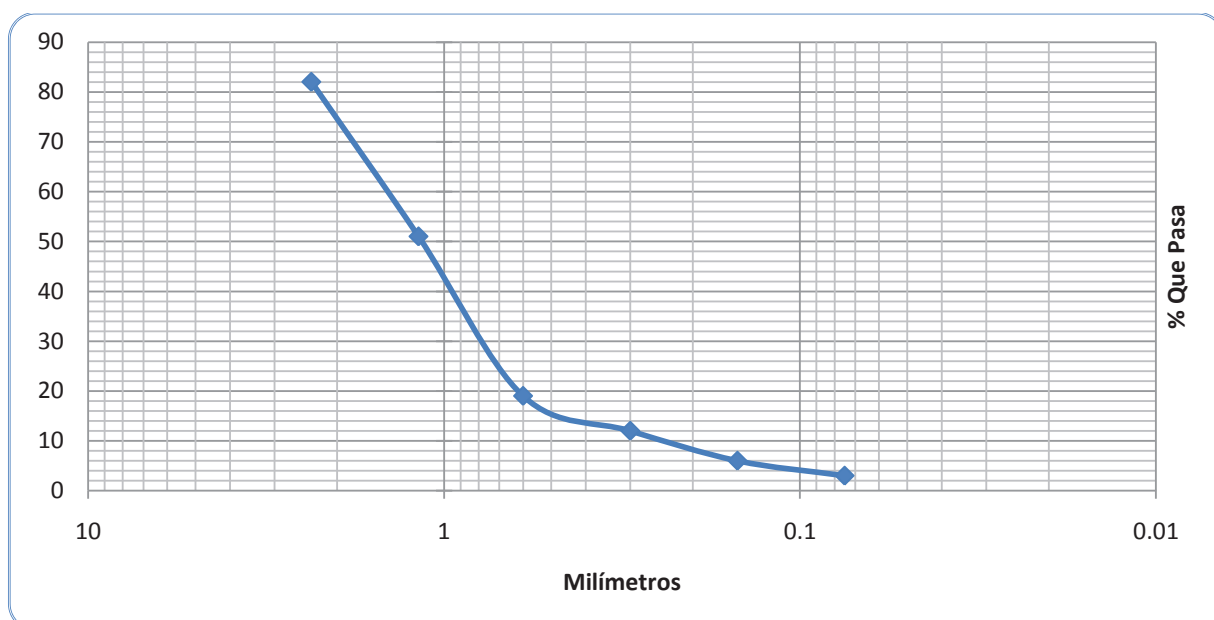
$$\text{Módulo de Finura (MF)} = \frac{\text{Suma del \% acumulativo de todas las mallas sin incluir la charola}}{100}$$

Registro:

Con la finalidad de obtener mejores resultados se realizaron 2 análisis distintos para dicha arena.

Análisis No. 1 - Peso inicial de la muestra 300 gr.

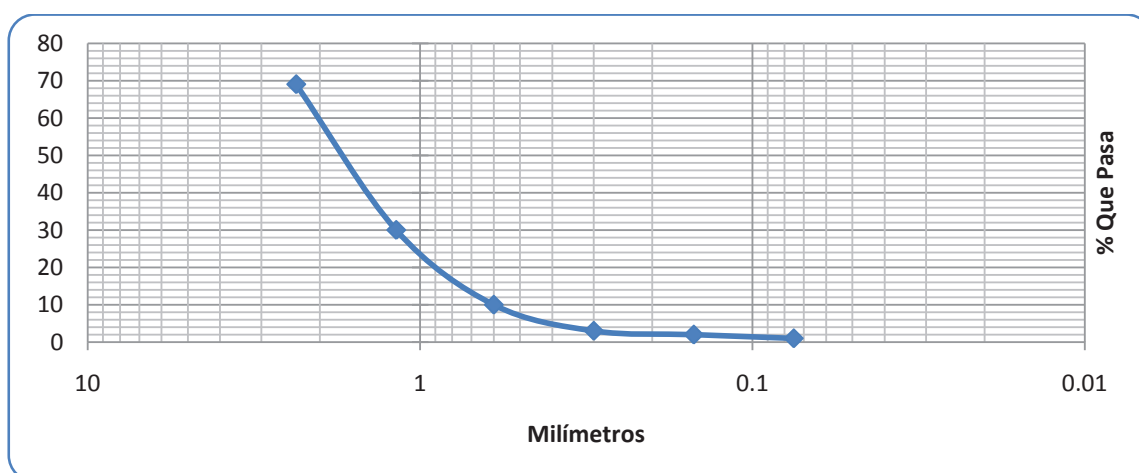
MALLA	PESO RETENIDO PARCIAL GRS	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
8	54.9	18.37	18	82
16	92.7	31.01	49	51
30	93.3	31.21	81	19
50	22.8	7.63	88	12
100	16.7	5.59	94	6
200	8.7	2.91	97	3
CHAROLA	9.8	3.28	100	0
SUMA	298.9	100		
			MF	3.30

Gráfico

Curva Granulométrica Análisis No. 1

Análisis No. 2 - Peso inicial de la muestra 300 gr.

MALLA	PESO RETENIDO PARCIAL GRS	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
8	91.4	30.69	31	69
16	115.9	38.92	70	30
30	61.9	20.79	90	10
50	18.4	6.18	97	3
100	4.7	1.58	98	2
200	2.3	0.77	99	1
CHAROLA	3.2	1.07	100	0
SUMA	297.8	100		
			MF	3.85

Gráfico

Curva Granulométrica Análisis No. 2

4.1.6 Densidad de la Arena.

Objetivo: Obtener el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman éntrelas partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Equipo:

- Muestra representativa de arena.
- Pisón.
- Charolas.
- Probeta.
- Espátulas.
- Frasco.
- Parrilla.
- Balanza.
- Molde tronco cónico.
- Vidrio.

Procedimiento:

1. Se satura la arena en una charola durante 24 hrs. Al término de ese tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde troncocónico.
2. En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como el volumen inicial (**Vi**) en cm³.
3. Se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (**Pa**) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.
4. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y se registrara este valor como el volumen final (**Vf**).

Cálculos:

$$\text{Densidad de la Arena (DA)} = \frac{Pa}{Vf - Vi}$$

Donde:

- Peso de la arena saturada y superficialmente seca (Pa)
- Volumen inicial (Vi)
- Volumen final (Vf)
- Densidad de la arena (DA)

DATOS	1	2
VOLUMEN DESALOGADO (V).	132.0	120.0
PESO HUMEDO (Pw)	291.0	259.0
DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Pw/V).	2.20	2.16
PROMEDIO =	2.181	

*Pesos dados en gramos.

Densidad de la arena (DA) = 2.181*Densidad en arenas.*

4.1.7 Cuarteo de Gravas.

Objetivo: Este procedimiento nos sirve para obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado para realizar la prueba correspondiente al material en estudio.

Equipo:

- Palas.
- Charolas.
- Escoba.
- Cepillo.

Procedimiento:

Se vacía la muestra de material en uno de los extremos de la charola grande. Se cambia el material al extremo opuesto usando las palas, tratando de revolver todo el material. Este procedimiento se repite 3 veces, una vez terminado el paso anterior el material apilado en forma cónica se aplana la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes.



Cuarteo de grava y arena con pala.

4.1.8 Humedad de Absorción en Gravas.

Objetivo: Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Equipo:

- Muestra de grava.
- Franela.
- Charolas Metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas (3/4" y 3/8").
- Balanza.

Procedimiento:

1. De la muestra que se trae de campo se criba a través de las mallas 3/4 y 3/8 y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola una muestra de 0.5 a 1 kg durante 24 horas.
2. Se seca la muestra superficialmente con una franela, se pesan 300 gramos anotando este valor como peso saturado y superficialmente seco (**Ph**).
3. Se coloca el material en una charola para secarlo completamente, una vez hecho esto se pesa y se registra este peso como peso seco del material (**Ps**).

Cálculos:

$$\% H. ABSORCIÓN = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

- Peso saturado y superficialmente seco de la grava (**Ph**)
- Peso seco de la grava (**Ps**)
- Porcentaje de Humedad de Absorción

DATOS	1	2
PESO HUMEDO (Ph)	300	300.3
PESO SECO (Ps)	284.5	283.8
AGUA ABSORBIDA (Ph-Ps)	15.5	16.5
ABSORCION [(Ph-Ps)/Ps]*100	5.448	5.814
PROMEDIO =	5.631	

**Pesos dados en gramos.*

Porcentaje de Humedad de Absorción = 5.631



Saturado y secado de la grava.

4.1.9 Densidad en Gravas.

Objetivo: Determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en peso por unidad de volumen.

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Probeta graduada.
- Picnómetro.
- Franela.
- Charola.

Procedimiento:

1. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 hrs, secándola superficialmente con una franela, este peso se registra como el peso de la muestra (**P**).

2. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. 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 la partícula de grava.

Cálculos:

$$D = \frac{P}{V}$$

Donde:

- Peso de la grava (P)
- Volumen de la grava (V)
- Densidad (D)

DATOS	1	2
VOLUMEN DESALOGADO (V).	136.0	134.0
PESO HUMEDO (Pw) GR.	300.0	300.0
DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Pw/V).	2.21	2.24
PROMEDIO =	2.222	

**Pesos dados en gramos.*

Densidad = 2.222

*Densidad en gravas.*

4.1.10 Peso Volumétrico Seco y Suelto en Gravas (PVSS).

Objetivo: Determinar el peso por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Equipo:

- Muestra representativa de grava (Aprox. 15 kg).
- Recipiente.
- Balanza.
- Cucharon.
- Pala.
- Rastrillo.

Procedimiento:

Se vacía la grava dentro del recipiente del cual debemos determinar el peso y volumen posteriormente se deja caer la grava a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 cm, llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala o con la mano que es mas practico ya que esta enrasado se pesa obteniendo así el peso del recipiente más el peso del material.

Cálculos:

$$PVSS = \frac{\text{Peso de la grava}}{\text{Volumen de la grava}}$$

DATOS	1	2
PESO BRUTO	15687	15407
TARA	2940	2940
PESO NETO (Pn)	12747	12467
VOLUMEN (V)	10605	10605
PESO VOLUMETRICO Pn/V	1.202	1.176
PROMEDIO =	1.189	

**Pesos dados en gramos.*



Enrasado y peso de la grava.

4.1.11 Peso Volumétrico Seco y Varillado en Gravas (PVSV).

Objetivo: Obtener el peso de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

Equipo:

- Muestra de grava.
- Recipiente.
- Balanza.
- Cucharón.
- Pala
- Varilla punta de bala.

Procedimiento:

Se obtiene el peso y el volumen exacto del recipiente que se va utilizar. Enseguida usando con el cucharon se llena el recipiente en tres capas, con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes distribuyéndolos en toda la superficie, al termino se enrasa el recipiente y se pesa, registrando los valores obtenidos.

Cálculos:

$$PVSV = \frac{\text{Peso de la grava}}{\text{Volumen de la grava}}$$

DATOS	1	2
PESO BRUTO	16051	16242
TARA	2940	2940
PESO NETO (Pn)	13111	13302
VOLUMEN (V)	10605	10605
PESO VOLUMETRICO Pn/V	1.236	1.254
P R O M E D I O =	1.245	

**Pesos dados en gramos.*



Varillado del agregado.

4.1.12 Granulometría en Gravas.

Objetivo: Obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava así, como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el cálculo del proporcionamiento.

Equipo:

- Muestra de grava (Aprox. 15 kg).

- Juego de mallas: 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", ¼", y no. 4.
- Juego de charolas.
- Balanza.
- Recipiente de 10 litros.

Procedimiento:

Se seca la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y este peso se registra como peso de la muestra a realizarse el cribado. Enseguida se pasa el material a través de las mallas y una vez depositado el peso en su respectiva charola se procede a registrar los pesos del material que se encuentra en cada charola.



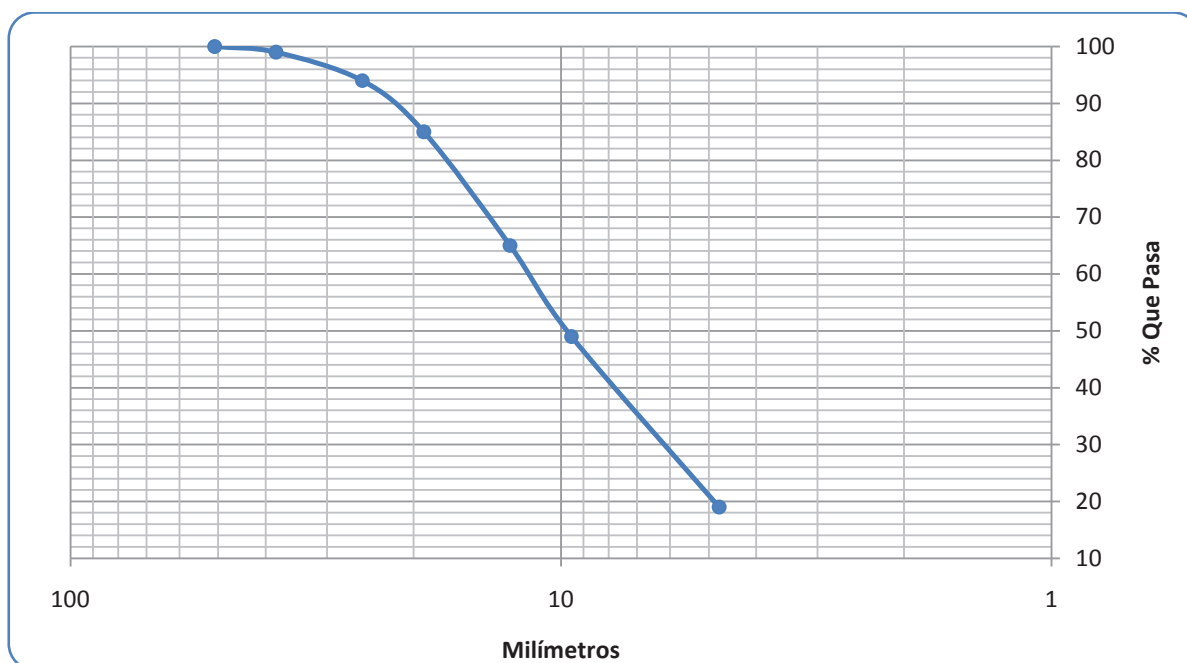
Peso y cribado de la grava.

Cálculos:

Con la finalidad de obtener mejores resultados se realizaron 2 análisis distintos para dicha grava.

Análisis No. 1

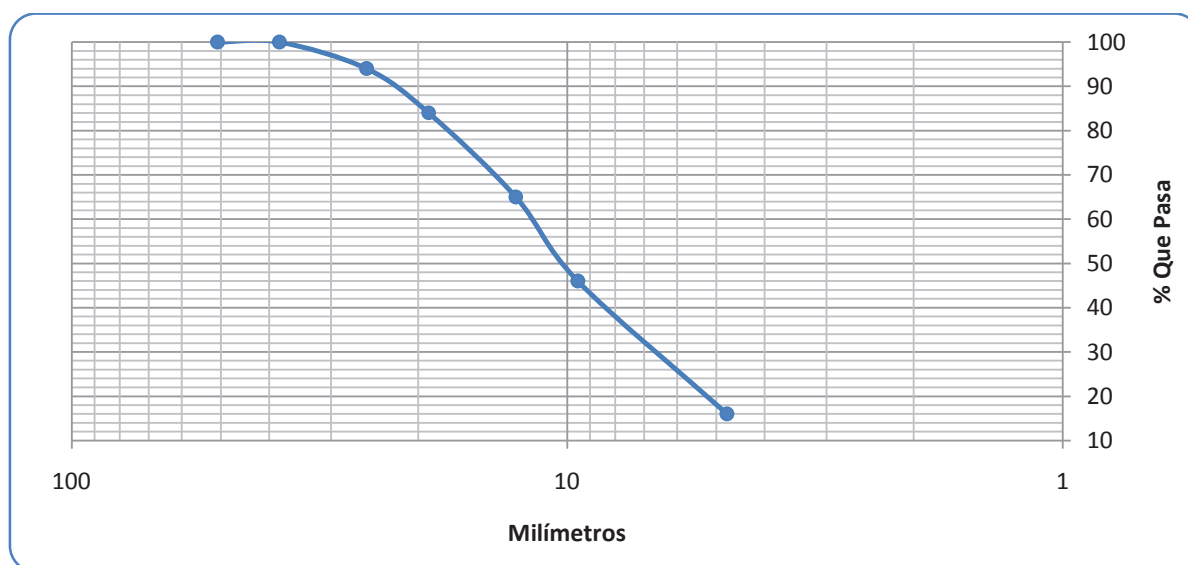
MALLA No.	PESO RETENIDO PARCIAL GRS	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
2"	0.0	0.00	0	100
1 1/2"	178.0	1.47	1	99
1"	555.5	4.60	6	94
3/4"	1108.5	9.17	15	85
1/2"	2339.5	19.36	35	65
3/8"	2010.0	16.63	51	49
No. 4	3630.0	30.03	81	19
PASA No. 4	2265.0	18.74	100	0
SUMA	12086.5	100.00		



Curva Granulométrica Análisis No. 1

Análisis No. 2

MALLA No.	PESO RETENIDO PARCIAL GRS	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
2"	0.0	0.00	0	100
1 1/2"	0.0	0.00	0	100
1"	675.0	5.58	6	94
3/4"	1301.0	10.76	16	84
1/2"	2255.0	18.66	35	65
3/8"	2268.0	18.76	54	46
No. 4	3703.0	30.64	84	16
PASA No. 4	1912.0	15.82	100	0
SUMA	12114.0	100.23		



Curva Granulométrica Análisis No. 2

Tamaño máximo de la grava (T.M.) = 1"

4.2 Proporcionamiento del concreto.

Ya que se han realizado los estudios y las pruebas correspondientes a los agregados pétreos, y que se han obtenido los resultados se procede a hacer el Proporcionamiento del concreto, para esto nos basaremos en el método de las curvas de Abrams. Recordando que se desea un concreto con un $F'c = 200 \text{ kg/cm}^2$.

Datos de Proyecto = $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Estudio de Materiales

MATERIAL	P.V.S.S	P.V.S.V.	DENSIDAD	ABSORCION	M.F.	T. Max
Arena	1238	1270	2.18	3.69	3.2	--
Grava	1189	1245	2.22	5.631	--	1
Cemento	1490	--	3.10	--	--	--

Revenimiento (cm)	Relación A/C	Relación G/A	Agua (kg/m^3)
10	0.5	1.14	189

Determinación de las relaciones A/C y G/A en volumen, utilizando para esto, las densidades de los materiales.

Relación A/C	Relación G/A
1.55	1.119

Determinación del contenido neto de cemento por m^3 de concreto en peso.

Cemento en peso (kg/m^3)	Cemento en volumen (lt/m^3)	Lechada del cemento (lt/m^3)	Volumen de Agregados (lt/m^3)
378	121.935	310.935	689.065

Cantidades por m^3 .

Material	Peso (kg/m^3)	Volumen (lt/m^3)
Arena	708.747	325.113
Grava	807.972	363.951
Cemento	378	121.935
Agua	189	189
Total	1000	2083.719

Materiales para revoltura de un saco de cemento de 50 kg.

MATERIAL	Rel. en peso	Peso/Saco (kg)	Vol./Saco (lt)	Rel. en Vol.	Vol. Abs.	Peso Tot. (kg/m^3)
Cemento	1.000	50.000	33.000	1.000	16.129	378.000
Arena	1.875	93.750	75.727	2.295	43.004	708.747
Grava	2.137	106.875	89.886	2.724	48.142	807.972
Agua	0.500	25.000	25.000		25.000	189.000
Sumas		275.624	223.613		132.275	2083.719

En base a los resultados que arrojo el cálculo del proporcionamiento, se calcularon las cantidades necesarias de material para la realización de nuestros especímenes, todo en base del volumen de dicho espécimen.

Cantidad de material necesario para la realización de 12 cilindros con radio de 10 cm y una altura de 20 cm:

MATERIAL	CANTIDAD (kg)
Cemento	7.838
Arena	14.153
Grava	15.810
Agua	5.404
Total	43.205



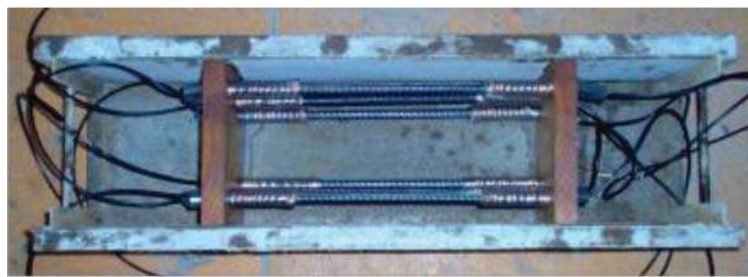
Cantidad de material necesario para la realización de 6 vigas de 15 x 15 x 60 cm.

MATERIAL	CANTIDAD (kg)
Cemento	10.497
Arena	16.013
Grava	24.039
Agua	8.421
Total	58.970



Cantidad de material necesario para la realización de 12 vigas de 15 x 15 x 30 cm.

MATERIAL	CANTIDAD (kg)
Cemento	33.680
Arena	60.819
Grava	67.937
Agua	23.224
Total	185.659



Proceso constructivo de las vigas de concreto, mismas que se realizaron dentro de las instalaciones del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil.



Colado de vigas

5. Síntesis del Recubrimiento

5. SÍNTESIS DEL RECUBRIMIENTO

En este capítulo se describe el proceso de investigación que se siguió, así como cada uno de los diferentes diseños de mezclas para obtener un recubrimiento óptimo y con el cual se pudiera trabajar para posteriores pruebas.

5.1 Diseño de la mezcla base.

La base de nuestro recubrimiento se conforma de los siguientes elementos:

- Puzolana 1 (SiO_2)
- Puzolana 2 (Al_2O_3)
- Hidróxido de Potasio (KOH)
- Agua desionizada



Procesos Químicos y Método de Preparación del Recubrimiento.

La puzolana 1 que es un óxido de sílice (SiO_2) y la puzolana 2 la cual es un óxido de aluminio (Al_2O_3) al mezclarse con el agua (H_2O) forman hidróxido de sílice ($\text{Si}(\text{OH})_4$) e hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) respectivamente, siendo esta la solución ácida de nuestra mezcla. Por otro lado la solución básica la forma el Hidróxido de Potasio (KOH) más agua, mezclándose la solución base con la ácida se produce lo que se conoce como reacción ÁCIDO – BASE, en esta etapa ocurre un intercambio iónico, lo cual da origen a que se produzca una “policondensación”, la cual consta de 3 etapas: SOLUCIÓN, GELACIÓN y SOLIDIFICACIÓN. Obteniendo así un polímero inorgánico:



El método que se seguía para la preparación de dicho polímero consistía en seguir una serie de sencillos pasos, los cuales fueron iguales desde que se realizó el primer recubrimiento hasta el último.

1. Se pesa cada uno de los elementos con una aproximación al decimo de gramo.
2. Al agua desionizada se le agrega el hidróxido de potasio y se agita durante 15 minutos.
3. Una vez mezclados el hidróxido de potasio y el agua desionizada se toma la puzolana 1 y se mezcla durante 15 minutos, una vez hecho esto se deja reposar durante 30 minutos.

4. Por último agregábamos la puzolana 2 y mezclamos durante 15 a 20 minutos.
5. Una vez realizados estos pasos se deja secar la mezcla completamente para obtener un polímero inorgánico con un aspecto cerámico.

Al comienzo de nuestra investigación se trabajo con la mezcla base que anteriormente se describió, aplicándola a superficies de concreto lisas y rugosas. Los resultados y las conclusiones se obtuvieron rápidamente: el recubrimiento se cuarteaba conforme este se iba secando, con el paso de los días esto empeoraba creándose grandes grietas así como un desprendimiento del recubrimiento lo que por lógica nos indicaba que existía una adherencia muy baja del recubrimiento con la superficie lo cual para la finalidad de nuestra investigación era un grave problema. Es importante señalar que se realizaron pruebas con diferentes relaciones molares (10, 12, 14, 16, 18, 20) obteniendo resultados muy similares.



Recubrimiento base después de algunos días.

5.2 Uso de Agregados.

Las experiencias y conclusiones que dejaron nuestras primeras investigaciones eran claras y esto nos serviría para encontrar una solución a los problemas que ya habíamos planteado:

- Agrietamiento.
- Falta de Adherencia.
- La mezcla era muy liquida, lo cual dificultaba su aplicación en superficies horizontales.

Una vez identificados estos problemas se comenzó a buscar una solución. La solución llego rápidamente, adicionar a nuestra mezcla dos diferentes agregados: fibra molida y micro esfera. La fibra molida vendría a reforzar nuestra mezcla ayudándonos a evitar el agrietamiento por otro lado la falta de adherencia seria contrarrestada por la micro esfera y juntos ayudarían a tener una mejor consistencia en nuestra mezcla.

Al igual que con el recubrimiento base se experimento usando diferentes relaciones molares (10, 12, 14, 16, 18 y 20), esto con la finalidad de identificar cual es la mejor relación molar, comparar resultados entre cada una de las diferentes relaciones molares y así elegir el recubrimiento que mejor se comporte. A continuación se anexa la información de cada una de las mezclas realizadas y su correspondiente relación molar, así como tipo de superficie en la que fue aplicada y tipo de secado.

Nota: Los porcentajes que se agregaron de fibra y micro esfera son en relación al peso de la mezcla base. La escala que se maneja en los apartados de trabajabilidad, adherencia y fracturas va de 1 a 10, donde 1 es muy malo y 10 es excelente. El análisis de cada muestra fue hecho personalmente y a simple vista, posteriormente se hicieron análisis microscópicos.

Relación Molar 10.

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	2	2	7
	Media	20	100	1	1	7
	Lisa	20	100	1	1	4
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	2	2	8
	Media	20	100	1	1	8
	Lisa	20	100	1	1	6
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: El bajo contenido de agua hace que la mezcla sea pastosa y seca dando como resultado un difícil mezclado y al aplicarla la formación de grumos y la poca adherencia es inevitable. Como punto a rescatar es la poca cantidad de fracturas que se pueden visualizar a simple vista.



Relación Molar 10 - Secado en Horno.



Relación Molar 10 – Secado Temperatura Ambiente.

Relación Molar 12.

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	3	4	8
	Media	20	100	2	3	6
	Lisa	20	100	2	2	4
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	3	4	8
	Media	20	100	2	3	6
	Lisa	20	100	2	2	4
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: El contenido de agua sigue siendo bajo por lo que el mezclado y su aplicación sigue siendo un problema, la aparición de grietas es más notable que en la relación molar anterior sobre todo en la superficie lisa como se puede apreciar en las fotografías.

*Relación Molar 12 – Secado en Horno**Relación Molar 14.*

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	7	7	8
	Media	20	100	7	7	7
	Lisa	20	100	6	7	7
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	7	7	8
	Media	20	100	7	7	6
	Lisa	20	100	6	7	6
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: La mezcla es más trabajable gracias al aumento de agua, lo que facilita el mezclado y la aplicación, y como ha venido sucediendo la superficie lisa es la que mas fracturas presenta, esto tal vez ocasionado por la baja absorción que presenta dicha superficie.



Relación Molar 14 - Secado en Horno.

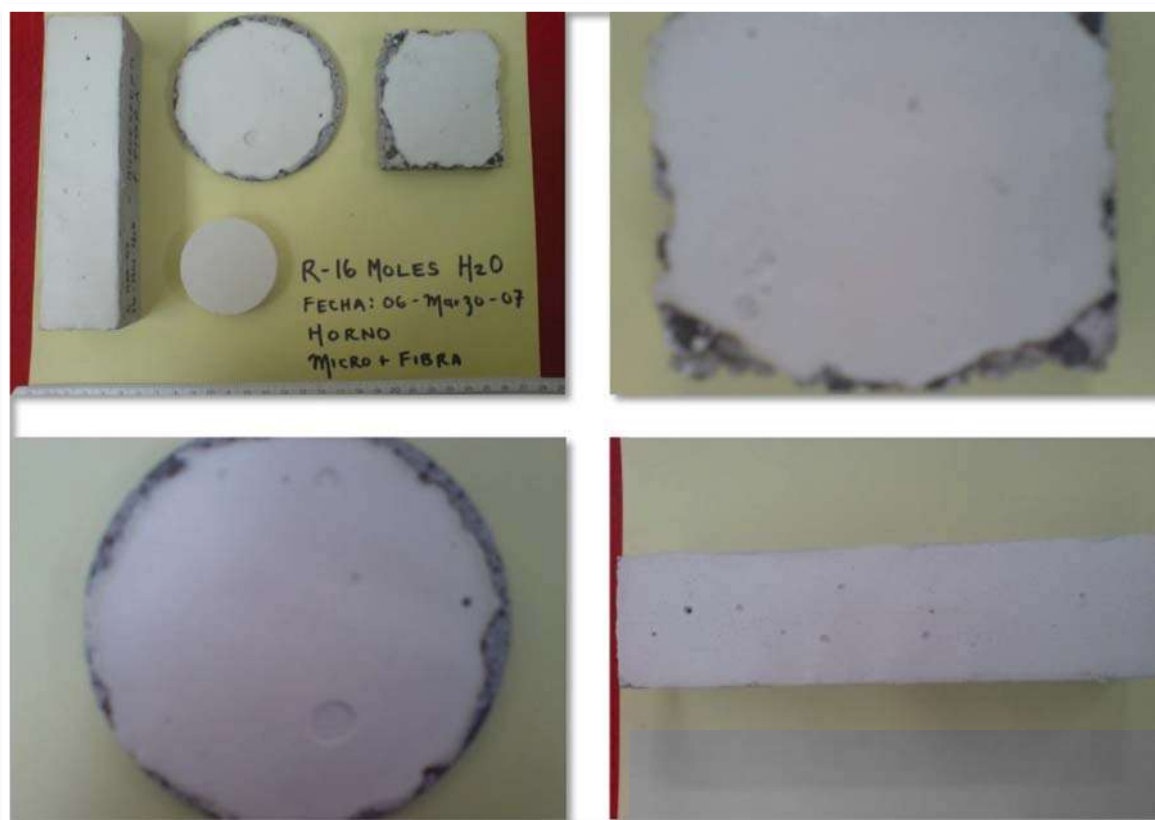


Relación Molar 14 - Secado Temperatura Ambiente.

Relación Molar 16.

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	8	8	9
	Media	20	100	8	8	8
	Lisa	20	100	8	8	8
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	8	8	8
	Media	20	100	8	8	8
	Lisa	20	100	8	8	7
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: La mezcla es más consistente, presenta una muy buena trabajabilidad así como una muy buena adherencia, una vez secas las muestras se aprecian grietas muy pequeñas, inclusive nulas a simple vista en la superficie rugosa.

*Relación Molar 16 - Secado en Horno.*



Relación Molar 16 - Secado Temperatura Ambiente.

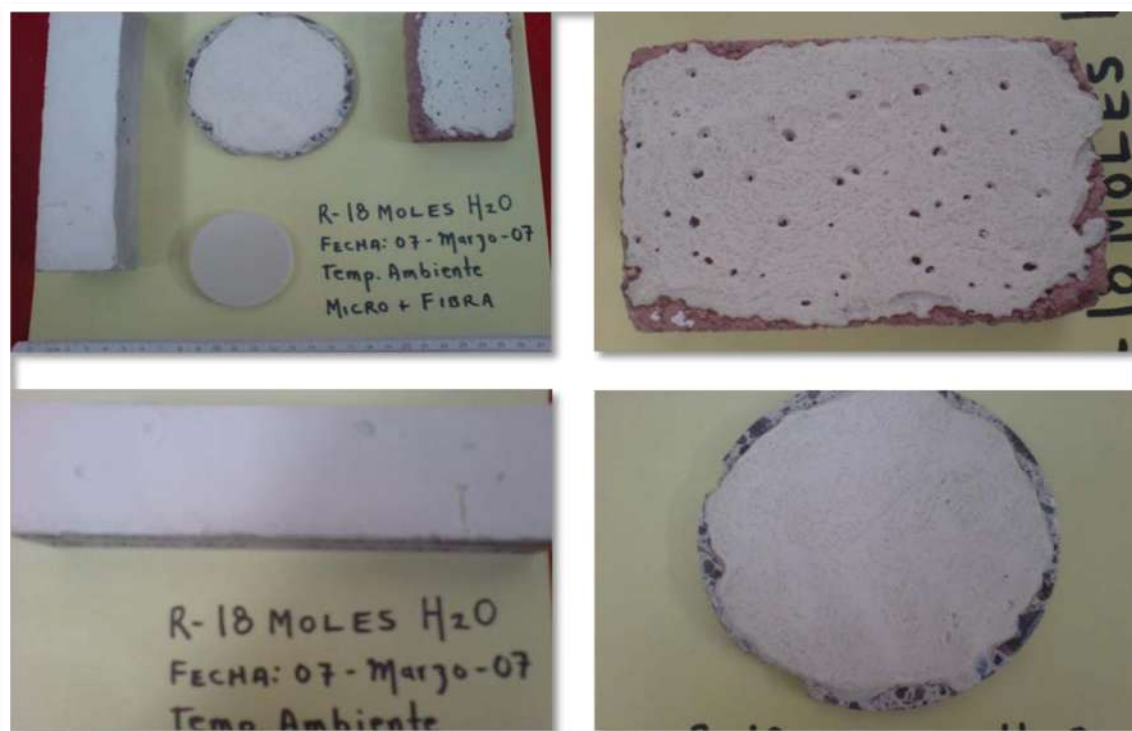
Relación Molar 18.

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	10	10	10
	Media	20	100	10	10	10
	Lisa	20	100	10	10	10
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	10	10	10
	Media	20	100	10	10	10
	Lisa	20	100	10	10	10
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: La mezcla presenta mejores características que su predecesora relación molar 16, a simple vista no se observan grietas en la superficie, resultado que no habíamos obtenido en ninguna relación molar anterior.



Relación Molar 18 - Secado en Horno.



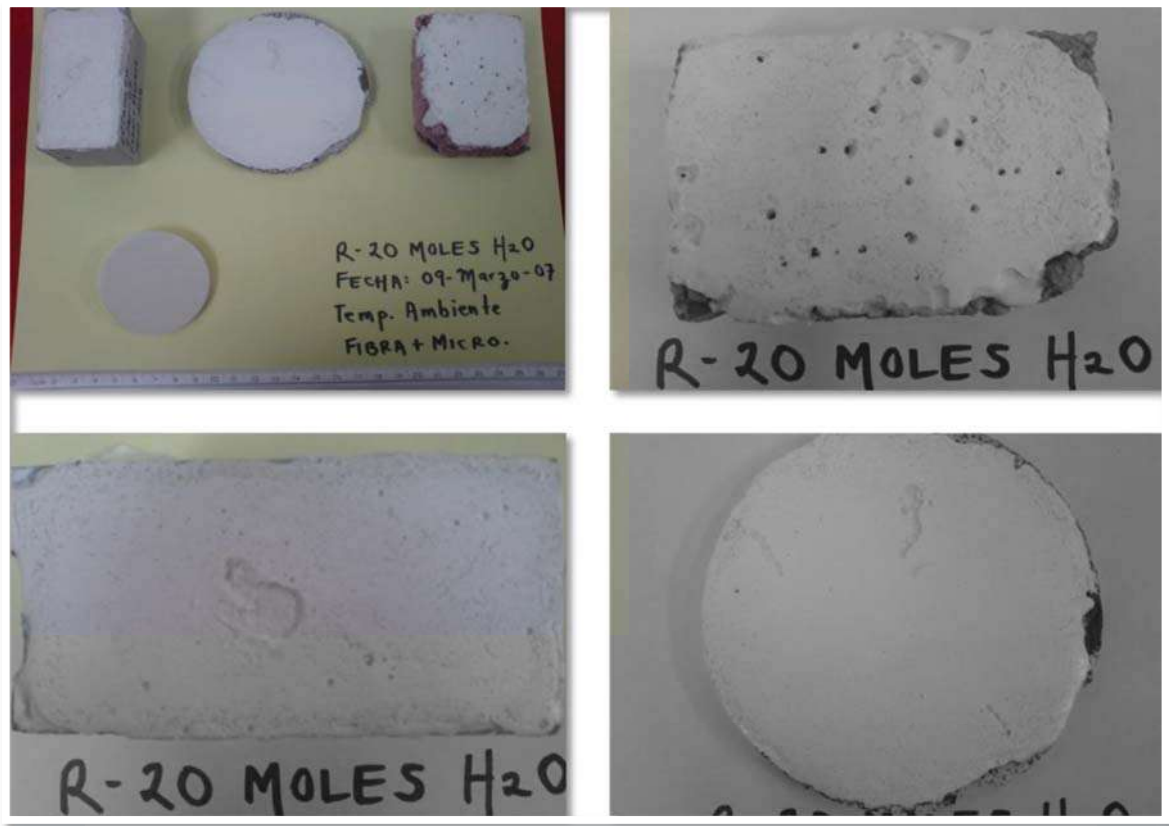
Relación Molar 18 - Secado Temperatura Ambiente.

Relación Molar 20.

Tipo de Secado	Tipo de Superficie	% Fibra	% Micro Esfera	Trabajabilidad	Adherencia	Fracturas
Temperatura Ambiente	Rugosa	20	100	7	7	9
	Media	20	100	7	7	8
	Lisa	20	100	7	7	8
	Cápsula	20	100	--	--	--
Horno	Rugosa	20	100	7	7	9
	Media	20	100	7	7	8
	Lisa	20	100	7	7	8
	Cápsula	20	100	--	--	--

Observaciones: El contenido de agua es muy alto provocando una mala trabajabilidad, su aplicación es difícil debido a su forma tan fluida, difícilmente aplicable en superficies verticales. Se observo poco agrietamiento.

*Relación Molar 20 - Secado en Horno.*



Relación Molar 20 - Secado Temperatura Ambiente.

Conclusiones:

Se obtuvieron resultados de todo tipo durante cada una de las experimentaciones por eso fue importante hacer pruebas en diferentes tipos de superficies y distintos métodos de secado ya que no importando que se tuviera la misma relación molar el tipo de superficie en la que se aplicaba el recubrimiento influía; obtuvimos recubrimientos que tuvieron muy buen comportamiento en una superficie rugosa, pero en cambio en la superficie lisa se encontraban totalmente cuarteados (un ejemplo claro de esto es la relación molar No. 12), los mismo pasaba con el tipo de secado. A final de cuentas ningún resultado fue malo ya que cada uno aportó información valiosa que nos permitió llegar a obtener un resultado final y un recubrimiento de calidad.

El recubrimiento que presento las mejores características fue el de la relación molar numero 18 (el cual llamaremos R-18), por lo tanto se procedió a recubrir un cilindro con esta mezcla y observar su comportamiento.

Los resultados fueron bastante buenos: Físicamente el recubrimiento presenta un buen atractivo visual debido a su semejanza con un material cerámico, una vez seco el recubrimiento no se observaron fracturas,

se sometido al intemperismo y se saturó constantemente en agua, esto durante aproximadamente 5 meses sin presentarse daño alguno en el recubrimiento.



Cilindro recubierto con R-18, a la izquierda un acercamiento al recubrimiento aplicado en el cilindro.

5.3 Uso de Nuevos Agregados.

El recubrimiento R-18 fue muy bueno, lamentablemente la fibra molida que se estaba empleando como agregado se agotó y se tuvieron problemas con el proveedor para volver a conseguirla, pero siendo este un trabajo de investigación no podíamos darnos el lujo de detenernos y esperar a que la fibra molida llegara, así que se optó por seguir experimentando con diferentes mezclas de agregados y por la utilización de diferentes tipos de fibra, obteniendo resultados y texturas muy diversas. Entre los tipos de fibra y agregados nuevos tenemos:

- Fibra en Hojuela
- Fibra Cortada
- Fibra Molida 2
- Arena Sílica
- Marmolina
- Arena de Río
- Carbonato

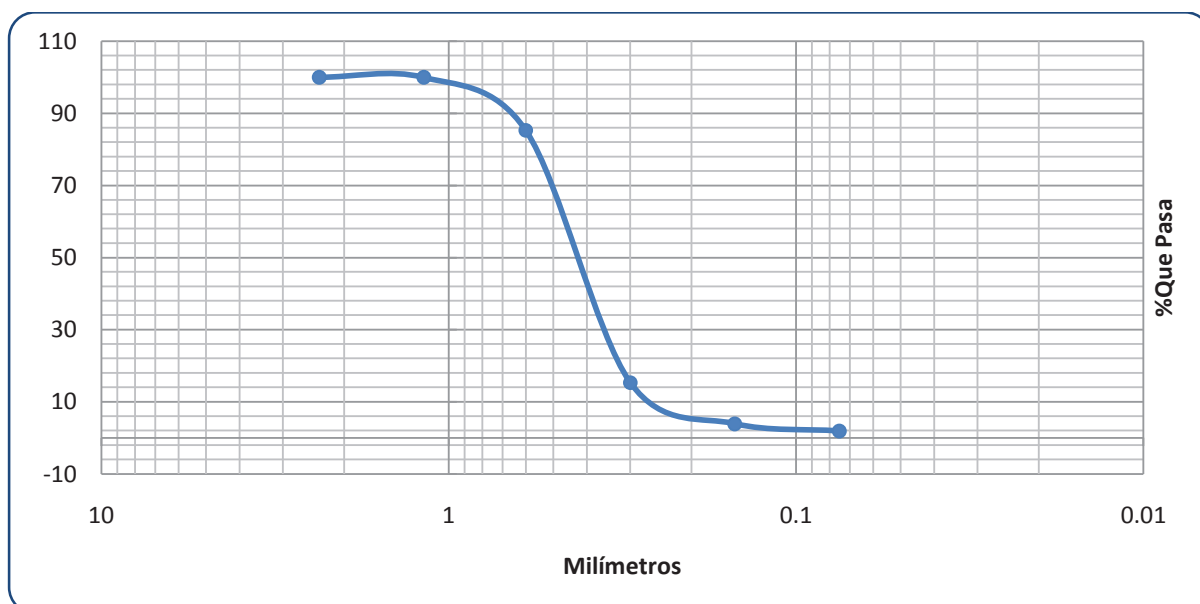
Se hizo un análisis granulométrico de los siguientes agregados: arena sílica, marmolina y arena de río; esto con la finalidad de conocer la distribución de los diámetros de las partículas y su correspondiente módulo de finura, el registro de dichos análisis se anexa a continuación.

Arena Sílica.

Análisis No. 1 - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

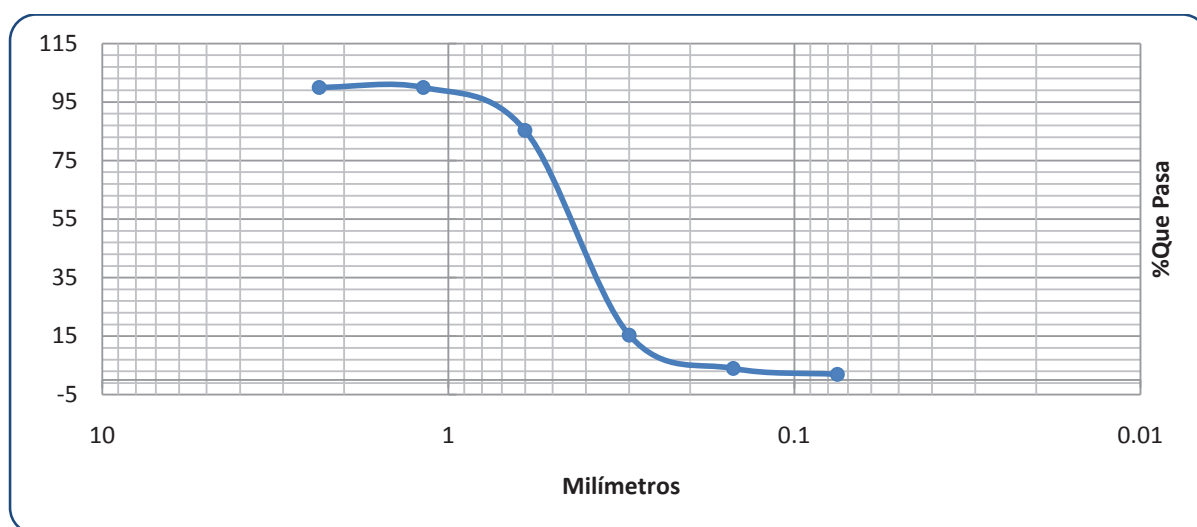
MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.00	0.00	0.00	100.00
16	2.00	0.40	0.40	99.60
30	317.00	63.49	63.89	36.11
50	177.00	35.45	99.34	0.66
100	2.00	0.40	99.74	0.26
200	0.60	0.12	99.86	0.14
CHAROLA	0.70	0.14	100.00	0.00
SUMA	499.30	100.00	M.F. =	2.37

Curva Granulométrica

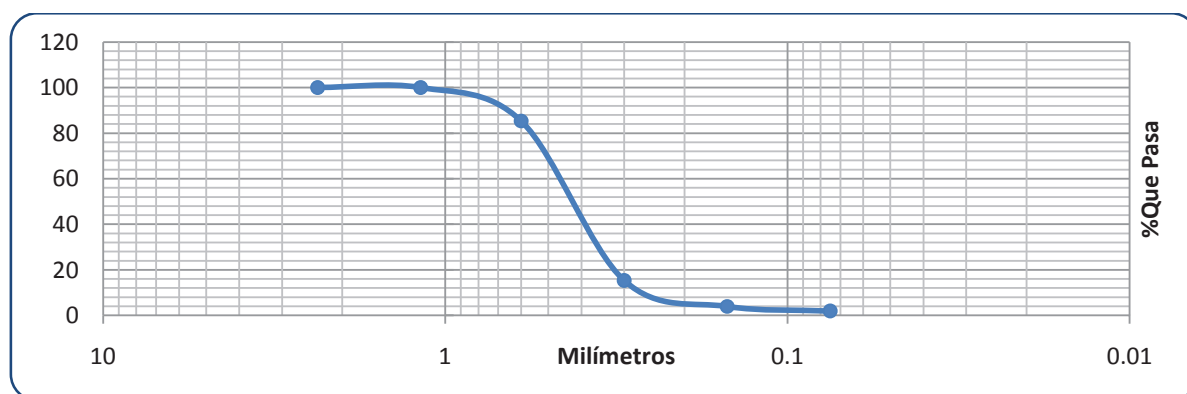


Análisis No. 2 - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.00	0.00	0.00	100.00
16	1.80	0.36	0.36	99.64
30	341.60	68.42	68.78	31.22
50	153.70	30.78	99.56	0.44
100	1.70	0.34	99.90	0.10
200	0.30	0.06	99.96	0.04
CHAROLA	0.50	0.10	100.06	0
SUMA	499.60	100	M.F. =	2.31

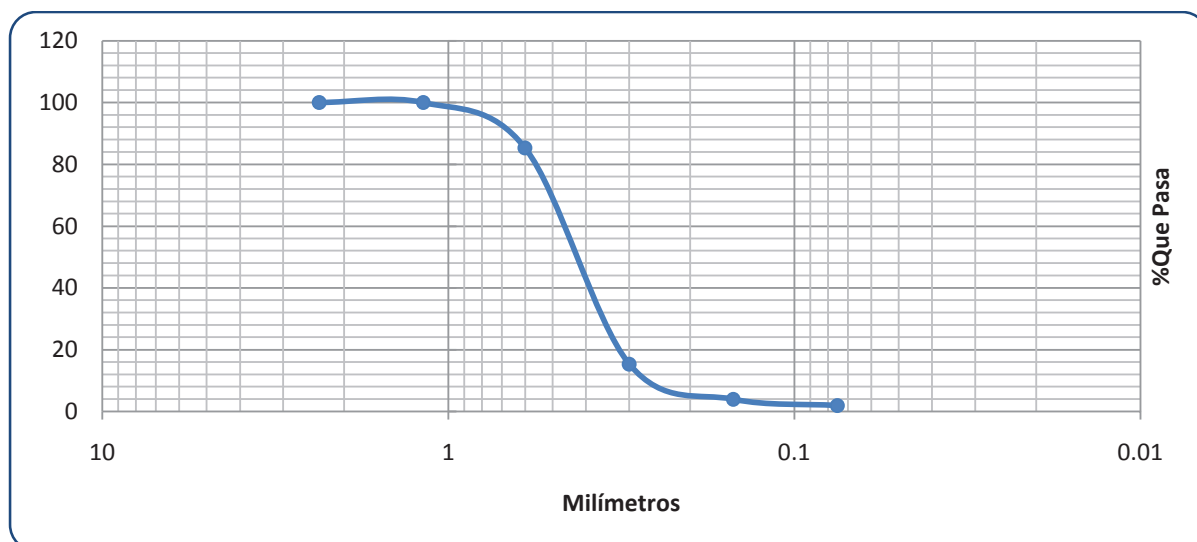
Curva Granulométrica*Marmolina.***Análisis No. 1** - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.00	0.00	0.00	100.00
16	0.40	0.08	0.08	99.92
30	203.00	40.62	40.70	59.30
50	166.30	33.27	73.97	26.03
100	72.60	14.53	88.50	11.50
200	33.00	6.60	95.10	4.90
CHAROLA	24.50	4.90	100.00	0.00
SUMA	499.80	100.00	M.F. =	3.02

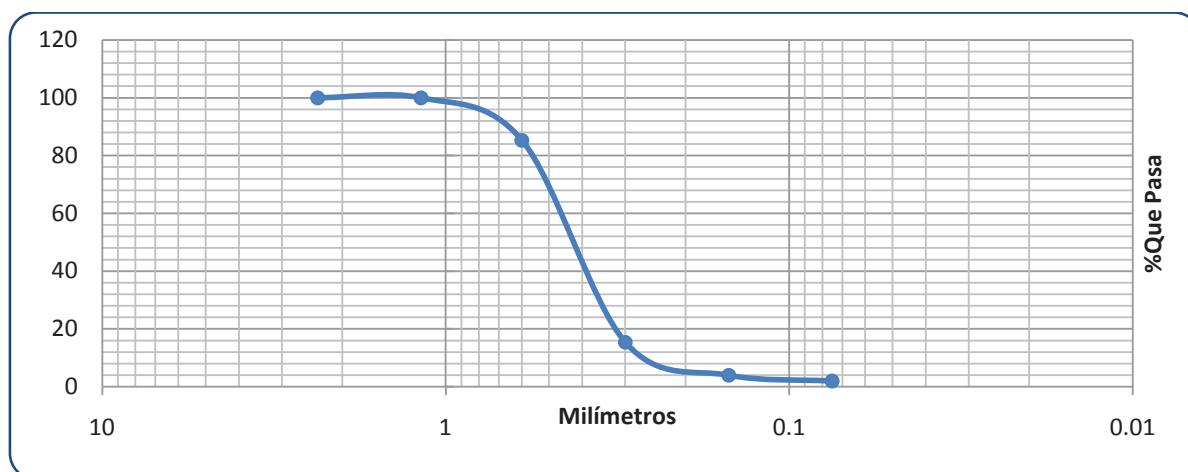
Curva Granulométrica

Análisis No. 2 - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

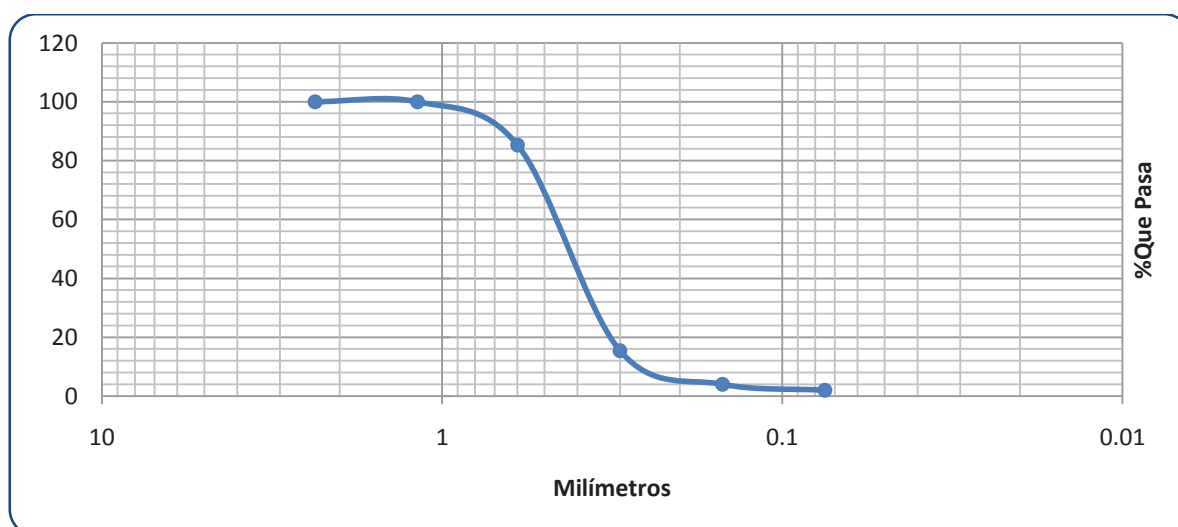
MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.00	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	0.00	100.00
30	225.20	45.06	45.06	54.94
50	160.00	32.01	77.07	22.93
100	53.70	10.74	87.82	12.18
200	29.30	5.86	93.68	6.32
CHAROLA	31.10	6.23	99.91	0.09
SUMA	499.30	100.00	M.F. =	2.96

Curva Granulométrica*Arena de Rio.***Análisis No. 1** - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.20	0.04	0.04	99.96
16	0.30	0.06	0.10	99.90
30	51.30	10.27	10.37	89.63
50	337.80	67.61	77.98	22.02
100	90.10	18.03	96.02	3.98
200	13.00	2.60	98.62	1.38
CHAROLA	6.90	1.38	100.00	0.00
SUMA	499.60	100.00	M.F. =	3.17

Curva Granulométrica**Análisis No. 2** - Peso Inicial de la Muestra = 500 gr

MALLA	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
8	0.00	0.00	0.00	100.00
16	0.20	0.04	0.04	99.96
30	73.30	14.67	14.71	85.29
50	349.40	69.94	84.65	15.35
100	57.00	11.41	96.06	3.94
200	10.11	2.02	98.08	1.92
CHAROLA	9.40	1.88	99.96	0.04
SUMA	499.41	99.96	M.F. =	3.06

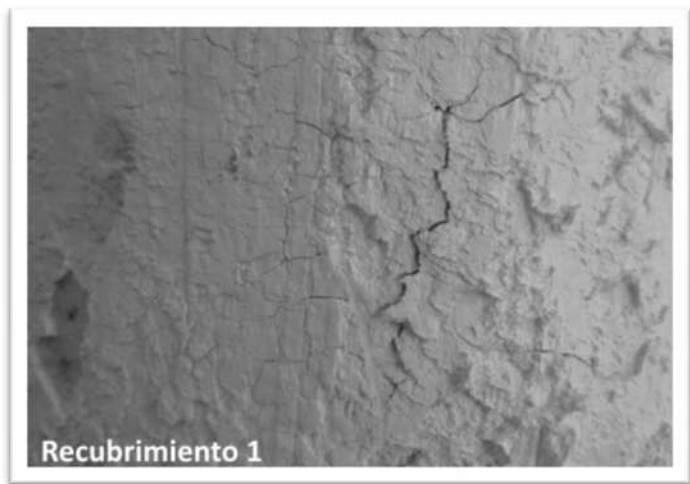
Curva Granulométrica

5.3.1 Síntesis de los Recubrimientos Realizados.

Recubrimiento 1

- 18 moles
- 100% Carbonato

El recubrimiento presento una mala trabajabilidad esto debido a la falta de agua y por consecuencia presento una mala adherencia. Una vez seco el recubrimiento presento grandes fracturas en su superficie así como un desprendimiento del mismo.



Recubrimiento 2

- 18 moles
- 50% Fibra en Hojuela

La fibra en hojuela ocasiona una mala trabajabilidad debido a su tamaño, da un aspecto no muy bueno a nuestro recubrimiento, además de dejar grandes huecos lo cual no es bueno ya que se busca un material que sea impermeable. La muestra en la que se uso parafilm presenta pequeñas fracturas en la superficie debido a que las partículas más grandes tienden a descender.



Recubrimiento 3

- 18 moles
- 50% Fibra en Hojuela
- 100% Micro Esfera

Sigue existiendo mala trabajabilidad, la adición de micro esfera viene a solucionar un poco el problema de los huecos, la fotografía muestra el recubrimiento sin el uso del parafilm.

La muestra a la que se le puso el parafilm al igual que el recubrimiento no. 2 presenta fracturas en la superficie.

**Recubrimiento 4**

- 18 moles
- 1% Fibra Cortada
- 10% Micro Esfera
- 150% Arena Sílica

El recubrimiento tiene buena trabajabilidad, así como adherencia, presenta el problema de que en superficies muy lisas las partículas de mayor tamaño tienden a descender quedando en la superficie únicamente mezcla líquida sin ningún tipo de agregado lo que provoca que se presenten fracturas.



Recubrimiento 5

- 18 moles
- 200% Marmolina Pura
- 1% Fibra Cortada

La precipitación de las partículas de mayor tamaño hacia el fondo se sigue presentando en superficies demasiado lisas, en superficies rugosas el recubrimiento presenta un buen comportamiento. Las muestras que fueron cubiertas con parafilm presentaron grietas en la superficie.

**Recubrimiento 6**

- 18 moles
- 50% Arena de Río
- 20% Fibra Molida 2
- 10% Micro esfera

Claramente se observa que el recubrimiento es de mala calidad esto debido a la aglomeración de la fibra molida una vez que hace contacto con la solución líquida formando esos grumos que se observan en la fotografía.

**Recubrimiento 7**

- 18 moles
- 50% Arena Sílica
- 20% Fibra Cortada

La arena sílica siempre le da un muy buen aspecto al recubrimiento, esto pensando en que podría ser aplicado como un mortero, esta mezcla sigue presentando fracturas, muy pocas y pequeñas pero aun existen.



Recubrimiento 8

- 18 moles
- 140% Arena de Río
- 1% Fibra Cortada
- 10% Micro esfera

Se ha venido observado que el uso de arena de río como agregado ha dado siempre buenos resultados y este recubrimiento no fue la excepción. Buena trabajabilidad y adherencia, se presentaron pequeñas grietas en la muestra donde se uso parafilm.

**Recubrimiento 9**

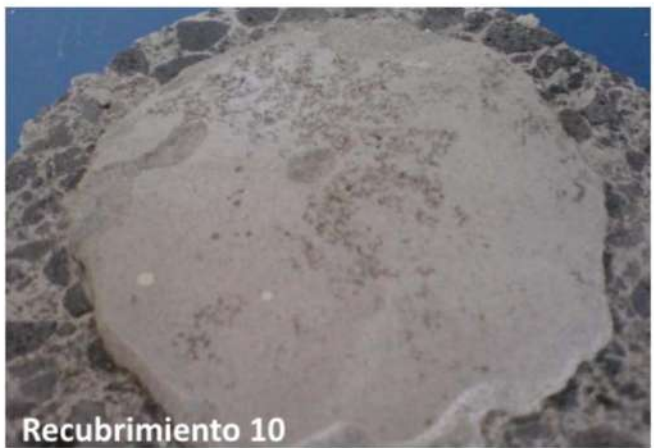
- 18 moles
- 95% Arena de Río
- 5% Fibra Cortada

En comparación con el recubrimiento no. 8, las disminución de los porcentajes de agregados ocasiona que el agregado se precipite hacia el fondo dejando una capa liquida en la superficie, la cual una vez seca la mezcla tiende a fracturarse.

**Recubrimiento 10**

- 18 moles
- 163.12% Arena de Río

Únicamente se uso arena de río como agregado en un alto porcentaje como se observa en la fotografía aun con parafilm no se presentaron fracturas, tal vez el único inconveniente del uso de arena de río es que el recubrimiento se vuelve muy hidrófilo.



Recubrimiento 11

- 18 moles
- 50% Arena Sílica
- 20% Fibra Molida 2

El recubrimiento presenta buena textura, a simple vista no se aprecia ninguna fractura. El único inconveniente que se presenta es por la aglomeración de la fibra molida 2, lo que ocasiona la formación de grumos.

**Recubrimiento 12**

- 18 moles
- 50% Arena Sílica
- 20% Fibra Molida 2
- 10% Micro Esfera

Buen recubrimiento, no se presentan fracturas, trabajabilidad aceptable, pero como ha venido pasando con la fibra molida 2 sigue existiendo la formación de grumos.

**Recubrimiento 13**

- 18 moles
- 95% Arena Sílica
- 5% Fibra Molida 2

La mezcla presenta una textura aceptable, existen pequeñas fracturas en la superficie y la mezcla no es tan homogénea por el problema de la formación de grumos, se ha descartado.



Recubrimiento 14

- 18 moles
- 100% Micro Esfera
- 50% Carbonato
- 6% Fibra Cortada

El recubrimiento presento muy buena trabajabilidad para ser aplicado, una vez seco se fracturo.

**Recubrimiento 15**

- 18 moles
- 50% Micro Esfera
- 100% Carbonato
- 6% Fibra Cortada

El recubrimiento presento poca trabajabilidad para ser aplicado esto ocasionado por el alto contenido de carbonato, una vez seco el recubrimiento se tuvieron fracturas.

**Recubrimiento 16**

- 18 moles
- 100% Micro Esfera
- 100% Carbonato
- 6% Fibra Cortada

El recubrimiento presento una trabajabilidad casi nula para ser aplicado así como muy poca adherencia al ser aplicado esto ocasionado por el alto contenido de carbonato, una vez seco el recubrimiento no hubo fracturas.



Recubrimiento 17

- 18 moles
- 100% Micro Esfera
- 50% Carbonato
- 5% Fibra Cortada

Buena trabajabilidad y adherencia cuando se aplica, pero una vez seco el recubrimiento se presentaron fracturas en la superficie.

**Recubrimiento 18**

- 18 moles
- 50% Micro Esfera
- 100% Carbonato
- 5% Fibra Cortada

El recubrimiento presento poca trabajabilidad para ser aplicado esto ocasionado por el alto contenido de carbonato, una vez seco el recubrimiento se tuvieron fracturas.

**Recubrimiento 19**

- 18 moles
- 100% Micro Esfera
- 100% Carbonato
- 5% Fibra Cortada

El recubrimiento presento una trabajabilidad casi nula para ser aplicado así como muy poca adherencia al ser aplicado esto ocasionado por el alto contenido de carbonato, una vez seco el recubrimiento no hubo fracturas.



Recubrimiento 20

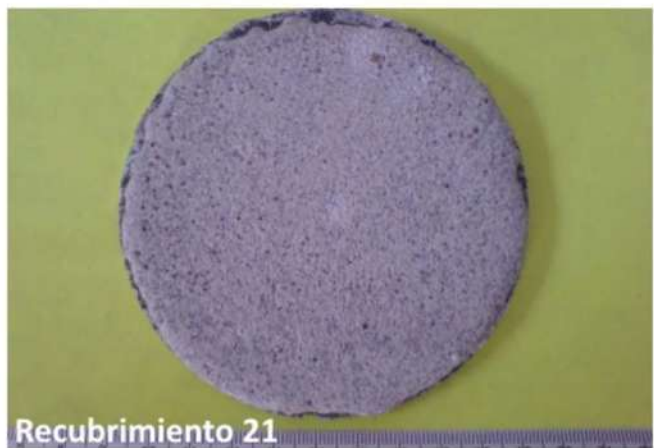
- 18 moles
- 125% Micro Esfera
- 30% Carbonato
- 5% Fibra Cortada
- 20% Marmolina

Un recubrimiento que presento muy buenas características, en cuanto a trabajabilidad y adherencia. Una vez seco el recubrimiento no presento fractura alguna simple vista.

**Recubrimiento 21**

- 18 moles
- 150% Arena Sílica
- 10% Micro Esfera

Recubrimiento con buena trabajabilidad, medianamente poroso además de que en superficies completamente lisas presenta grandes fracturas.

**Recubrimiento 22**

- 18 moles
- 140% Arena de Río
- 10% Micro Esfera

Un recubrimiento bastante bueno, gran adherencia, no se observan fracturas inclusive en superficies totalmente lisas.



Recubrimiento 23

- 18 moles
- 95% Marmolina
- 5% Fibra Molida 2

Se observaron pequeñas fracturas una vez seco el recubrimiento además de que la fibra molida 2 como agregado sigue ocasionando problemas ya que los grumos no se pueden deshacer dando un mal aspecto.

*Conclusiones:*

Varios de los recubrimientos que se diseñaron en este apartado presentaron muy buenas características, en especial los recubrimientos que contenían arena de río, el único problema con estos es que una vez secos presentan la característica de absorber fácilmente el agua. Otro agregado que nos dio muy buenos resultados fue la marmolina, inclusive se recubrieron algunas vigas y cilindros con el recubrimiento número 20 para hacer distintas pruebas.

El agregado llamado “fibra molida 2” fue el sustituto de la “fibra molida”, agregado que usamos en las primeras experimentaciones, el cual nos dio muy buenos resultados cosa que su sustituto no, ya que al ser incorporado a la mezcla se aglomeraba formando grumos los cuales no se podían deshacer dando un mal aspecto a nuestro recubrimiento.

Hay que señalar que los recubrimientos con agregados como: arena de río, marmolina y arena sílica, tienen la particularidad de ser hidrófilos lo cual de alguna forma es un problema para nuestro objetivo que es el de evitar la corrosión en el acero de refuerzo. Por esta razón se continuó experimentando con otros agregados y encontrar una solución práctica. También observamos que cuando usábamos el parafilm en nuestras muestras para evitar la rápida evaporación del agua, aumentaba la posibilidad de que el recubrimiento presentara fracturas.

Recopilación de Fotografías de los Recubrimientos Realizados.

Las siguientes fotografías muestran los recubrimientos descritos anteriormente pero con variaciones en cuanto a su forma de secado (ya sea que se haya usado parafilm o no), así como tipo de superficie en la que el recubrimiento fue aplicado.



Recubrimiento 2



Recubrimiento 3



Recubrimiento 4



Recubrimiento 4



Recubrimiento 5



Recubrimiento 5



Recubrimiento 6



Recubrimiento 7



Recubrimiento 8



Recubrimiento 8



Recubrimiento 9



Recubrimiento 10



6. Síntesis del Recubrimiento Composite

6. SÍNTESIS DEL RECUBRIMIENTO COMPOSITE

Un material composite es aquel que está formado por varios componentes sintéticos mezclados heterogéneamente y que forman un compuesto. Estos componentes pueden ser de dos tipos: los de cohesión y los de refuerzo. Los componentes de cohesión envuelven y unen los componentes de refuerzo (o simplemente refuerzos) manteniendo la rigidez y la posición de éstos. Los refuerzos confieren unas propiedades físicas al conjunto tal que mejoran las propiedades de cohesión y rigidez. Así, esta combinación de materiales le da al compuesto unas propiedades mecánicas notablemente superiores a las materias primas del que procede.

El componente que agregamos a nuestro recubrimiento y que vendría a dar una mayor cohesión al recubrimiento fue el látex, ya que como es sabido tiene características que nos pueden ser muy útiles (plastificante, excelente adherencia, repelente). Los resultados de la adición del látex se observaron claramente, disminuyo en gran medida la permeabilidad, se obtuvo una mejor cohesión de los agregados reduciendo con esto el contenido de huecos dando como resultado una superficie más lisa. El material de refuerzo que utilizamos fue la marmolina, ya que da un muy buen aspecto al recubrimiento además de ser entre la arena de rio y la arena sílica el agregado más estable.

Además se hizo una prueba donde el recubrimiento se acidifico para esto lo único que se hizo fue aumentar el porcentaje de la puzolana 1, es decir agregar más oxido de sílice (SiO_2) para así obtener una mayor relación en nuestra solución acida.

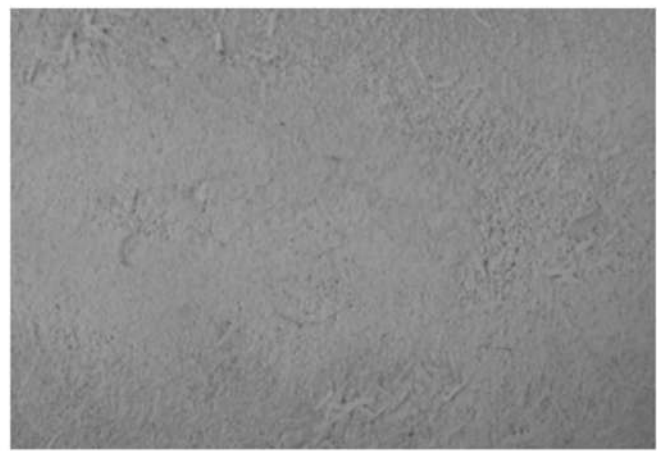
A continuación se anexan los resultados y las características de cada recubrimiento composite que se realizo en el laboratorio.

6.1 Resultados de la Síntesis

Recubrimiento Composite 1

- 18 moles
- 200% Marmolina
- 1% Fibra Cortada
- 20% Látex

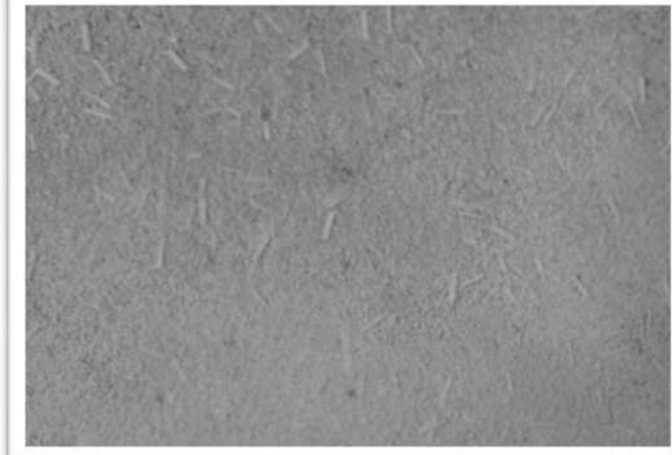
El agregados tiende a precipitarse hacia el fondo dejando en la superficie solo la parte liquida la cual al secar se fractura. No hubo problemas durante la adición del látex, la mezcla es muy liquida.



Recubrimiento Composite 2

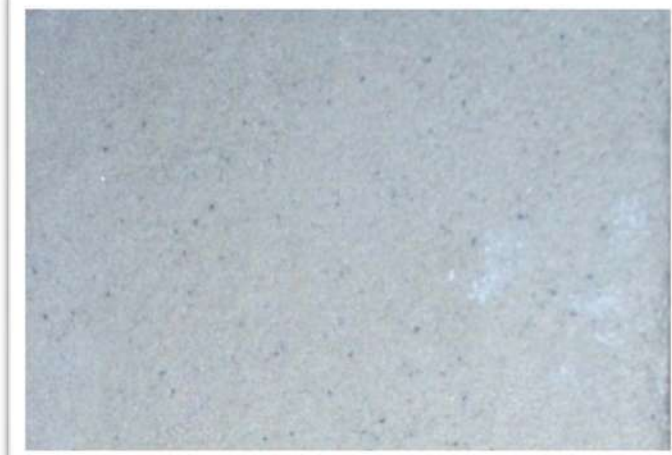
- 18 Moles
- 220% Marmolina
- 1% Fibra Cortada
- 20% Látex
- 20% Micro Esfera

La adición de la micro esfera ayudo a contrarrestar un poco la precipitación del agregado aun así la mezcla sigue siendo muy liquida. Se presentaron pequeñas fracturas.

**Recubrimiento Composite 3**

- 18 Moles
- 350% Marmolina
- 1% Fibra Cortada
- 30% Látex
- 20% Micro Esfera

Recubrimiento con muy buenas características no existieron fracturas, la mezcla es completamente homogénea y se tiene una muy buena trabajabilidad y adherencia cuando se está aplicando.

*Acidificación 1*

- | | | |
|------------------|--------------------|-------------|
| • 18 Moles | • 10% Micro esfera | • 20% Látex |
| • 275% Marmolina | | • 1% Fibra |

Acidificación 2

- | | | |
|------------------|--------------------|------------|
| • 18 Moles | • 20% Micro esfera | • 1% Fibra |
| • 275% Marmolina | • 20% Látex | |



Proceso de remoción del recubrimiento acidificado.

Observaciones: Las dos mezclas acidificadas presentan buena trabajabilidad y adherencia al ser aplicadas, la mezcla debido a la acidificación es muy similar a una pasta, no se observó ningún problema durante su aplicación, estos vendrían después durante su secado y posteriores a este.

Conclusiones:

Esta fue la última parte de experimentación de nuestra tesis en cuanto a diseño de mezclas o recubrimiento se refiere, la experimentación y las experiencias obtenidas a lo largo de la investigación nos hicieron pasar de un recubrimiento inorgánico a uno que no lo es del todo o mejor dicho un material composite.

La experiencia nos indicaba que el problema radicaba en el contenido de agua, en ese porcentaje que no lograba mezclarse completamente con los demás agregados, la solución más sencilla fue la de ir agregando gradualmente un mayor porcentaje de marmolina y observar el comportamiento del recubrimiento hasta obtener el porcentaje ideal y así fue como se hizo obteniendo resultados muy buenos como se puede observar en el recubrimiento 3, un recubrimiento que presento muy buena adherencia, trabajabilidad y sobre todo ninguna fractura una vez que se encontraba totalmente seco, dicho recubrimiento se seleccionó para trabajar en pruebas posteriores.

En cuanto a la experimentación que consistía en acidificar nuestra mezcla los resultados no fueron muy alentadores, en un principio se observó que tardaba más en secar completamente a diferencia de los otros recubrimientos; a simple vista el recubrimiento se veía muy bien, inclusive mucho mejor que los anteriores. El recubrimiento tenía un aspecto más cerámico, se podría decir que daba una apariencia de mayor resistencia. El mayor problema se nos presenta cuando el recubrimiento es sumergido en agua ya que comienza a desprenderse con facilidad volviéndose una pasta que se diluye en el agua, esto ocasionado por que durante la reacción ácido – base y su correspondiente policondensación, la última etapa que es la de solidificación no se lleva a cabo. Este problema se solucionaba sometiendo el recubrimiento a altas temperaturas (lo que sería un problema ya que se estaba trabajando con vigas de concreto), por lo cual se descartó el hecho de trabajar con un recubrimiento acidificado.

7. Evaluación Mecánica del Concreto y del Recubrimiento

7. EVALUACIÓN MECÁNICA DEL CONCRETO Y DEL RECUBRIMIENTO

Apegándonos a las normas establecidas y siguiendo las indicaciones del “Manual de Análisis de Materiales” que publica la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se evaluaron mecánicamente algunos especímenes realizados, esto con el propósito de verificar la resistencia real de nuestro concreto con la resistencia de proyecto. A continuación se describen los análisis realizados.

7.1 Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto.

Objetivo:

Determinar la resistencia que presenta el concreto al ser sujeto a una carga de compresión simple.

Equipo:

- Maquinas hidráulicas (Se utilizo la Maquina Universal Forney).
- Regla.

Calculo:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

- P = Carga de Ruptura
- A = Área de la sección transversal del espécimen
- σ = Esfuerzo que resiste el espécimen



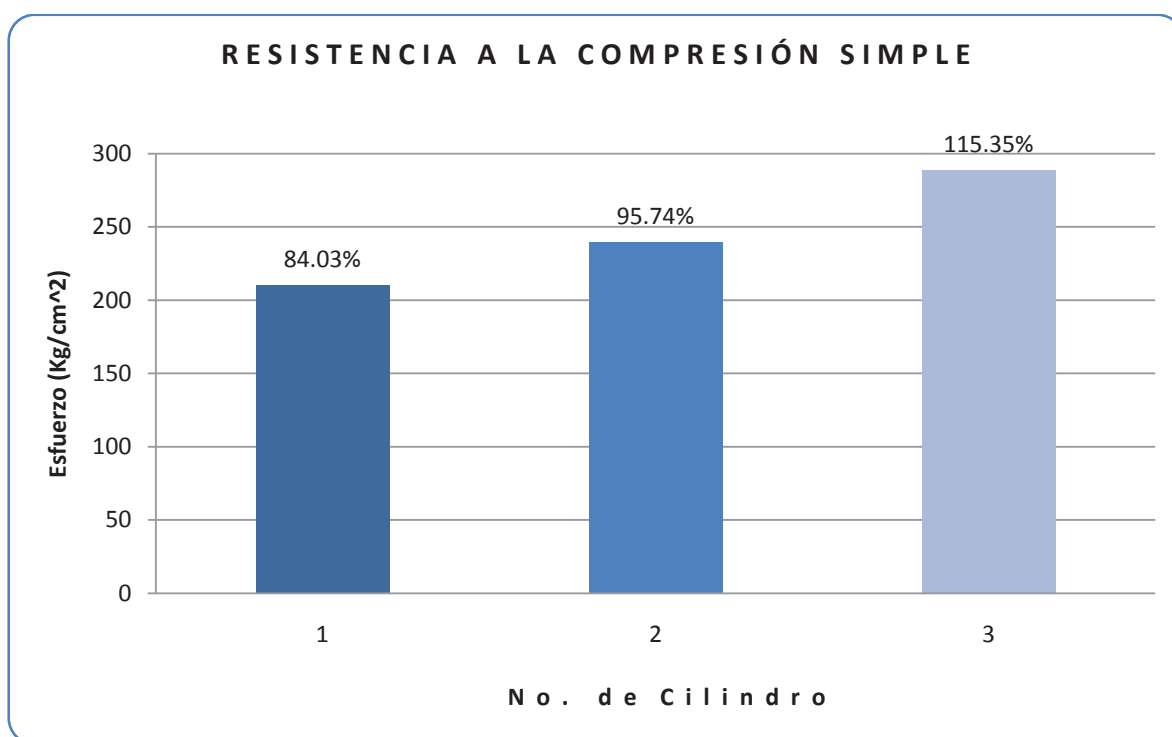
Antes y Después de la Compresión

Registro:

Los cilindros antes de ser sometidos a dicha prueba tenían una edad de 117 días, y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cilindro No.	σ_p (kg/cm ²)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	P (kg)	σ (Kg/cm ²)	% de Resistencia
1	250	10	20.1	78.540	16500	210.085	84.034
2	250	10	19.9	78.540	18800	239.369	95.748
3	250	10	20	78.540	22650	288.389	115.356

**Donde: σ_p = resistencia real a cierta edad en días.*



Algunos diseñadores nos marcan que el porcentaje de resistencia de los especímenes a los 28 días debe de ser mayor o igual a un 85%. Podemos observar que el porcentaje de resistencia de nuestros especímenes se encuentran sobre el 80%, inclusive el cilindro numero tres sobrepasa la resistencia de diseño, por lo que puedo decir que nuestras resistencias son aceptables y se encuentran dentro de las especificaciones.

7.2 Resistencia a la Compresión Simple en Cilindros de Concreto Recubiertos.

Se realizó el análisis de compresión simple a 5 cilindros similares a los anteriores, solo que a estos cilindros se les aplicó una capa de recubrimiento con un espesor aproximado de 5 mm, esto con el fin de comprobar si existía algún aumento o mejora en su resistencia todo con el fin de contribuir a la investigación.



Cilindros totalmente recubiertos.

El recubrimiento que se les aplicó a los especímenes tenía las siguientes características:

Recubrimiento Aplicado:

- 18 Moles
- 350% Marmolina
- 30% Látex
- 20% Micro Esfera

Se les aplicó la mezcla anteriormente descrita a los cilindros, en la fotografía podemos observar un cilindro que fue sometido a la prueba de compresión simple se observa el recubrimiento y por debajo de este la superficie del cilindro.

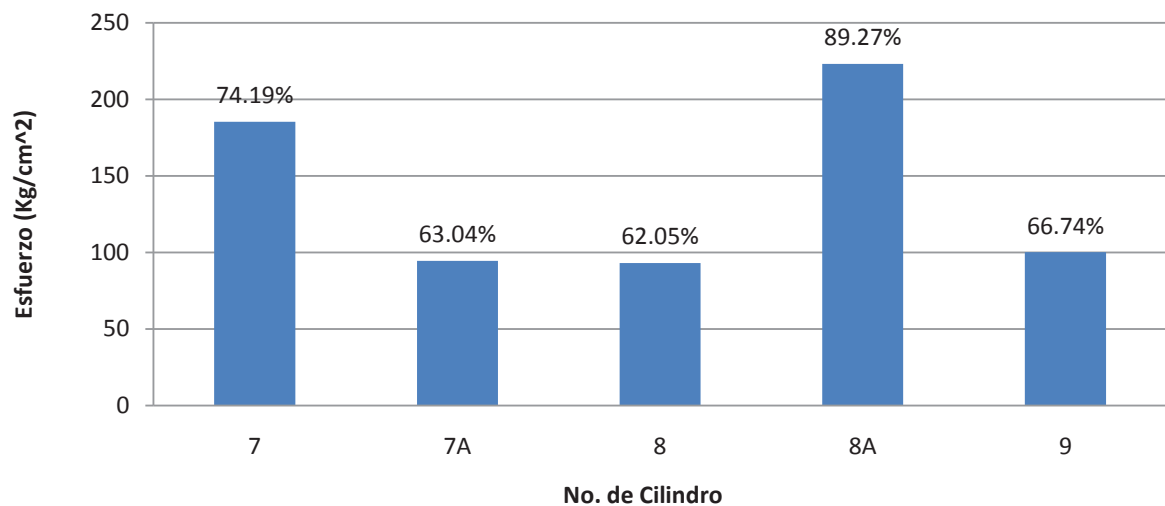


Registro:

Los cilindros antes de ser sometidos a dicha prueba tenían una edad de 120 días los que tienen un $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ y 124 días los cilindros con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, obteniendo los siguientes resultados. En la siguiente tabla se adjuntaron también los resultados de tres cilindros que fueron diseñados con un $f'c$ diferente al de nuestro proyecto de tesis que es de 250 kg/cm^2 . Como podemos observar cuatro de los cinco especímenes se encuentran por debajo del 85% de su resistencia de diseño, lo que nos indica que se encuentran fuera de las especificaciones.

Cilindro No.	σ_p (kg/cm ²)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	P (Kg)	σ (kg/cm ²)	% Resistencia
7	250	11.3	21.03	100.29	18600	185.47	74.19
7A	150	11.19	21.1	98.34	9300	94.57	63.04
8	150	11.4	21.16	102.07	9500	93.07	62.05
8A	250	11.43	20.93	102.61	22900	223.18	89.27
9	150	11.39	20.9	101.89	10200	100.11	66.74

Resistencia a la compresión simple



Antes y después de aplicar la carga de compresión.

7.3 Resistencia a la Compresión Simple en Cubos de Recubrimiento Compuesto.

Objetivo: Determinar la resistencia a la compresión en cubos hechos únicamente de recubrimiento compuesto.

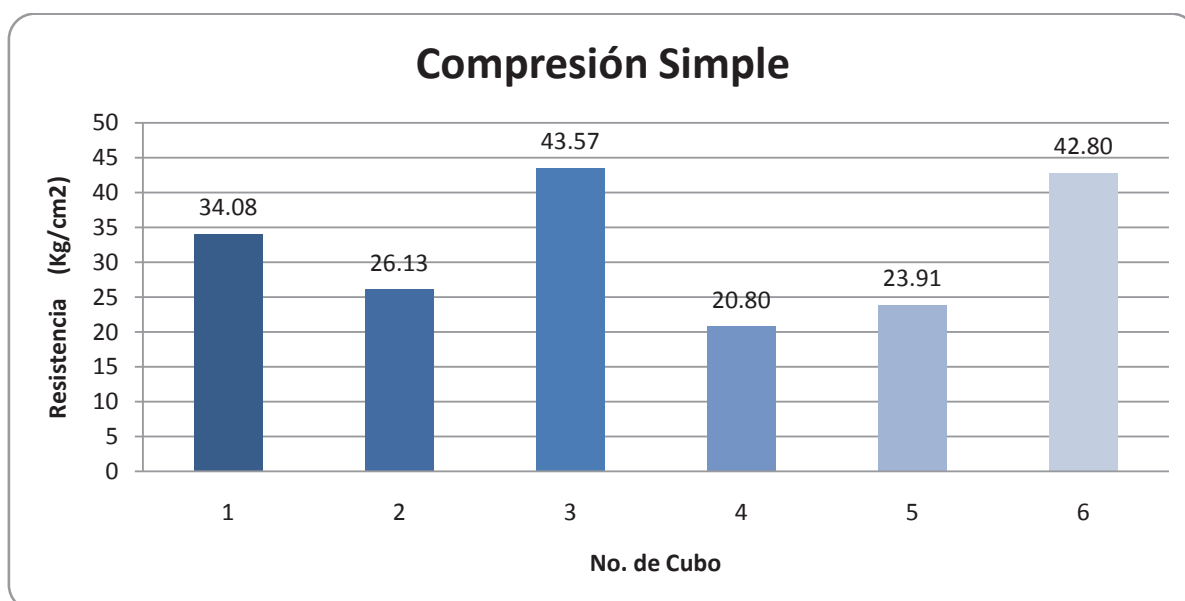
Mezcla con la que fueron hechos los cubos:

- 18 Moles
- 350% Marmolina
- 30% Látex
- 20% Micro Esfera

El procedimiento y los cálculos que se usaron para el análisis es el mismo que se sigue cuando se van a probar cubos de mortero.



Cubo No.	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (cm ²)	Carga W (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)
1	5.00	5.03	25.15	857	34.08
2	5.05	5.04	25.45	665	26.13
3	4.90	5.04	24.70	1076	43.57
4	5.03	4.91	24.70	513.6	20.80
5	4.90	4.90	24.01	574	23.91
6	4.90	5.03	24.65	1055	42.80



Estas pruebas a compresión fueron descriptivas, ya que no se cuenta con un parámetro en recubrimientos con el cual basarnos y verificar si la resistencia obtenida es aceptable.



Cubos sometidos a compresión utilizando para esto la máquina universal Forney.

7.4 Resistencia a Flexión del Concreto.

Objetivo:

Determinar la resistencia a flexión que pueden resistir las vigas realizadas.

Equipo:

- Máquina de prueba.
- Accesorios para la flexión.
- Metro.

Calculo:

Si la fractura ocurre en tercio medio del claro el modulo de ruptura se calculara con:

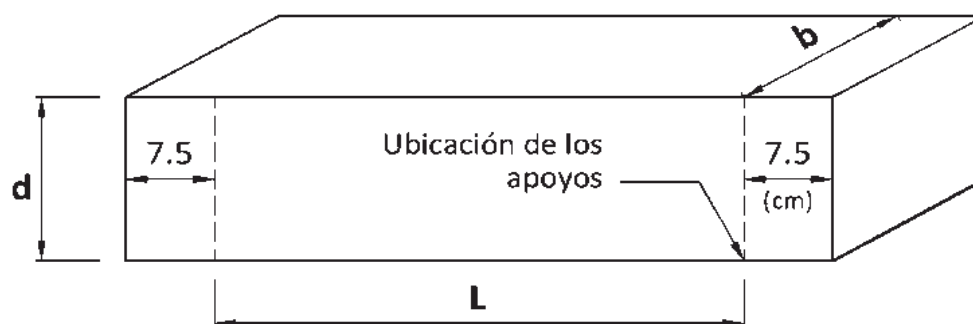
$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en no más del 5% del claro, el modulo de ruptura se calculara con:

$$R = \frac{3PA}{bd^2}$$

Donde:

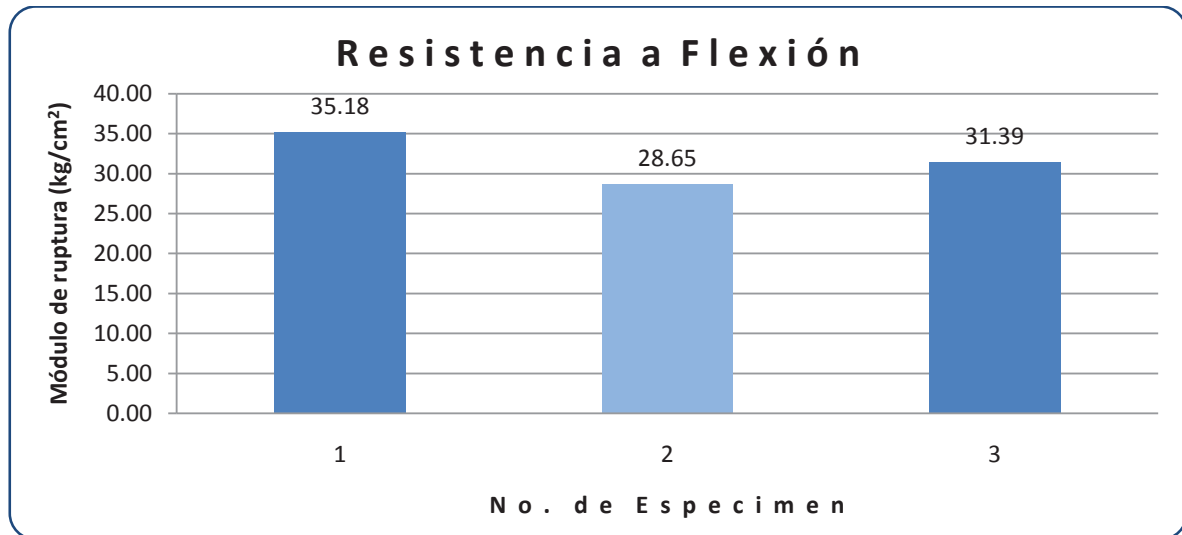
- b = Ancho promedio (cm).
- d = Peralte promedio (cm).
- L = Claro (cm).
- P = Carga de ruptura (kg).
- R = Modulo de ruptura (kg/cm^2).
- A = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano (cm).

*Resistencia a flexión del concreto.*

**La resistencia a la flexión, también llamada modulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.*

Registro:

Espécimen No.	Edad Esp. (días)	b (cm)	d (cm)	L (cm)	P (kg)	R (kg/cm^2)
1	145	14.9	14.65	45	2500	35.18
2	145	14.9	14.7	45	2050	28.65
3	145	14.9	14.55	45	2200	31.39



Los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión que se le aplicó a las vigas antes mencionadas son muy satisfactorios ya que se encuentran dentro de los parámetros reglamentarios para dicho concreto.

| 8. Evaluación de | Durabilidad

8. EVALUACIÓN DE DURABILIDAD

8.1 Prueba de resistencia al ataque de sulfatos en vigas de concreto con y sin recubrimiento.

Siguiendo las normas de la ASTM se aplico la prueba de entereza de agregados por el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio (*Standard Test Method for Soundness of Aggregates by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*) a varios especímenes de concreto.

Para la realización de esta prueba se usaron vigas de concreto con un $f'c$ de diseño igual a 250 kg/cm^2 y de dimensiones: $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}$, las cuales fueron cortadas en 8 secciones ($15 \times 15 \times 7.5 \text{ cm}$). Cuatro de estos bloques fueron recubiertos mientras que los cuatro restantes no; esto con la finalidad de observar, así como comparar el comportamiento del concreto con recubrimiento y sin recubrimiento ante el ataque de los sulfatos (Na_2SO_4).



Bloques de concreto usados en la prueba.

El recubrimiento aplicado a los bloques de concreto contaba con las siguientes características:

- 18 moles
- 30% Carbonato
- 5% Fibra
- 125% M.E.
- 20% Marmolina

8.1.1 Procedimiento de la Prueba

La prueba consistía en preparar una solución de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4). Esta se preparaba agregando una cantidad de 350 gr de Na_2SO_4 por litro de agua (se uso agua desionizada). Se agregaba la sal a el agua hasta disolverse por completo, una vez que se tenía la cantidad necesaria de solución esta se dejaba reposar durante 48 horas antes de comenzar la prueba.

Posteriormente se preparaban los especímenes y se sumergían en la solución (un bloque recubierto y uno no recubierto) durante



17 horas. Después de esto eran introducidos en el horno para ser secados a una temperatura de 110° C durante 24 hrs, para así completar un ciclo. Este procedimiento se realizó hasta completar cinco ciclos con cada espécimen.

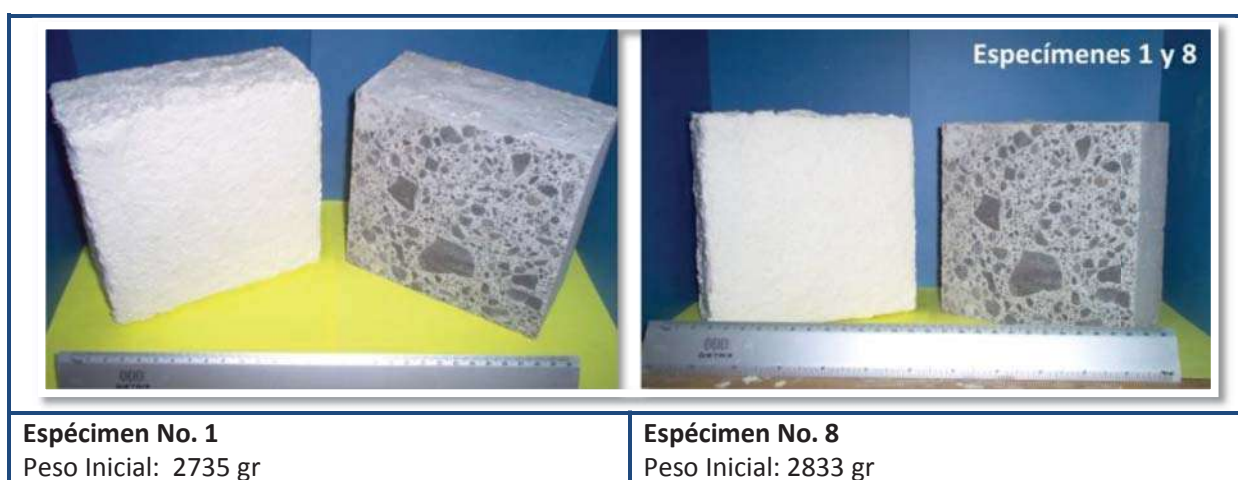


De izquierda a derecha, preparado de la solución e inmersión de los especímenes en la solución.

8.1.2 Registro de Resultados

Los especímenes se enumeraron del uno al ocho para la realización de la prueba. Los especímenes numerados del uno al cuatro no se encontraban recubiertos, mientras que los especímenes del cinco al ocho si fueron recubiertos. Se introdujo a la solución un espécimen recubierto y uno no recubierto (1 con 8, 2 con 7 y así respectivamente).

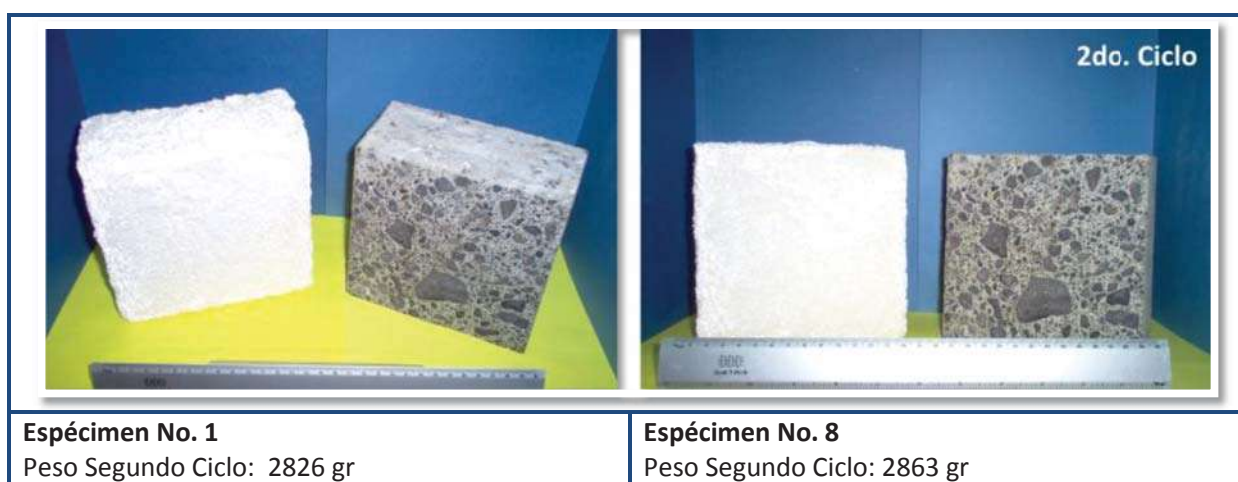
Muestras 1 y 8

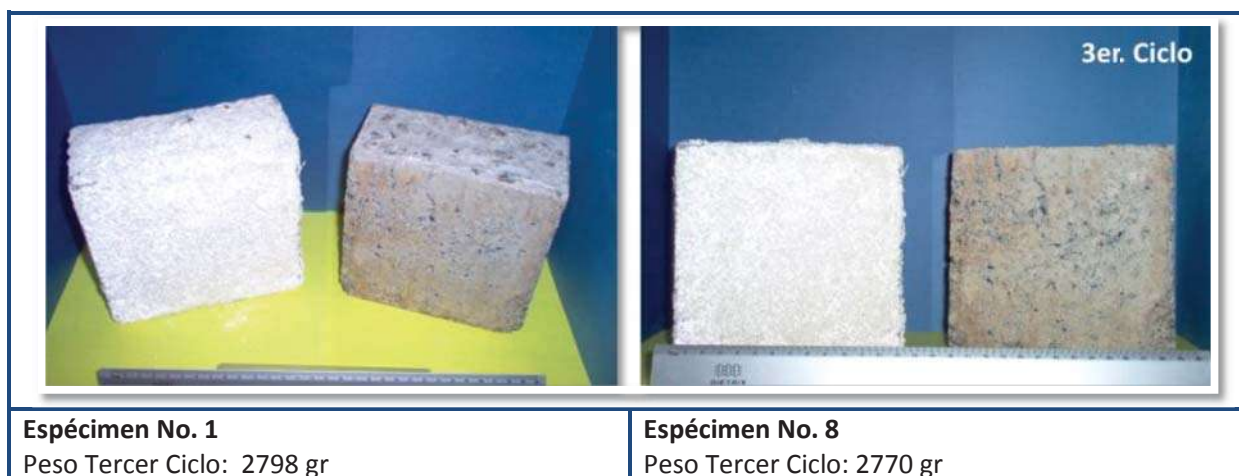
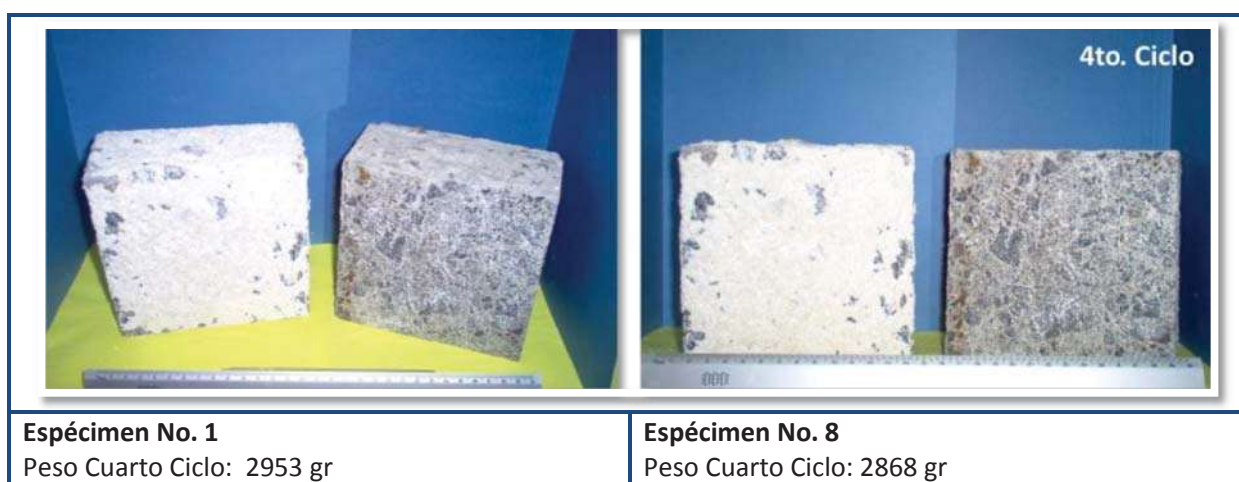


Primer Ciclo

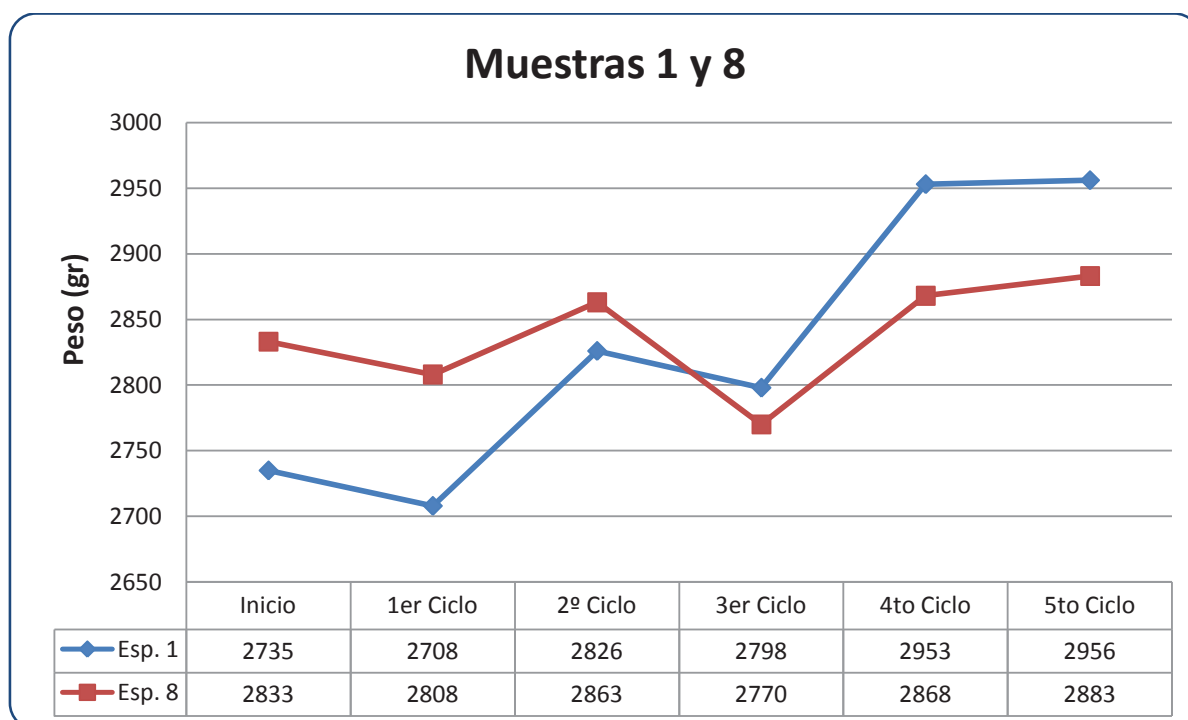


Segundo Ciclo

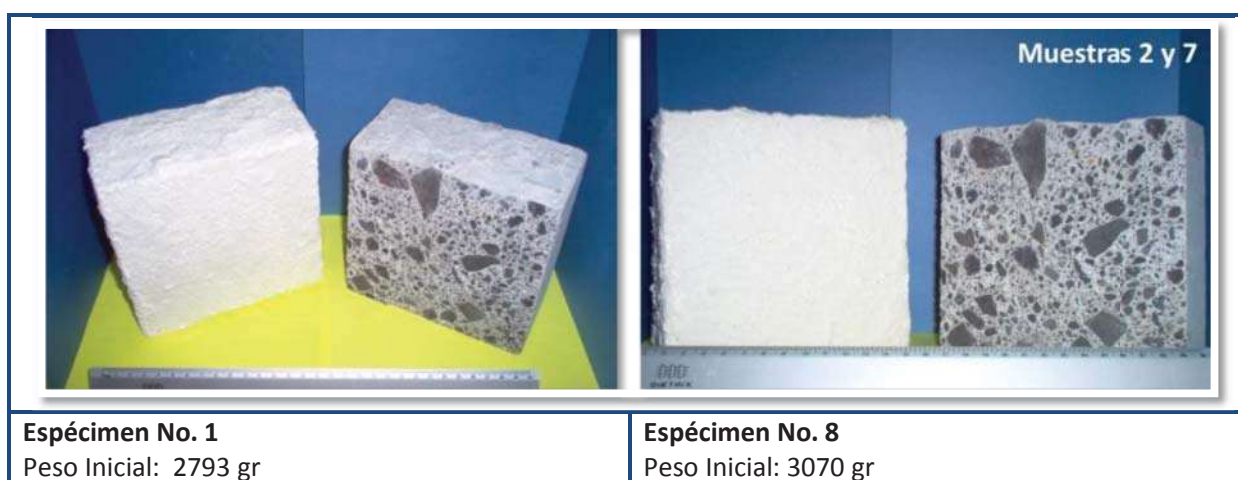


Tercer Ciclo**Cuarto Ciclo**

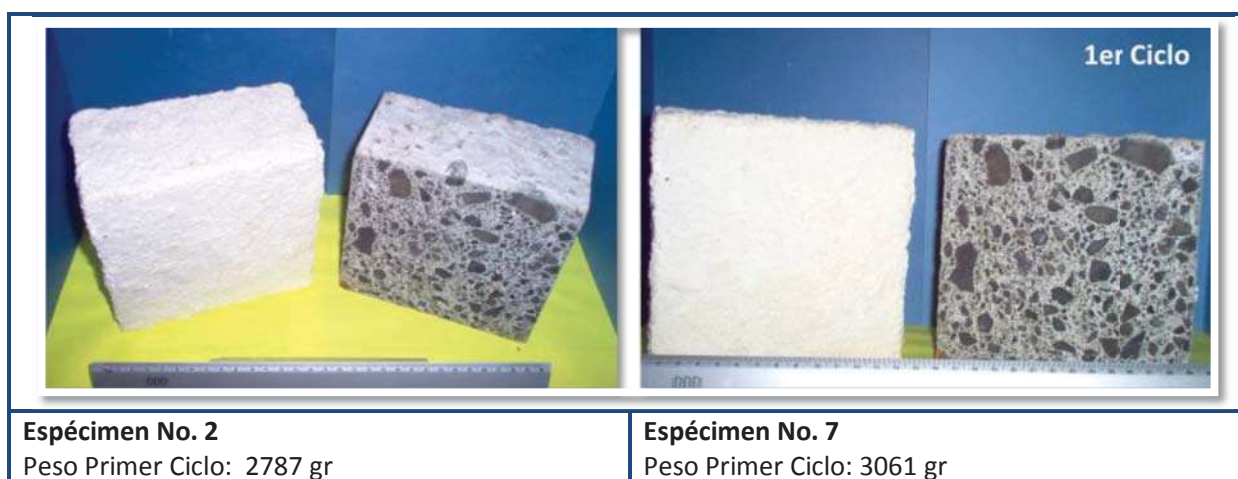
Quinto Ciclo



Muestras 2 y 7



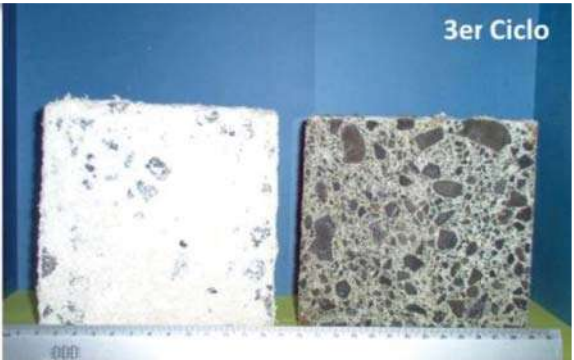
Primer Ciclo



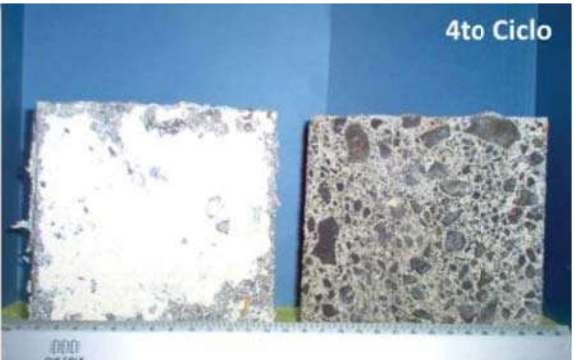
Segundo Ciclo

	
Espécimen No. 2 Peso Segundo Ciclo: 2920 gr	Espécimen No. 7 Peso Segundo Ciclo: 3128 gr

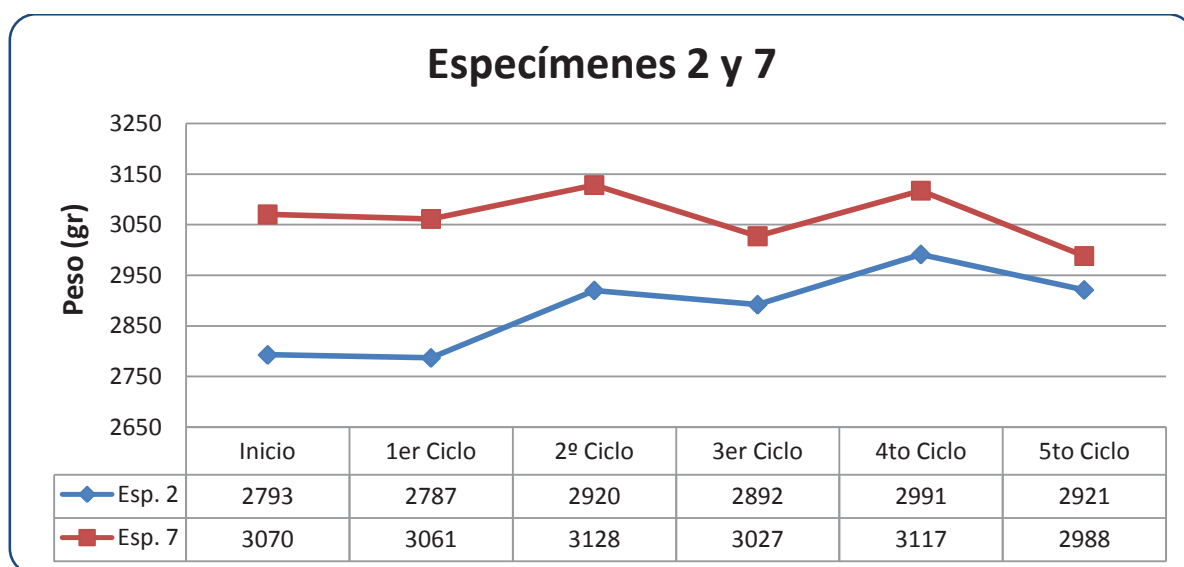
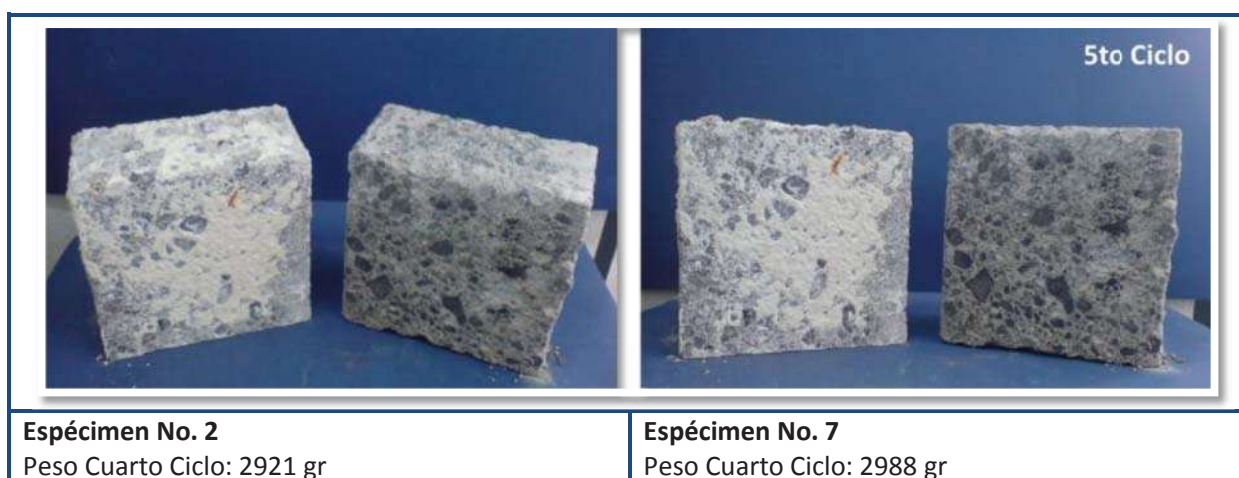
Tercer Ciclo

	
Espécimen No. 2 Peso Tercer Ciclo: 2892 gr	Espécimen No. 7 Peso Tercer Ciclo: 3027 gr

Cuarto Ciclo

	
Espécimen No. 2 Peso Cuarto Ciclo: 2991 gr	Espécimen No. 7 Peso Cuarto Ciclo: 3117 gr

Quinto Ciclo



Conclusiones:

Al obtener los resultados de las pérdidas de peso de los especímenes de concreto con recubrimiento y sin recubrimiento y plasmarlos en las graficas a lo largo de los cinco ciclos, las graficas nos muestran un comportamiento muy similar, con una disminución de peso en el primer ciclo para los dos especímenes, esto tal vez ocasionado por que los especímenes fueron pesados en su estado natural y al término del primer ciclo que fueron sacados del horno ya completamente libres de humedad se registro su peso; posteriormente un aumento considerable para el segundo ciclo y la única diferencia en el comportamiento del gráfico aparece en el último ciclo donde el peso de los especímenes 1 y 8 aumento mientras que en los especímenes 2 y 7 hubo una disminución en su peso.

9. Evaluación de Propiedades Anticorrosivas

9. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES ANTICORROSIVAS

Se le llama resistividad eléctrica al grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos. Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de la corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor.

Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$). La resistividad eléctrica de un material viene dada por la expresión:

$$\rho = R \times \frac{S}{l}$$

Donde R es la resistencia eléctrica del material, l la longitud y S la sección transversal.

La experiencia demuestra que la resistividad de un buen conductor es del orden de $10^{-8} \Omega \cdot m$. La resistividad eléctrica varía según la temperatura: normalmente, a más temperatura, más resistividad.

9.1 Prueba de Resistividad Eléctrica.

Se realizaron pruebas para calcular y determinar la resistividad eléctrica de algunos especímenes realizados en el laboratorio, estos especímenes son: cilindros de concreto con recubrimiento y sin recubrimiento y cubos hechos únicamente con la mezcla composite que usamos como recubrimiento. Las características de dichos especímenes se anexan a continuación.



Resistometro.

9.1.1 Resistividad Eléctrica en los cubos

Se calculo la resistividad eléctrica de 6 cubos con medidas de 5 x 5 aproximadamente, hechos únicamente de recubrimiento. Su resistividad fue calculada en un principio en estado seco, y posteriormente se calculo su resistividad en estado saturado.

Mezcla con la que fueron hechos los cubos:

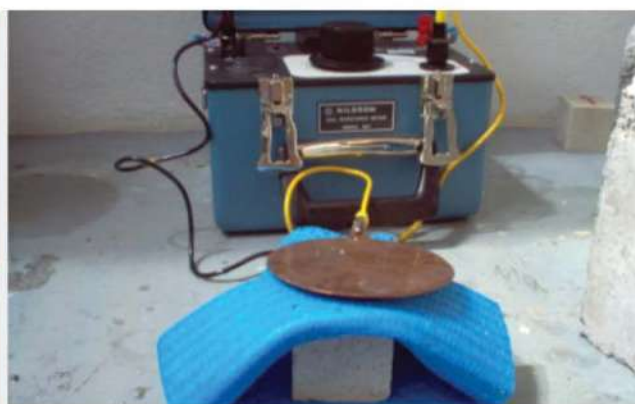
- 18 Moles
- 350% Marmolina
- 30% Látex
- 20% Micro Esfera

Los cubos que se usaron para estas pruebas fueron los mismos que se usaron en el cálculo de la resistencia a la compresión simple.



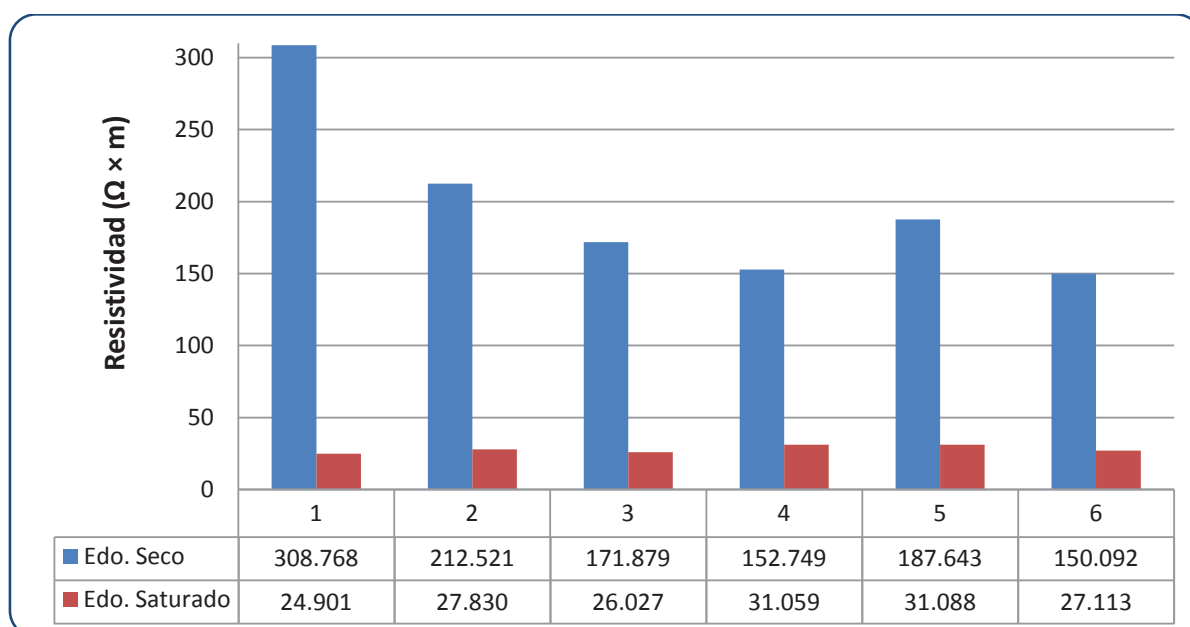
CUBOS EN ESTADO SECO

Cubo (No.)	b (cm)	b2 (cm)	L (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω × cm)	Resistividad (Ω × m)
1	5.005	5.005	5.03	25.050	6200	30876.770	308.768
2	5.05	5.05	5.04	25.503	4200	21252.083	212.521
3	4.975	4.975	5.04	24.751	3500	17187.934	171.879
4	5	5	4.91	25.000	3000	15274.949	152.749
5	5	4.97	4.9	24.850	3700	18764.286	187.643
6	4.91	4.96	5.03	24.354	3100	15009.177	150.092



CUBOS EN ESTADO SATURADO

Cubo (No.)	b (cm)	b2 (cm)	L (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad ($\Omega \times \text{cm}$)	Resistividad ($\Omega \times \text{m}$)
1	5.005	5.005	5.03	25.050	500	2490.062	24.901
2	5.05	5.05	5.04	25.503	550	2783.011	27.830
3	4.975	4.975	5.04	24.751	530	2602.744	26.027
4	5	5	4.91	25.000	610	3105.906	31.059
5	5	4.97	4.9	24.850	613	3108.786	31.088
6	4.91	4.96	5.03	24.354	560	2711.335	27.113

GRÁFICO COMPARATIVO

Resistividad Eléctrica de los Cubos (Estado Seco y Saturado).

9.1.2 Resistividad eléctrica en cilindros, con y sin recubrimiento.

Se analizaron ocho especímenes diferentes, cuatro de estos especímenes fueron recubiertos totalmente con una mezcla de recubrimiento compuesto, mientras que los cuatro restantes fueron analizados sin recubrimiento. Los cilindros que en un principio contaban con un radio de 10 cm y una altura de 20 aproximadamente fueron cortados a la mitad y así fue como se analizaron (las mitades A1 y B1 corresponden a un mismo cilindro).

Los cilindros de concreto fueron colados el 16 de agosto del 2007 con un f'_c de diseño igual a 250 kg/cm².

El recubrimiento aplicado a los especímenes contaba con las siguientes características:

- 18 moles
- 125% M.E.
- 30% Carbonato
- 20% Marmolina
- 5% Fibra



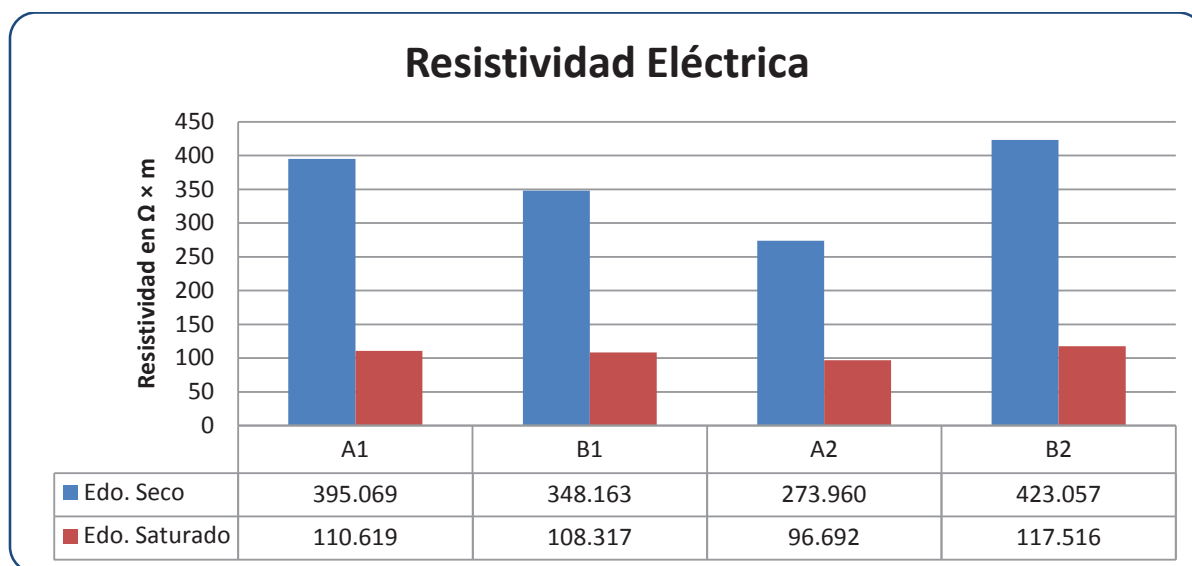
CILINDROS SIN RECUBRIMIENTO ESTADO SECO

Cilindro (No.)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω × cm)	Resistividad (Ω × m)
A1	10	9.94	78.540	5000	39506.950	395.069
B1	9.95	10.05	77.756	4500	34816.290	348.163
A2	9.95	9.65	77.756	3400	27396.031	273.960
B2	10	10.025	78.540	5400	42305.736	423.057

CILINDROS SIN RECUBRIMIENTO ESTADO SATURADO

Cilindro (No.)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω × cm)	Resistividad (Ω × m)
A1	10	9.94	78.540	1400	11061.946	110.619
B1	9.95	10.05	77.756	1400	10831.735	108.317
A2	9.95	9.65	77.756	1200	9669.187	96.692
B2	10	10.025	78.540	1500	11751.593	117.516

GRÁFICO COMPARATIVO



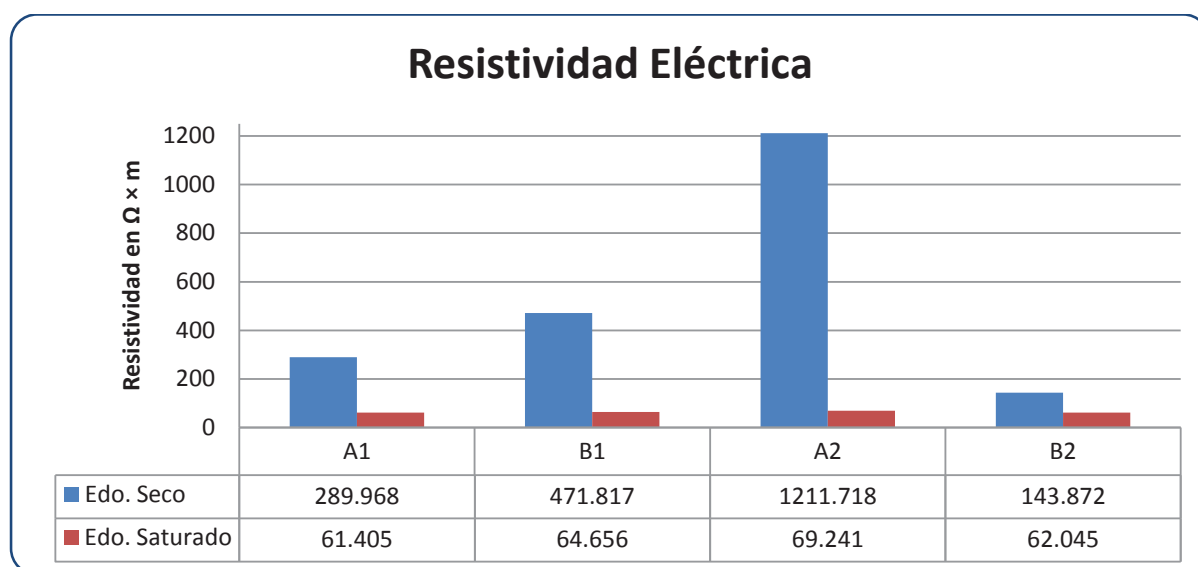
Resistividad Eléctrica (cilindros sin recubrimiento).

CILINDROS CON RECUBRIMIENTO ESTADO SECO

Cilindro (No.)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω × cm)	Resistividad (Ω × m)
A1	10.55	10.25	87.417	3400	28996.785	289.968
B1	10.6	10.1	88.247	5400	47181.745	471.817
A2	10.55	10.1	87.417	14000	121171.773	1211.718
B2	10.7	10	89.920	1600	14387.238	143.872

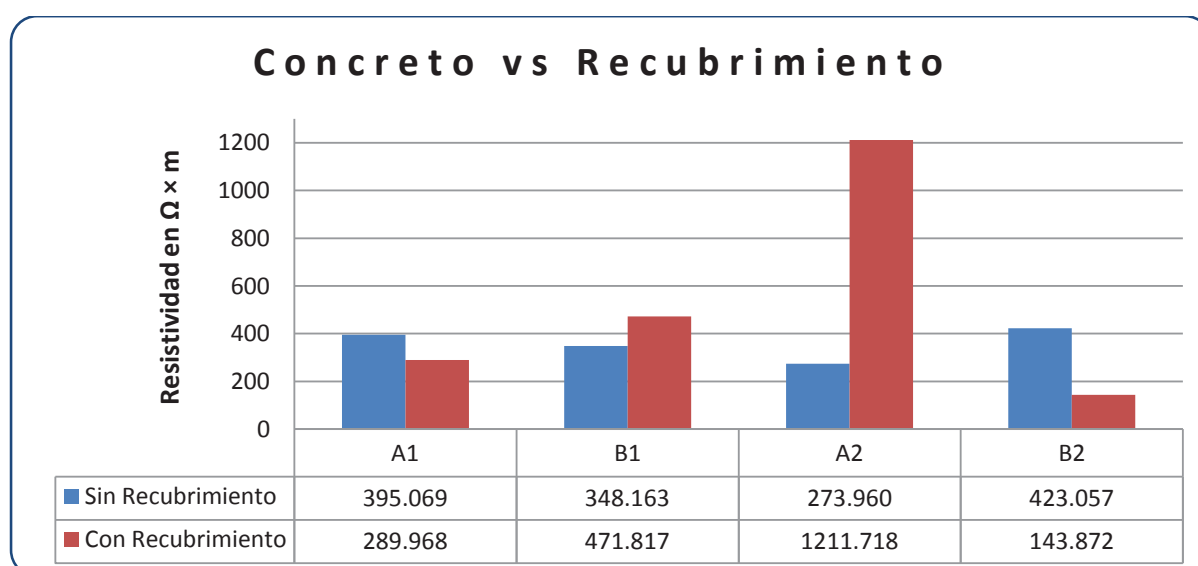
CILINDROS CON RECUBRIMIENTO ESTADO SATURADO

Cilindro (No.)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	Resistencia (Ω)	Resistividad (Ω × cm)	Resistividad (Ω × m)
A1	10.55	10.25	87.417	720	6140.496	61.405
B1	10.6	10.1	88.247	740	6465.647	64.656
A2	10.55	10.1	87.417	800	6924.101	69.241
B2	10.7	10	89.920	690	6204.496	62.045

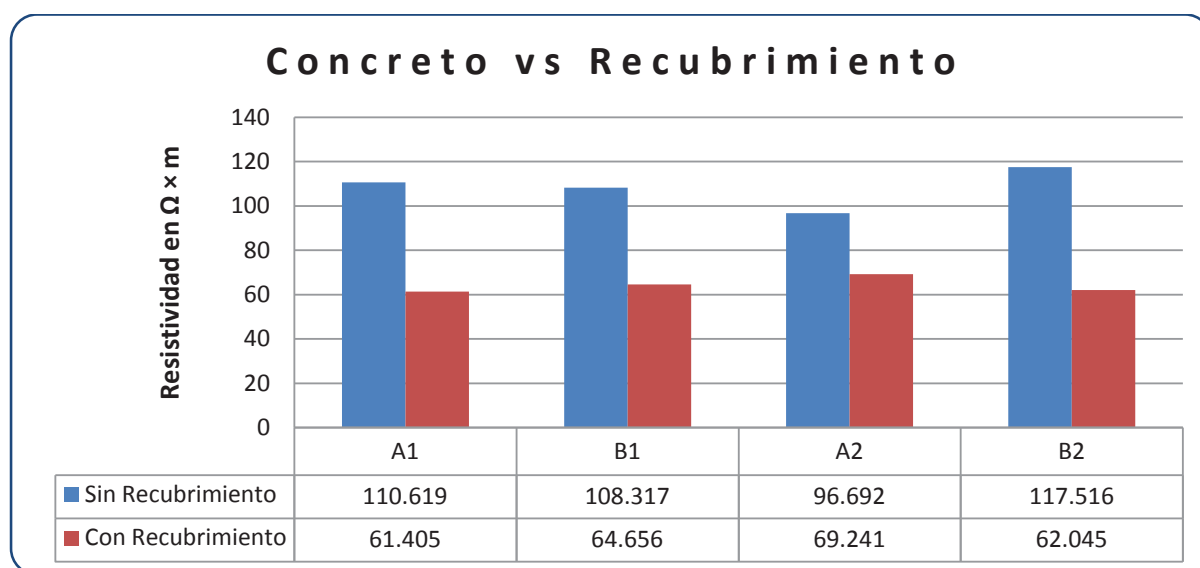
GRÁFICO COMPARATIVO

Resistividad Eléctrica (cilindros con recubrimiento).

Las siguientes dos gráficas comparan la resistividad eléctrica de los cilindros sin recubrimiento contra los que tenían recubrimiento, con los cálculos obtenidos anteriormente. El primer grafico nos muestra la comparativa de los cilindros en estado seco y la segunda en estado saturado.



Concreto vs Recubrimiento (estado seco).



Concreto vs Recubrimiento (estado saturado).

|10. Conclusiones

10. CONCLUSIONES

El diseño de un recubrimiento base o que no tuviera ningún tipo de agregado (fibra, microesfera, etc.) no fue posible durante esta investigación ya que no importando que se experimentara con diferentes relaciones molares los resultados siempre fueron los mismos: fracturas, craquelamiento y un desprendimiento total del recubrimiento con la superficie donde este era aplicado.

La inclusión de nuevos agregados a nuestra mezcla base, así como la constante experimentación con dichos agregados y la mezcla base, trajo consigo cambios totalmente favorables, cambios que se dieron tanto en la estructura física del recubrimiento como en la estructura química. Las mejoras en el recubrimiento se observaron fácilmente.

El recubrimiento diseñado con la relación molar no. 18 y al cual se le agregó un 20% de fibra molida y un 100% de microesfera presenta muy buenas características, en un futuro podría continuarse una nueva investigación únicamente con dicho recubrimiento.

La adición de agregados pétreos finos (marmolina, arena de río, arena sílica), cambio radicalmente el aspecto de nuestro recubrimiento, pero esto no es un problema ya que desde el punto de vista mercadotécnico se podría tomar ventaja de estos cambios, ya que el recubrimiento hecho con estos agregados adquiere una apariencia agradable a la vista y proporciona una mejor trabajabilidad, pero claro que para esto es necesario que se continúe con la investigación.

La adición de látex a nuestro recubrimiento y por consecuencia su transición de recubrimiento inorgánico a composite fue positiva, el látex vino a reforzar nuestra estructura y dar una mayor cohesión entre la partículas que conforman el sistema.

Sería muy prematuro decir que el recubrimiento aumenta las propiedades mecánicas del concreto ya que se realizaron muy pocas pruebas de resistencia mecánica y no podemos tomar estos resultados como un parámetro para afirmarlo.

Los ataques químicos aplicados, en este caso la prueba de entereza de agregados por el uso de sulfato de sodio que se aplicó a los segmentos de la viga arrojó resultados satisfactorios. Se aprecia un incremento de durabilidad en las muestras que se encontraban recubiertas ante el ataque de las sales debido a su cristalización interna en la matriz de los segmentos de concreto y los esfuerzos internos generados por estas.

Por medio del estudio de las propiedades eléctricas del recubrimiento se pudo determinar que se tiene un recubrimiento que disminuye drásticamente su resistividad eléctrica en presencia de agua. El recubrimiento también hace que la resistividad eléctrica del concreto disminuya en un 50% aproximadamente, cuando se encuentran en un estado saturado los especímenes; en estado seco los especímenes recubiertos se mantienen muy a la par con los especímenes no recubiertos.

Es importante mantener una alta resistividad eléctrica ya que para los aceros y metales embebidos en las matrices de concreto es bueno ya que presentarán una baja velocidad de corrosión.

Es muy recomendable que se realicen estudios del recubrimiento a largo plazo.

La investigación, experimentación y los resultados obtenidos en este trabajo servirán de base para nuevos proyectos, ya que se dejan diferentes caminos o alternativas para posteriores investigaciones, por un lado tenemos:

- Continuar experimentando con los polímeros inorgánicos en especial el recubrimiento R-18 y hacer un análisis completo de sus propiedades mecánicas, químicas y eléctricas.
- Explotar al máximo las características y propiedades del uso de agregados pétreos finos en la síntesis de nuevos recubrimientos, con el fin de diseñar un recubrimiento con características físicas agradables a la vista o de aplicación arquitectónica, propiedad importante para todo producto nuevo.
- Reanudar la investigación con los recubrimientos composites.

En toda investigación siempre hay que persistir hasta obtener los resultados deseados, es por esto que sería bueno prorrogar esta investigación hasta cumplir ese objetivo.

| 11. Referencias

11. REFERENCIAS

1. Fundación ICA. "Curso: Taller de concreto", (miércoles 22 de marzo del 2000).
2. Evolución Mineralógica del Cemento Portland durante el Proceso de Hidratación. Manuel Alejandro Giraldo M. / Jorge Iván Tobón. Revista Dyna, marzo, año/vol. 73, número 148.
3. "Building Code Requirements for Reinforced Concrete". ACI318, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
4. "Corrosion of Metals in Concrete", American Concrete Institute. Farmington Hills, MI.
5. "Control of Cracking in Concrete Structures", ACI 224R. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI.
6. "Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures", ACI 375 R, American Concrete Institute. Farmington Hills, MI.
7. Perenchio. W.F., "Corrosion of Reinforced Steel", ASTM STP 169C, 1994, pp. 164-172.
8. Whiting D., ed, Paul Klieger *Symposium on Performance of Concrete*, ACI SP-122, 1990, 499 p.
9. Berke, N.S., "Corrosion Inhibitors in Concrete", *Concrete International*. Vol. 13, No. 7, 1991, pp. 24-27.
10. Berke, N.S., Pfeifer D.W., and Weil T.G., "Protection Against Chloride Induced Corrosion" *Concrete International*, Vol. 10, No. 12, 1988, pp. 44-55.
11. "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado", IMT, Angélica del Valle Moreno / Tezozómoc Pérez López / Miguel Martínez Madrid, Publicación Técnica No. 182.
12. "Fundamentos de ciencia de materiales"
13. Parrot, L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, Julio de 1987.
14. Roberts, M.H., "Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates", BRE Information Paper, abril de 1981.
15. Campbell, D.H., R.D. Sturm y S.H. Kosmatka, "Detecting Carbonation", Concrete Technology Today, marzo de 1991.
16. Davies, H. y G.W. Rothwell, "The Effectiveness of Surface Coatings in Reducing Carbonation of Reinforced Concrete", BRE Information Paper, mayo de 1989.
17. Broomfield, J.P., "Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Report núm. 001.95, 1995.

18. Mietz, J., B.Isecke, B. Jonas y F. Zwiener, "Restoration of Reinforced Concrete Structures by Electrochemical Realkalization", Proceedings from the Third International Colloquium on Material Science and Restoration, Berlín, Alemania, 1991.
19. "Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion", International Concrete Repair Institute, 1995.
20. Chaker, V., M. Funahashi y W. Awiat, "The Use of Linear Polarization to Evaluate the Effectiveness of Membranes at the New York Trade Center", NACE Annual Conference and Corrosion Show, marzo de 1991.
21. Ingeniero Humberto Alejandro Girón Vargas - Tesina presentada en el Diplomado de Obras de Concreto que imparten la Facultad de Arquitectura de la UNAM y el IMCYC – Revista IMCYC Octubre de 1998.
22. "Ataque químico al concreto", Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capitulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto, Ing. Manuel Gonzales de la Cotera, diciembre 1991.
23. "Material Composite", http://es.wikipedia.org/wiki/Material_de_Composite.
24. G.W. DePuy, "Chemical Resistance of Concrete", Significance of tests and properties of concrete-making materials, STP 169C, ASTM, West Conshohocken, Pa., 1994, pp. 263-281.
25. ACI Committee 201, Guide to durable concrete, ACI 201.2R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills. Mich., 1992, p. 9.

Fotos e Imágenes

1. Estación Pennsylvania. <http://www.cnn.com/TRAVEL/NEWS/9803/06/penn.station/link.concourse.jpg>
2. Carbonatación, Puerto de Santander España. Interempresas.net
<http://www.plastunivers.com/gif/pc/Revista/31/r31s6f07.jpg>
3. Proceso de Fabricación del Cemento. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
www.ieca.es/fabcemento.php
4. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado, IMT, Angélica del Valle Moreno / Tezozómoc Pérez López / Miguel Martínez Madrid, Publicación Técnica No. 182
5. Evolución Mineralógica del Cemento Portland durante el Proceso de Hidratación. Manuel Alejandro Giraldo M. / Jorge Iván Tobón. Revista Dyna, marzo, año/vol. 73, número 148.