



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

Resistencia a la Corrosión de Concretos Aligerados  
con Mezclas Ternarias

**T E S I S.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

---

**DOCTOR EN CIENCIA DE MATERIALES.**

---

**PRESENTA:**

**M.I. Elva Patricia Reyes Díaz**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN.**

**EGRESADO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIA DE  
MATERIALES CON EL ACUERDO DE RECONOCIMIENTO OFICIAL  
DE ESTUDIOS 965032**

---

---

# ÍNDICE

Agradecimientos	
Listado de Figuras	i
Lista de Gráficas	iii
Lista de Tablas	v

## **Introducción**

Antecedentes	1
Planteamiento	5
Justificación	5
Objetivos	
Objetivo general	8
Objetivos particulares	8
Hipótesis	9

## **Capítulo I. Fundamentos Teóricos del Concreto**

1.1. Generalidades.	10
1.2. Concreto Aligerado.	12
1.3. Tipos de Concretos Aligerados.	13
1.3.1. Concreto de Piedra Pómez.	13
1.3.2. Concreto de Escoria de Lava Porosa.	14
1.3.3. Concreto de Globulita y Análogos.	14
1.3.4. Concreto de Espuma.	15
1.3.5. Concreto de Altos Hornos y Siderúrgica.	15
1.3.6. Concreto sin Finos.	16
1.3.7. Concreto de Pizarra y Mica Esponjada.	17
1.3.8. Concreto con Áridos Orgánicos.	18
1.3.9. Concreto de Sintoporita.	20
1.3.10. Concreto Celular.	20
1.4. Ingredientes convencionales del concreto.	21
1.4.1. Cementantes en general.	22
1.4.2. Agregados.	23
1.4.3. Agua.	24

1.5. Ingredientes no convencionales del concreto.	25
1.5.1. Ceniza Volante.	30
1.5.2. Escoria de Alto Horno.	32
1.6 <i>Corrosión en Concreto Reforzado.</i>	35
1.6.1. <i>Celda de corrosión.</i>	39
1.6.2. <i>Ingreso y ataque de iones cloruro.</i>	40
1.6.3 Factores que afectan la corrosión de acero en el concreto.	41
1.6.4. <i>Mecanismos de corrosión del acero en el concreto.</i>	42
1.6.5 <i>Técnicas electroquímicas utilizadas para el estudio de la corrosión.</i>	43
1.6.5.1 Mediciones del potencial de corrosión.	47
1.6.5.2 Resistencia a la Polarización Lineal.	48
1.6.5.3 Ruido Electroquímico.	51
1.6.5.4 Métodos de Análisis.	52

## Capítulo II. Metodología Experimental

2.1. Materiales.	55
2.1.1 .Cemento Portland Ordinario (CPO).	55
2.1.2. Ceniza Volante (CV).	56
2.1.3. Escoria de Alto Horno (EH).	56
2.1.4. Materiales reciclados.	57
<b>2.1.4.1. Piedra pómez.</b>	58
<b>2.1.4.2. Técnicas para envejecimiento de textiles.</b>	58
2.1.4.2. Polipropileno	59
2.2. Elaboración de los especímenes.	60
2.3. Métodos experimentales.	64
2.3.1. Ensayos mecánicos.	64
2.3.2. Técnicas electroquímicas.	65
2.3.3. Potenciales de corrosión.	65
2.3.4. Ruido electroquímico.	67
2.3.5. Resistencia a la Polarización Lineal.	68

## Capítulo III. Resultados y discusión

3.1. Resistencia Mecánica.	69
3.2. Técnicas Electroquímicas.	72
3.2.1. Potenciales de Corrosión.	72
3.2.2. Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)	81
3.2.3 Ruido Electroquímico (RE).	84
3.2.3.1 Análisis visual de las series de tiempo	83
3.2.3.2 Análisis estadístico de las series de tiempo.	91
3.2.3.3 Análisis de la morfología por el método estadístico	96

---

---

## **Capítulo IV. Conclusiones y Recomendaciones**

4.1. Conclusiones	97
4.2. Recomendaciones	100

## **Capítulo V. Referencias**

5.1. Referencias	101
------------------	-----

---

---

## Listado de Figuras

**Figura 1.1.** Adiciones minerales para el concreto con cemento Portland.

**Figura 1.2.** Ampliación de cenizas volantes.

**Figura 1.3.** Fenómeno de corrosión en estructuras de concreto reforzado. a) estructura intacta, b) estructura manchada y corroída

**Figura 1.4.** Formación de la pila de corrosión.

**Figura 1.5.** Proceso de corrosión en el acero de refuerzo. Como proceso electroquímico, existen reacciones anódica  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  y catódica  $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$  y un flujo de electrones del ánodo al cátodo.

**Figura 1.6** Relación entre las áreas corroídas (ánodo) y sanas (cátodo) del refuerzo, el proceso de corrosión puede darse como una microcelda a), o macrocelda b).

**Figura 1.7** Diagrama de Técnicas Electroquímicas (Termodinámica y Cinética).

**Figura 1.8.** Curva típica de la técnica de resistencia a la polarización lineal

**Figura 1.9.** Ruido electroquímico del acero de refuerzo en cloruro de sodio (NaCl) al 3.5%

**Figura 2.1.** Ceniza Volante (CV)

**Figura 2.2.** Escoria de Alto Horno (EH)

**Figura 2.3.** Costal polipropileno

**Figura 2.4** Deshilado y corte del costal

**Figura 2.5.** Elaboración de especímenes, moldes metálicos

---

**Figura 2.6.** Especímenes para ensayar propiedades mecánicas

**Figura 2.7.** a) Materiales en seco y b) Materiales mezclados

**Figura 2.8** Muestras cilíndricas, medidas y acomodo de acero de refuerzo

**Figura 2.9.** Elaboración de especímenes (cilindros)

**Figura 2.10** Acero pre oxidado y acero limpio(normal)

**Figura 2.11.** Voltímetro, MC MILLER

**Figura 2.13.** Potenciostato/Galvanostato/ZRA

**Figura 3.1.** Espécimen 1 normal.

**Figura 3.2.** Espécimen 24 oxidado.

**Figura 3.3.** Estimaciones de la velocidad de corrosión. Criterio DURAR

**Figura 3.4** Arreglo experimental de la técnica de Ruido Electroquímico

---

## Listado de Gráficas

**Gráfica 3.1.** Resistencia a la compresión de concretos aligerados a 28 días

**Gráfica 3.2.** Potenciales de corrosión del espécimen F1-F6, con relación pómez-agregado calizo y Polipropileno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

**Gráfica 3.3.** Potenciales de corrosión del espécimen F7-15, con relación piedra pómez-agregado calizo y escoria de alto horno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

**Gráfica 3.4.** Potenciales de corrosión del espécimen F7-15, con relación Polipropileno, agregado calizo y escoria de alto horno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

**Gráfica 3.5.** Potenciales de corrosión del espécimen F34-F42, con relación piedra pómez-agregado calizo y ceniza volante. a) acero limpio y b) acero preoxidado

**Gráfica 3.6.** Potenciales de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias y con acero limpio

**Gráfica 3.7.** Potenciales de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias y con acero preoxidado.

**Gráfica 3.8.** Resistencia a la Polarización Lineal de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado.

**Gráfica 3.9.** Velocidad de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado.

**Gráfica 3.10** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 2 con acero limpio

**Gráfica 3.11** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 2 con acero preoxidado

---

**Gráfica 3.12** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 5 con acero limpio

**Gráfica 3.13** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 5 con acero preoxidado

**Gráfica 3.14** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 12 con acero normal

**Gráfica 3.15** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 12 con acero preoxidado

**Gráfica 3.16** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 24 con acero normal

**Gráfica 3.17** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 24 con acero preoxidado

**Gráfica 3.18** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 39 con acero normal

**Gráfica 3.19** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 39 con acero preoxidado

**Gráfica 3.20** Resistencia de ruido electroquímico  $R_n$ .

---

## Listado de Tablas

**Tabla 1.1.** *Clasificación del cemento Portland*

**Tabla 1.2.** Componentes de las Cenizas Volantes

**Tabla 1.3.** Criterio de evaluación de potenciales de media celda.

**Tabla 1.4.** Clasificación de los valores de  $i_{\text{corr}}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) en términos de vida útil (Red DURAR).

**Tabla 2.1.** *Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto para los testigos.*

**Tabla 2.2.** Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto con la adición de aditivos

**Tabla 3.1.** Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto con la adición de aditivos

**Tabla 3.2.** Criterio de Evaluación del nivel de corrosión

**Tabla 3.3** Resultados de ruido electroquímico

**Tabla 3.4.** Tipo de corrosión en función del índice de localización

**Tabla 3.5** Resultados del Índice de Localización para las formulaciones de concretos aligerados con mezclas ternarias.

---

# INTRODUCCION

## ***Antecedentes***

El concreto es un material al que se le ha dado gran importancia en la construcción de ciudades desde las primeras civilizaciones por sus excelentes características de trabajabilidad, economía, facilidad de adquisición y por sus excelentes propiedades mecánicas.

Es el material más usado en todo el mundo, principalmente en la industria de la construcción de edificios, lo cual genera un elevado impacto ambiental que debe ser mitigado desde el diseño del material, su producción y hasta su aplicación en las construcciones (Villas, 1995).

El uso del concreto a alcanzado un gran empuje en los últimos años, esto es debido a que es un material muy versátil, con características únicas, que no pueden ser igualadas por otro material, entre las que cabe destacar su buena resistencia a las acciones mecánicas, buena durabilidad al agua y agentes ambientales, facilidad de adaptarse a cualquier forma y dimensiones de los elementos estructurales, durable en el tiempo.

Se dice que es versátil porque puede realizarse variando su mezcla y dosificación, utilizando diversos agregados, aglutinantes e incluso diversos

---

---

aditivos a las mezclas; y es durable porque su vida útil puede prolongarse por décadas si cuenta con un buen diseño del material, y si está alejado en lo más posible de agentes corrosivos tanto externos como internos en determinada aplicación (Comisión Federal de Electricidad, 1997).

Desde tiempos inmemorables el hombre ha edificado construcciones para resguardo propio o con propósitos sociales o religiosos. Los egipcios empleaban lodo del río Nilo para sus construcciones; no obstante, las bajas temperaturas que podían lograr sólo les permitían usar materiales de poco valor cementoso sin resistencia a la humedad. Los romanos descubrieron la tecnología de los materiales llamados “puzólanicos”: para producir sus cementos mezclaban cal con cenizas que provenían de un lugar llamado Pozzouli.

Muchas de las edificaciones de los romanos se mantienen todavía en pie, lo que refleja el alto nivel de su tecnología aun para la actualidad. En la edad media se perdió tanto la inercia del desarrollo como muchos de los conocimientos de los romanos y no fue sino hasta el siglo XIX que se trabajó intensamente en muchas investigaciones (predominantemente empíricas) en la búsqueda de nuevos materiales para construcción. La patente de lo que hoy se conoce como cemento Pórtland se otorgó a J. Aspin en 1824 en Inglaterra.

En la actualidad se pueden apreciar grandes estructuras que después de más de 2000 años de existencia se conservan en buenas condiciones, se puede considerar pues al concreto como un material tan durable como la piedra natural cuando se conserva en ausencia de agentes agresivos químicos, físicos o biológicos.

Además de los ingredientes de la mezcla de concreto en sí misma, será necesario un refuerzo de acero para construir estructuras sólidas, el cual puede ser de alta o baja resistencia, características que dependerán de las dimensiones y la resistencia que se requieran.

---

El inicio del concreto armado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX, con la introducción del acero como material de refuerzo del concreto, hecha por Lambot en 1855 en la construcción de barcos de ferrocemento; ya en 1897 Hennebique construyó la primer estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña, en el Molino de Weaver (Castro-Borges et al, 2001).

En construcciones de concreto, el propio peso por lo común representa una proporción muy grande de la carga total de la estructura, y una ventaja considerable representa reducir la densidad del concreto (Neville, 1998).

El concreto estructural ligero (liviano) es un concreto similar al concreto de peso normal, excepto que tiene una densidad menor (1350 a 1850 kg/m<sup>3</sup>) (Kosmatks, Kerkhoff, 2004). Se le produce con agregados ligeros o con una combinación de agregados ligeros y normales, o a través del procesamiento de otros tipos de materiales, tales como escorias y piedra pómez natural (Kosmatks, Kerkhoff, 2004) o artificial, y en la actualidad con el uso de materiales de desecho de uso común o industrial.

Durante mucho tiempo se ha buscado que los productos hechos por el hombre tengan una larga vida útil, y este es por supuesto el caso de las obras de ingeniería donde interviene el acero, tanto en estructuras metálicas como en estructuras de concreto reforzado con acero, sin embargo presentan el inconveniente de ser susceptibles a fallar por corrosión. El problema de la degradación de las estructuras de concreto debido a procesos de corrosión es serio y de implicaciones económicas mayores (Del Valle Moreno, 2001).

El fenómeno de la corrosión disminuye considerablemente las propiedades físicas de estructuras elaboradas de concreto reforzado tales como puentes, pavimentos, obras de drenaje en carreteras, etc.; por lo que es necesario hacer investigaciones a fondo, que ayuden a tratar de generar nuevos materiales o

---

---

reemplazar los comúnmente usados, por otros materiales que tengan propiedades físicas y económicas mejores a los usados generación tras generación, con la finalidad de incrementar la vida útil de tales estructuras, y que la sociedad mexicana se vea beneficiada en este aspecto

Sin embargo a lo largo de los años la presencia de la corrosión ha venido siendo uno de los fenómenos a vencer, para lograr que las estructuras alcancen por lo menos la vida útil de diseño en muchas obras de ingeniería, ya que los daños ocasionados por la corrosión son muy graves y se valúa en miles de millones de dólares en todo el mundo.

El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural (Del Valle Moreno, 2001).

En la actualidad se realizan investigaciones relacionadas con la durabilidad del concreto reforzado, todo con el fin de tener obras de mejor calidad, con propiedades físicas buenas, y mejores propiedades químicas, minimizando la presencia del fenómeno de la corrosión en el acero de refuerzo, y todas las ventajas que ello conlleva.

Actualmente se emplean como material cementante alternativo las escorias de alto horno y la ceniza volante, que son desecho industrial, estos materiales generan una gran preocupación en sectores industriales y en la población en general, ya que se desechan grandes cantidades de los mismos, lo que agrava el problema medioambiental. Por lo tanto, genera una gran preocupación la gestión, reciclado y aprovechamiento de dichos materiales. Tratando de dar respuesta a éstos problemas, se propone aprovechar estos residuos industriales, incorporándolos como material en la industria de la construcción.

---

---

## ***Planteamiento***

Por lo anterior, la presente investigación se enfoca a mejorar los concretos aligerados y con adición de aditivos cementantes, cuyas materias primas son residuos o desechos de diversas industrias o de origen volcánico, las cuales además de ser económicas, pueden generar concretos aligerados de alta calidad, con propiedades químicas mejores y buenas propiedades físicas, así como lograr la disminución de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en estos concretos.

En esta tesis se planteo elaborar un concreto en el que parte del cemento portland (CP) es sustituido por cierto porcentaje de materiales alternos (ceniza volante (CV) y escoria de alto horno (EH)), generando mezclas ternarias, en las que además se agregan como aligerantes materiales de re-uso, como la piedra pómez (material de desecho del lavado de la mezclilla) y las fibras de polipropileno (material obtenido de costales); que son subproductos industriales y de uso común. Se analiza y evalúa la resistencia a la corrosión en los sistemas acero-concreto, mediante la medición de potenciales de corrosión y ruido electroquímico.

## ***Justificación***

El incorporar materiales cementantes suplementarios al cemento Pórtland y elaborar mezclas ternarias, presenta grandes ventajas, debido a que pueden desarrollar excelentes propiedades mecánicas y características de larga durabilidad (Núñez et al. 2005).

Con el diseño de mezcla se pueden obtener concretos con un amplio rango de propiedades, ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales

---

---

empleados, los agregados especiales (ligeros o pesados), y los aditivos (plastificantes, micro sílice, ceniza volante, etc.) (Nilson, 1999)

Algunos investigadores como Halit Yaz et al. (Halit Yaz et al. 2005) y Hinczack et al. (Hinczack et al., 1990, 1992) han llegado a la conclusión de que éstos materiales mejoran la resistencia a la compresión del concreto; también se han encontrado beneficios con el uso de mezclas de EH y CV, para retardar los efectos de la carbonatación.

El uso de materiales cementantes alternos en los concretos está otorgando un alto valor agregado al realizar la construcción. El sustituir cemento por un material cementante como la ceniza volante que es un desecho de la industria carboeléctrica, y escoria de alto horno, desecho inmenso de la industria siderúrgica, permite generar grandes ahorros económicos, beneficios ecológicos y elaborar concretos con mejores propiedades; además si el concreto se aligera se pueden facilitar los procedimientos de colocación, y buscar nuevas aplicaciones.

En la industria de la construcción se utilizan gran diversidad de materiales, por tanto, es necesario tomar medidas para disminuir el consumo de recursos naturales e iniciar el uso de materiales que puedan reusarse y tengan un comportamiento aceptable dentro de esta industria.

El concreto a base de cemento pórtland es percibido como un material verde (ambientalmente amigable) en relación con otros materiales de construcción. Sin embargo, mucho hay que hacer para reducir grandemente el impacto ambiental de la industria del concreto (Mehta, 2001). La industria del concreto globalmente podría consumir de 8 a 12 millones de toneladas anuales de agregados naturales después del año 2010 (Loh, Randers et al. 1998).

La industria de la construcción es responsable de (Oikonomou, 2005):

- Tomar el 50% de las materiales en bruto de la naturaleza.

- 
- Consumir el 40% del total de energía.
  - Crear el 50% del total del desperdicio.

La producción de cemento en el mundo actual es de 6.1 billones de toneladas, lo que representa alrededor del 7 por ciento global de emisiones de dióxido de carbono dentro de la atmósfera. Producir una tonelada de cemento pórtland requiere de alrededor de 4 GJ de energía, y la manufactura de clínter de cemento pórtland emite aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono dentro de la atmósfera (Malhotra, 1999; Mehta, 1999).

Muchos países en el mundo comienzan a incluir prácticas sustentables en sus procesos de producción industrial, y en la creación y mantenimiento de ciudades, debido a los problemas que se han generado de contaminación ambiental y degradación del ambiente (Wilson, 1998).

El diseño sustentable en arquitectura y construcción es un proceso de creación en el cual se establecieron criterios de desarrollo sustentable como: reducción de gastos en los recursos naturales empleados, disminución de contaminación al suelo, aire y agua; reducción de los desperdicios y desechos generados tanto en el proceso constructivo, del mantenimiento y de fin de vida útil del edificio, así como de la reducción de los desperdicios industriales generados por fabricación de materiales constructivos y equipos de edificios (Spiegel, 1999).

En relación a esto último, es importante establecer algunas estrategias de diseño sustentable para disminuir el impacto ambiental causado por los materiales desde su extracción, transporte, producción y aplicación en la industria de la construcción; además ayuda a la disminución de los costos y genera un impacto positivo al sector socioeconómico y no sólo al ambiental (Hernández-Moreno, 2008).

---

---

# OBJETIVOS.

---

## Objetivo general

Estudiar la durabilidad y el comportamiento a la corrosión en el acero de refuerzo en concretos ternarios aligerados adicionados con materiales de desecho industrial y de uso común como la ceniza volante (CV), la escoria de alto horno (EH) y como aligerantes la piedra pómez del lavado de la mezclilla y fibra sintética de costales

## Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades mecánicas del mortero elaborado con agregado reciclado: resistencia a la compresión y tensión a los 28 días de curado.
- Emplear técnicas electroquímicas como medición de potenciales y ruido electroquímico para evaluar la resistencia a la corrosión de los concretos adicionados con ceniza volante y escoria de alto horno, y aligerados con materiales de desecho.
- Determinar el comportamiento de la corrosión de los concretos en estudio, determinando sus mecanismos de corrosión y el tipo de ataque.

---

---

## ***HIPÓTESIS.***

---

La adición de materiales cementantes como ceniza volante y escoria de alto horno en sustitución de cemento Portland genera concretos de buena calidad debido a que la ceniza y la escoria forman la fase puzolánica, importante en las propiedades físicas dentro de un concreto aligerado con materiales de desecho; sustituyendo determinada cantidad de cemento por otros materiales (mezclas ternarias), se disminuye el impacto ambiental mediante la selección, aplicación, reuso y reciclado de materias primas en la elaboración del concreto, ya que minimiza en su fabricación el consumo de energía y las emanaciones de CO<sub>2</sub> al ambiente, así como la extracción de materiales naturales.

---

# CAPITULO I.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CONCRETO

### 1.1. Generalidades

El concreto es un material durable y resistente, pero dado que se trabaja de manera fluida, prácticamente puede adquirir cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material tan popular para exteriores.

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 generalmente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una mezcla de concreto, se introduce de manera simultanea 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 (Díaz, 1973):

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida
2. La calidad propia de los agregados
3. 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, 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 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, dependen 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.

## **1.2. Concreto Aligerado**

El concreto normal presenta el inconveniente de su elevada densidad, que penaliza los pesos propios de la estructura. Por ello, en distintas épocas se ha buscado hacerlo más ligero con la utilización de agregados ligeros, naturales o artificiales. Hay precedentes históricos como la cúpula del Panteón, en Roma del siglo II A.C., de 44,0 m de diámetro, en donde se empleó piedra pómez como agregado de la mezcla.

Pasando a épocas actuales, en 1917 se produjeron en Estados Unidos agregados ligeros en hornos rotatorios por expansión de arcillas y pizarras que, entre otras cosas, se emplearon en calzadas de puentes y cascos de buque, experimentando dicha tecnología un fuerte desarrollo en los años cincuenta, debido a la construcción de rascacielos (Wilson, 1981).

Aunque los agregados ligeros pueden ser naturales, los concretos ligeros se basan en agregados fabricados industrialmente, por expansión, en hornos de arcilla o pizarra, en general, con lo que se logran unas propiedades definidas y fiables (Negri, 1974). La expansión crea un agregado que encierra cantidades variables de aire en su interior y que proporciona ligereza (densidades aparentes

---

---

entre 300 y 800 kg/m<sup>3</sup>), y elevados valores de aislamiento térmico y acústico. La ligereza de los agregados se traduce en la del concreto con ellos fabricado, que oscila entre 1,000 y 2,000 kg/m<sup>3</sup> para el concreto ligero estructural (Virella, 1977), alcanzando sin embargo, resistencias elevadas que permiten el pretensado e incluso su calificación como concreto de alta resistencia (> 50 MPa).

Lydon (Lydon, 1976), comenta que para la fabricación de estos concretos se precisa tener en cuenta, en lo que a dosificación respecta, los fenómenos de desecación por absorción de agua durante el mezclado, transporte y vertido, que afectarían la trabajabilidad, aunque un exceso de agua perjudicaría el aislamiento térmico y podría permitir la flotación del agregado grueso, más ligero, debido a la vibración. El bombeo también es un tema para estudiar, debido a que la presión introduce agua de la mezcla en el agregado, secándola, con el peligro de que se forme una obstrucción en la tubería. Se necesita un curado más intenso que con el concreto normal, ya que el calentamiento de fraguado es mayor, debido a la menor masa presente y menor conductividad térmica (Alonso, 1979).

### **1.3. Tipos de Concretos Aligerados**

#### **1.3.1. Concreto de Piedra Pómez.**

Estas son rocas comunes de origen volcánico que son lo suficientemente fuertes y ligeras para utilizarse como agregado de peso ligero. Su ligereza se debe al hecho de ser lavas esponjosas, cuyas celdas se formaron por los gases que escapaban cuando se encontraban aún en estado derretido. La pómez es de color tenue o casi blanco, y tiene una textura bastante uniforme de pequeñas celdas interconectadas, de bajo peso específico aparente y con pesos específicos reales alrededor de 2,40 kg/dm<sup>3</sup>.

Presenta algunos inconvenientes como su alto grado de absorción, altos costos de explotación, de adecuación y de transporte. La resistencia de los

---

---

concretos producidos con piedra pómez es moderada y sus retracciones altas y lentas (persisten hasta pasados unos meses). La resistencia a la compresión a los 28 días varía entre 39 y 140 kg/cm<sup>2</sup>, según el tipo de muestra. Es empleado para el moldeo in situ de paredes y en la construcción de concreto armado (Marulanda, *et al*, 1979).

### **1.3.2. Concreto de Escoria de Lava Porosa.**

Es una piedra eruptiva de color pardo o rojizo de una estructura de poros grandes y de forma irregular que no están conectados. Se presenta, parte en trozos grandes, parte en forma de nódulos mayores o menores. Los concretos de escoria de lava son en su mayoría poco propensos a la retracción. La absorción de agua es más reducida que en el concreto de pómez; y la desecación debido a su porosidad más gruesa, tiene lugar con mayor rapidez que en el concreto de piedra pómez. Su densidad oscila entre los 700 y 1,500 kg/m<sup>3</sup>. Presenta facilidad para ser trabajada y buen comportamiento frente a las altas y bajas temperaturas. Lo mismo que el concreto de pómez natural, también el concreto de escorias de lava porosa es empleado para el moldeo in situ de paredes y para la fabricación de bloques y placas de concreto ligero (Marulanda, *et al*, 1979).

### **1.3.3. Concreto de Globulita y Análogos.**

La globulita es un concreto de bolas huecas de arcilla, utilizadas como árido. Las bolas huecas de arcilla tienen un diámetro exterior de 20 mm y un hueco de 14 mm de diámetro, estando constituidas por arcilla cocida, de superficie porosa, que hace las veces de gravilla en el concreto.

Según Vásquez y colaboradores, (Vásquez *et al*, 1983) en los concretos confeccionados con este árido, las bolas de arcilla están totalmente rodeadas de mortero, dando origen a los concretos normales de globulita con pesos específicos aparentes de 1,6 a 1,8 kg/dm<sup>3</sup>. Cuando se limita la cantidad de mortero de cemento y sólo se desea confeccionar concreto de grano homogéneo llamado de globulita, aislante, éste está soldado o aglomerado únicamente por puntos y tiene

---

---

pesos específicos aparentes de 0,9 a 1,2 kg/dm<sup>3</sup>, y resistencias a la compresión de 30 a 60 kg/cm<sup>2</sup>.

La fabricación de las esferas huecas de arcilla no resulta barata y el gran volumen de huecos en las bolas no es nada ventajoso desde el punto de vista térmico. Se han conocido nódulos cerámicos (sin huecos grandes), que luego se han cribado y dosificado por tamaños. Estos nódulos, indudablemente más baratos, permiten la confección de concreto de granos homogéneos ideales y muy convincentes. Acoplando esta idea con el principio de la arcilla esponjada, pueden reducirse todavía considerablemente, sin duda, los pesos específicos aparentes del concreto de grano homogéneo.

#### **1.3.4. Concreto de Espuma.**

En el concreto de espuma los poros de forma celular se forman por sustancias espumosas añadidas al concreto fluido, al igual que en el concreto gaseoso. En el mercado hay un gran número de materias generadoras de espuma, y entre ellos figuran emulsiones con las que se obtienen los más diversos efectos. En total se puede hoy fabricar concretos de espuma de peso específico aparente comprendido entre 0,5 y 1,6 kg/m<sup>3</sup>. Una de las sustancias generadoras de espuma es la iporita (León N., 1986).

#### **1.3.5. Concreto de Altos Hornos y Siderúrgica**

Al tener el hierro fundido en el alto horno, por cada 1,000 toneladas de fundición se obtienen 700 toneladas de escoria. Según el tratamiento del baño fundido después de la colada de alto horno, la escoria que se obtiene es la escoria compacta, la escoria esponjosa o pómez siderúrgica, la arena de escoria granulada, o bien la lana de escoria, que es de estructura fibrosa. Exceptuando esta última que se emplea como aislante térmico, todas las otras variedades de escoria de altos hornos se emplean para preparar concreto (Calleja, 1995).

La forma o variedad básica más importante para la fabricación de concreto ligero es la escoria espumosa o esponjosa de altos hornos; antes se denominaba

---

---

pómez artificial, actualmente se denomina pómez siderúrgica. La escoria fundida incandescente se envía a unos dispositivos especiales con ruedas espumadoras, tornillos esponjadores o cubetas, donde se ponen en contacto con el agua, con lo cual se enfrían violentamente y se contraen quedando solidificada con poros de tamaño mediano y grande.

Hay tipos muy ligeros y poco resistentes que sirven principalmente para aislamientos, y otras variedades bastante sólidas y muy resistentes, con pesos específicos mayores, que dan concretos ligeros que pueden soportar cargas. La piedra pómez siderúrgica es el árido apropiado para la fabricación de bloques esponjosos siderúrgicos, que aglomerados con cal o cemento, y endurecidos al aire, con vapor o con gas carbónico, proporcionan resistencias de 20 a 30 kg/cm<sup>2</sup> (Longo, *et al*, 1986). También se utiliza para el moldeo in situ de paredes, la fabricación de bloques y placas de concreto ligero.

### **1.3.6. Concreto sin Finos**

El término concreto sin finos generalmente se refiere a un concreto común de cemento y sólo agregado grueso, y el producto que se forma contiene muchos huecos uniformemente distribuidos en su masa. El hecho de que solamente se eliminen los agregados finos no es suficiente para obtener este tipo de concreto; es necesario que el agregado grueso sea preferiblemente de un sólo tamaño, entre 1 y 2 cm (Rueda, 1988). No son recomendables los agregados triturados con bordes agudos ya que pueden producirse aplastamientos locales bajo carga.

La densidad de los concretos sin finos es aproximadamente de 2/3 partes en relación a un concreto normal hecho con el mismo agregado. La pasta de cemento no debe constituir un relleno, sino formar, solamente, una delgada película en toda la superficie de los granos con el fin de asegurar la adherencia entre ellos. Velazco, (Velazco, 1984) asegura que la adherencia entre los granos también depende de la relación agua/cemento, puesto que si es muy alta, la pasta de cemento tenderá a apartarse de las partículas del agregado, mientras que si es

---

---

demasiado baja, la pasta de cemento no tendrá suficiente adherencia y no se logrará la compactación adecuada.

El concreto sin finos tiene la ventaja de poder prepararse en todo lugar; se necesita un curado húmedo con el fin de evitar la evaporación de agua necesaria para el fraguado normal del cemento. Debido a su alta absorción de agua no es recomendable para utilizarlo en elementos expuestos al agua a menos que se utilice un revoque o enlucido debidamente impermeabilizado.

### **1.3.7. Concreto de Pizarra y Mica Esponjada**

Cuando se cuecen los residuos de la pizarra para cubiertas, por ejemplo, en el horno rotativo a unos 1000°C, se hinchan fuertemente en dirección a sus planos de formación, a modo de un acordeón, lo que implica una notable disminución del peso específico aparente respecto del que tenían los residuos de pizarra, resultando así un producto que contiene una gran cantidad de cavidades diminutas, lo suficientemente ligero para flotar en el agua.

La resistencia obtenida de los concretos con agregados de pizarras expandidas es comparable a la de otros concretos ligeros de densidades semejantes, mientras que la contracción por secado es mejor que para la mayoría de los concretos ligeros. De acuerdo con la dosificación este concreto tiene densidades entre 560 y 1,360 kg/m<sup>3</sup>, con resistencia a la compresión a los 28 días entre 14 y 281 kg/cm<sup>2</sup> (Mena, 1982).

También los desperdicios de mica pueden esponjarse cociéndolos a temperaturas de unos 1000°C. Se produce así la llamada mica esponjada que en muchos sitios se denomina vermiculita. Es un material muy ligero pero extraordinariamente blando, que con su tamaño granulométrico del orden de una arena, sirve principalmente para enlucidos especiales; los concretos ligeros de mica esponjada requieren dosis de cemento relativamente elevadas y, además, sus resistencias a la compresión son casi siempre muy moderadas.

---

---

### 1.3.8. Concreto con Áridos Orgánicos

Los materiales orgánicos naturales que se han utilizado como agregados incluyen desperdicios de varios tipos de cosechas, principalmente las cáscaras de arroz, la viruta de madera y el aserrín.

Vásquez, (Vásquez et al, 1983) asegura que los problemas que hay que resolver para poder acceder a la fabricación de concretos de viruta de madera se refieren a:

1. La elección del cemento.
2. La elección de la viruta de madera.
3. El tratamiento previo de dicha viruta.
4. Las proporciones más convenientes de la mezcla.
5. La compactación.
6. El tratamiento ulterior (curado y almacenado).

El concreto de viruta de madera tiene una característica que no suele ser corriente en el campo de los concretos: en los casos de resistencias bajas y medias, las resistencias a la compresión y a la flexotracción son casi iguales.

La elevada retracción de las masas aglomeradas con cemento hace arriesgar el empleo del concreto de viruta de madera para construcciones monolíticas in situ. Pueden emplearse satisfactoriamente para la construcción de paredes y tabiques, en los forjados de techos y pisos, y en las placas de revestimiento de paredes.

Mediante el prensado de productos compactos, se emplean también para productos de pavimentos. Es condición necesaria para una aplicación satisfactoria que los productos de concreto de viruta de madera hayan sido sometidos a tratamientos térmicos de curado.

---

---

Al aserrín aglutinado con cemento no se le conoce como concreto sino que por alguna razón se le llama cemento de aserrín. No obstante que el aserrín consiste en gran parte de celulosa, también contiene azúcares solubles, ácidos, aceites, resinas, ceras y otras sustancias orgánicas en distintos grados, de acuerdo con la naturaleza del tronco del cual se obtuvo. Algunos de estos aserrines tienen un efecto determinado sobre el fraguado y el endurecimiento del cemento. En el mejor de los casos esto conduce a una incertidumbre sobre las propiedades del producto, pero en el peor de ellos se pueden obtener propiedades tan pobres como para ser virtualmente inservibles. Por esta razón, se han registrado muchas patentes a través de los años sobre los métodos de pretratamiento del aserrín. Estas pueden agruparse como sigue (Arango, 1990):

1. Tratamientos en donde intervenga una oxidación parcial de la madera (incluyendo una carbonización parcial).
2. Tratamientos diseñados para impermeabilizar la madera y prevenir la acción del solvente.
3. Tratamientos diseñados para impermeabilizar con álcali o para tratar con sulfatos.
4. Como adjunto de cualquiera de los anteriores, hay un tratamiento del cemento para acelerar el fraguado, esto es, para originar que el mecanismo del fraguado se inicie antes de que la solución de ingredientes dañinos en la madera haya alcanzado una etapa en la cual el cemento se afecte.

La mayoría de los aserrines de maderas suaves se vuelven compatibles con el cemento si se usa como aglutinante en una mezcla de cemento y cal. El cemento de aserrín se ha utilizado para acabados de pisos sin juntas y para ladrillos pre colados para pisos; su uso en unidades de muros y techos ha tenido gran éxito en los diseños donde es posible tener una libertad de movimiento, tal como las estructuras prefabricadas a base de tableros colados entre los postes. De acuerdo a las proporciones de la mezcla en volumen, se han encontrado densidades del concreto de aserrín entre 640 y 1,600 kg/m<sup>3</sup>, con resistencias a la compresión a los 28 días entre 18 y 352 kg/cm<sup>2</sup>.

---

### 1.3.9. Concreto de Sintoporita

En la fabricación de ácido fosfórico se produce un material parecido a las escorias férricas de alto horno. Es un producto fundido de silicato cálcico. Enfriado normalmente da lugar a la variedad compacta denominada "sintolita", árido propio para el concreto pesado u ordinario; la sintoporita es el material adecuado para la fabricación del concreto ligero.

En las proporciones de mezcla de 1:6 hasta 1:10 partes en volumen, las resistencias a la compresión en probeta cúbica a la edad de 28 días varían entre los 30 y 60 kg/cm<sup>2</sup>, para pesos por unidad de volumen del concreto de 0,95 a 1,20 kg/dm<sup>3</sup>. La densidad del agregado de sintoporita varía, según sea el grado de asentamiento, entre 870 y 1,150 kg/m<sup>3</sup> para grano fino (1 mm) y entre 500 y 800 kg/m<sup>3</sup> para grano grueso (3 a 4 mm). La densidad del concreto ligero con sintoporita oscila entre 950 y 1,200 kg/m<sup>3</sup>. Pertenece al grupo de concretos ligeros de pequeña retracción (0,3 a 0,4 mm/m). La absorción del agua del grano de sintoporita es pequeña, por consiguiente se comporta bien ante las heladas y el fuego.

### 1.3.10. Concreto Celular

El tipo más ligero de concreto es el concreto gaseoso o celular. Se produce cuando a la pasta de un concreto fino y de una consistencia fluida se le agrega un agente de esponjamiento (agente dilatador) antes de que fragüe, que hincha la pasta. Tal agente de esponjamiento es hoy en día casi exclusivamente el polvo de aluminio, el cual produce gas hidrógeno.

En el campo de los concretos gaseosos se ha procedido a una cierta ordenación según su tratamiento ulterior:

1. El concreto endurecido con vapor a presión.
2. El concreto endurecido a temperatura elevada con vapor sin presión.

---

### 3. El concreto endurecido al aire.

González (González, 1963), afirma que para lograr una completa eficacia en la fabricación, además del gas que ha de producirse en el seno de la masa blanda, hay que cumplir con ciertos requisitos. La arena tiene que contener una elevada proporción de fracciones muy finas; por lo menos de un 20 a un 30%; y la masa fresca tiene que tener una consistencia fluida pero viscosa. Ambas son necesarias a fin de que el gas dilatante no halle excesiva resistencia ni tampoco pueda escaparse fácilmente a la atmósfera.

Los límites extremos de los pesos específicos aparentes son los de 0,38 a 1,6 kg/dm<sup>3</sup>; los de las resistencias a la compresión, 20 y 150 kg/cm<sup>2</sup>, aproximadamente.

#### **1.4. Ingredientes convencionales del concreto.**

El concreto es, por naturaleza, un sistema heterogéneo constituido esencialmente por una matriz endurecida en la que se sitúan internamente partículas o fragmentos de agregados. Como para su amasado es necesaria la mezcla del cemento con el agua, el resultado es un material que presenta una estructura porosa, la cual desempeña un papel muy importante en la determinación de las propiedades mecánicas y de la durabilidad del concreto (Sanjuán, 2001).

El concreto fresco es una mezcla fluida de cemento Pórtland, arena (agregado fino), grava o piedra triturada (agregado grueso) y agua. Mediante un proceso llamado hidratación, las partículas del cemento reaccionan químicamente con el agua y el concreto se endurece, y se convierte en un material durable.

Cuando se mezcla, se hace el vaciado y se cura de manera apropiada, el concreto forma estructuras sólidas capaces de soportar las temperaturas extremas

---

---

del invierno y del verano sin requerir de mucho mantenimiento. El material que se utilice en la preparación del concreto afecta la facilidad con que pueda vaciarse y con la que se le pueda dar el acabado; también influye en el tiempo que tarde en endurecer, la resistencia que pueda adquirir, y lo bien que cumpla las funciones para las que fue preparado.

#### **1.4.1. Cementantes en general.**

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire. Los principales cementantes hidráulicos son las cales y cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas. De acuerdo con el grado de poder cementante y los requerimientos específicos de las aplicaciones, estos cementantes pueden utilizarse en forma individual o combinados entre sí.

Al referirse específicamente al concreto convencional, como se emplea en la construcción, resultan excluidas las cales hidráulicas, por lo cual solo procede considerar los cementos, las escorias, los materiales puzolánicos y sus respectivas combinaciones.

El cemento es uno de los ingredientes que se usan para elaborar concreto. Sus primeros usos datan de los inicios de 1800 y, desde entonces, el cemento Pórtland 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 Pórtland, 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.

De acuerdo a la norma ASTM C150, el cemento Portland se clasifica en los siguientes tipos (Tabla 1.1):

**Tabla 1.1. Clasificación del cemento Portland**

CEMENTO	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS
Tipo I	Normal	De uso general
Tipo IA*	Normal inductor de aire	
Tipo II	De resistencia moderada a los sulfatos	Uso como precaución en el ataque moderado de sulfatos
Tipo IIA*	De resistencia moderada a los sulfatos, inductor de aire	
Tipo III	De alta resistencia a edad temprana	Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas.
Tipo IIIA*	De alta resistencia a edad temprana, inductor de aire	
Tipo IV	De bajo calor de hidratación	Se usa para mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación. Desarrolla resistencia a velocidad muy baja
Tipo V	De resistencia elevada a los sulfatos	Se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos

El endurecimiento del cemento se logra mediante la mezcla de éste con el agua. Esto resulta en la formación de productos de hidratación que poseen cualidades gigantes y baja solubilidad en agua (las estructuras de cemento pueden subsistir aun bajo el agua).

#### 1.4.2. Agregados

La producción de los agregados naturales se hace, por lo general, mediante la explotación o mediante la extracción mecánica o manual de estos materiales pétreos; actividades que generan un gran impacto en el ambiente por el desgaste del recurso suelo y por la alteración del paisaje y de la calidad del aire y agua, en algunos casos (Serrano Guzmán, 2011).

---

En relación con los agregados, éstos pueden provenir de diferentes fuentes (canteras y fuentes superficiales), y ser obtenidos por diferentes mecanismos de explotación (extracción mecánica o voladura); la proporción de agregados oscila entre setenta a ochenta por ciento de la mezcla que se prepare (ASTM, 1994). La forma, textura y angularidad entre otras características del material pétreo tienen especial efecto en la resistencia y durabilidad del concreto (Al-Rousan et al., 2007; Serrano, 2010 a, b; Serrano y Pérez, 2010). El proceso de obtención de los agregados puede alterar las características de los mismos así como también el comportamiento de la interfase agregado-pasta comprometiendo de esta forma las propiedades mecánicas de la mezcla final

En el concreto los agregados (una mezcla íntima de grava de diversos tamaños), se encuentran unidos por la pasta de cemento, y deben tener una buena resistencia mecánica, además de conocerse su origen geológico para establecer su reactividad potencial cuando formen parte del concreto.

Una adecuada granulometría resulta esencial para conseguir un concreto de adecuada compacidad. Parámetros tales como el coeficiente de forma y distribución del tamaño de partículas (curva granulométrica), influyen directamente en la resistencia, compacidad y docilidad del concreto, y por tanto, en su durabilidad.

El agregado no actúa, en principio, de forma activa en el desarrollo microestructural de la pasta de cemento a edades cortas; siendo su interfase con la pasta lo que resulta crucial. Los agregados tienen una permeabilidad del mismo orden que la pasta, si bien no se considera, en general, que los agresivos puedan penetrarlos; sin embargo, tanto la permeabilidad al aire como al agua se ve afectada por el tipo de agregado empleado. De los agregados son, en particular, la distribución granulométrica, su forma y rugosidad superficial los parámetros que afectarán el empaquetamiento de las partículas y, por tanto, a la compacidad o menor penetrabilidad del concreto.

---

---

Con respecto a la durabilidad intrínseca de los agregados, el problema más importante que pueden presentar es su posible reactividad con los componentes de la pasta, ya sea por la presencia de sílice reactiva, sulfuros u otros compuestos que pueden inducir la formación de productos expansivos que creen tensiones internas desencadenantes de fisuras que favorezcan luego la penetración de agentes agresivos (Sanjuán, 2001).

### **1.4.3. Agua**

La calidad del agua es importante, ya que las impurezas que contenga pueden interferir el endurecimiento del cemento, afectar negativamente la resistencia del concreto u ocasionar el manchado de su superficie, así como llevar a la corrosión del refuerzo. Por estas razones, debe evaluarse su conveniencia para fines de mezclado y curado (Neville, 1998).

El agua, utilizada para mezclado, normalmente pudiera ser apta para consumo humano, siendo requerido un control en cuanto a sedimentos, cloruros y sulfatos, entre otras características químicas. La hidratación completa del cemento Portland necesita alrededor del 40% de su peso de agua. Un 23 por ciento del agua se combina químicamente para dar productos de hidratación, y el resto se adsorbe en la superficie del gel. La cantidad de agua añadida inicialmente a la mezcla de agregados y cemento para obtener un concreto de docilidad conveniente es siempre superior a la cantidad de agua necesaria para la hidratación completa, es decir, se emplean relaciones agua/cemento superiores a 0,4 (ACI C-211, 1970). Esta agua en exceso constituye la fase acuosa contenida en los poros del concreto y es la responsable de la formación de la red de poros en el concreto endurecido.

Las aguas potables en general son válidas para amasar siempre y cuando no superen unos límites máximos de pH (5), sulfatos (1g/l ó 5g/l con cemento sulfato resistente (SR)), cloruros (3 g/l para concreto armado y 1 g/l para pretensado), sustancias solubles (15 g/l) y sustancias orgánicas (15 g/l).

---

La presencia de agua o humedad es el factor individual más importante que controla los diferentes procesos de deterioro del concreto, excluyendo los daños mecánicos. El transporte de agua en el concreto está determinado por el tipo y la distribución del tamaño de poros. Igualmente, la composición química de la fase acuosa existente en el interior de los poros es de vital importancia desde el punto de vista electroquímico, por ser el medio electrolítico conductor en los procesos de corrosión del refuerzo (Sanjuán, 2001).

### ***1.5. Ingredientes no convencionales del concreto***

El principal gas emitido por los procesos industriales es el CO<sub>2</sub>, que en el año 2002 representó el 90 por ciento de las emisiones con 47,069 Gg. Las emisiones aumentaron un 5 por ciento con respecto al año 1990 debido a la mayor producción de cemento, a una mayor utilización de piedra caliza y de dolomita, y a un incremento en la producción de materias primas de productos y derivados siderúrgicos del país (INEGEI, 2002).

En los últimos años, en los países más industrializados surge cierta preocupación respecto de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Fernández, Jiménez; 2008). La fabricación de clinker Portland componente principal del cemento Portland implica una transformación química de materias primas en un horno a elevadas temperaturas. Este proceso genera importantes cantidades de CO<sub>2</sub>.

La producción en la industria del cemento aumentó de manera constante de 1990 a 2001, impulsada sobre todo por la demanda de EU, que creció 40 por ciento, mientras la producción se elevó 27 por ciento. La producción aumentó 38 por ciento en Canadá y 25 por ciento en México en el mismo periodo. Ello ha resultado en aumentos significativos de las importaciones estadounidenses de México (353

---

---

por ciento) y Canadá (689) de cemento y clinker (preceemento) (Ramachandran, 1995). Según cifras de la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM), la producción de cemento en México en el 2007 fue de 38,8 millones de toneladas apoyada por el auge en la construcción de vivienda en el país (O. Rendón, 2008).

Los materiales no convencionales tienen cabida como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Portland. Parte de la generación de CO<sub>2</sub> viene de des-carbonatación del CaCO<sub>3</sub> que representa alrededor del 80 por ciento de la materia prima (0,3 kg CO<sub>2</sub> /kg cemento). El uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar parcialmente tal situación, por otro lado, es posible usar cenizas y escorias como materias primas.

La generación de sub-productos industriales es en la actualidad uno de los problemas más apremiantes, por lo que su gestión, reciclado y aprovechamiento constituyen el principal reto a resolver por los países productores. Una de las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos industriales, es su incorporación a los materiales de construcción y concretamente al cemento, dando lugar a un nuevo tipo de cemento denominado “cemento compuesto” (A. Kihç, 2003), o “cemento de adición” (M.D. Thomas, 1999).

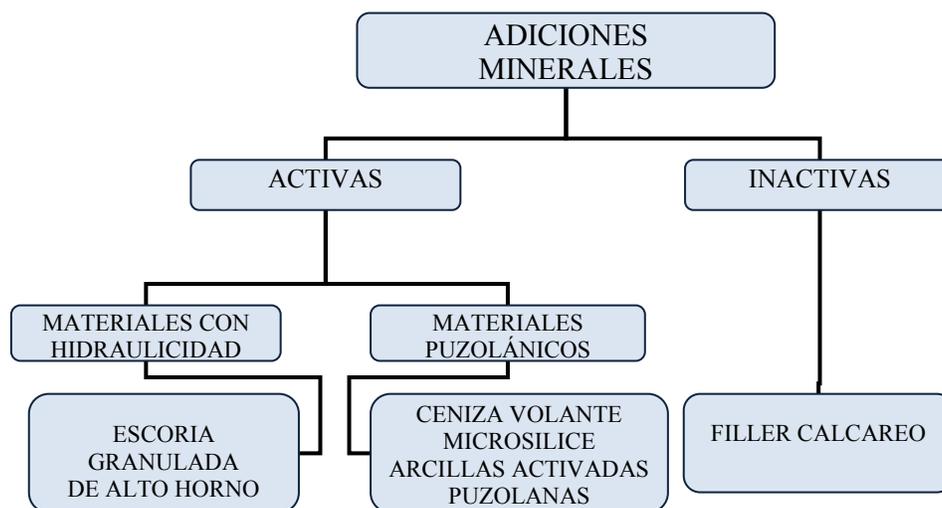
Las ventajas de este tipo de cemento incluyen, además del aumento de las prestaciones tecnológicas del material acabado, razones de carácter económico (E.C. Higginson, 1962), por el remplazo en porciones significativas de cemento se produce un abaratamiento del coste de producción (Tae-hyun Ha, 2007; Xinghua Fu, 2002), al reducir importantes cantidades del clíinker puro de cemento por la adición del subproducto industrial y, razones de tipo ecológico por los graves problemas que el almacenamiento de dichos productos originan en el entorno medio-ambiental.

Entre las adiciones minerales (ver figura 1.1) se puede diferenciar las adiciones minerales activas e inactivas, donde las primeras presentan la

capacidad de formar productos de hidratación similares a los que se producen durante la hidratación del clinker Portland, mientras que las inactivas, si bien no presentan esta capacidad, suelen mejorar otras propiedades como la trabajabilidad y la resistencia temprana.

Entre las adiciones minerales activas, se encuentran las adiciones puzolánicas entre las que se pueden nombrar las puzolanas naturales, las cenizas volantes (fly ash), microsílíce (silica fume) o arcillas activadas entre otras, que presentan la capacidad de hidratarse combinándose con la cal libre que se produce durante la hidratación del cemento Portland “puro” (clínker más pequeñas cantidades de yeso).

Por otro lado, existe otro tipo de adición mineral activa que presenta la capacidad de hidratarse y formar productos SCH (silico-calcáreos-hidratados) llamada de hidraulicidad latente como es la escoria granulada de alto horno. Esta última reacción necesita, para producirse con cierta velocidad, del ambiente altamente alcalino generado debido a la presencia de cal producida por la llamada hidratación primaria.



**Figura 1.1.** Adiciones minerales para el concreto con cemento Portland.

---

---

El comportamiento de los cementos compuestos es favorable en lo referente a la durabilidad en ambientes agresivos y la reducción del calor de hidratación. Sus inconvenientes se encuentran en la disminución de las resistencias iniciales, mayor exigencia de agua de mezcla y acentuada desecación, que requiere de un cuidadoso curado. En general, se reconoce que para el desarrollo de estos cementos, se requiere de un importante esfuerzo de investigación científica y tecnológica.

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno y la microsílíce son los principales materiales finamente divididos que se utilizan actualmente en el concreto. Los efectos que provocan la ceniza volante y la escoria, en las propiedades, son también aplicables a los cementos mezclados (ASTM C-595) que hace uso de estos materiales.

Se han hecho estudios para determinar la conveniencia del uso de materiales reciclados como agregados en el concreto (Halverson, 1981, y Buck, 1976). Tal utilización es muy deseable tanto económica como ecológicamente, pero debe tenerse gran precaución al considerar agregados reciclados. Los escombros de las construcciones pueden contener cantidades perjudiciales de ladrillo, vidrio y yeso, y cualquier concreto reciclado puede contener agregados reactivos o de calidad pobre, o altos contenidos de cloruros.

Los agregados hechos de los desechos municipales o industriales (escorias distintas de las provenientes de altos hornos de acero), reciclados, o los materiales marginales pueden poseer cierto número de cualidades físicas y químicas indeseables (ACI, 2001). Las dosificaciones de prueba, las pruebas extensas, los análisis químicos y petrográficos y los registros locales de comportamiento son de vital importancia en la toma de decisiones con respecto a su uso. En general, los materiales reciclables deben evaluarse y especificarse de acuerdo con ASTM C 33, excepto cuando la composición indique la necesidad de mayores requisitos específicos (Frondistou-Yannas 1980).

---

### 1.5.1. Ceniza Volante

Las cenizas volantes son residuos abundantísimos de las centrales termoeléctricas que consumen carbón. Parte del combustible no combustiona completamente y es arrastrado con los gases de combustión y se separa en el electrofiltro o el filtro de mangas. Su composición química depende, básicamente, de la naturaleza del carbón usado.

Los carbones naturales suelen estar asociados a restos de la roca madre que sirvió de lecho durante su formación. Por tanto cuando se extrae el carbón también se incorpora una cantidad de material inorgánico procedente de la roca originaria. Según la naturaleza de la roca, los elementos contaminantes serán diversos. Ello explica la gran cantidad de variedades en la caracterización de cenizas volantes. En cualquier caso la presencia de  $\text{SiO}_2$  está asegurada, puesto que este componente es el origen de todos los silicatos o mineral esencial de las rocas (Castells, 2000).



**Figura 1.2.** Ampliación de cenizas volantes.

Desde el punto de vista físico-químico su estructura es, esencialmente vítrea debido a las altas temperaturas a las que se ha generado. Este residuo está constituido por finas partículas que salen de la caldera arrastradas por los gases quemados. Las cenizas constituyen un 10% del carbón quemado, estas pesan  $500\text{g/m}^3$ , se trata de un polvo finísimo con un tamaño de grano que varían desde menos de una micra hasta alcanzar 100 micras, teniendo un tamaño típico de

---

---

partícula de 20 micras. Sólo del 10 al 30 por ciento de las partículas (en peso) son mayores en el orden de 45 micras, lo que le proporciona una superficie específica de entre los 3,000 a 5,000 cm<sup>2</sup>/g. Debido, a su naturaleza, y a su gran superficie específica se les denominan también puzolanas artificiales, ya que al activarlas con lechada de cal y agua tiene lugar la reacción puzolánica que da lugar a un producto estable. Esta importante propiedad se utiliza para adicionar cenizas volantes a la composición de un concreto estructural de cemento Portland (Castells, 2000).

De acuerdo a la norma ASTM C-618, y la ACI 116-R, las cenizas volantes son residuos finamente divididos que se obtienen de la combustión de carbón granulado o pulverizado, el cual es transportado del horno de ignición al calentador por el flujo de gases.

Las cenizas volantes se pueden clasificar de la siguiente manera, de acuerdo a la norma ASTM C-618:

- Clase N: Son puzolanas naturales crudas o calcinadas, que se encuentran en algunas tierras diatomeas, pizarras opalinas, cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar. Algunos materiales requieren calcinación para inducir características satisfactorias, tales como algunas arcillas o pizarras.
- Clase F: Son las cenizas volantes producidas normalmente por la combustión de carbones o bituminosos, generalmente cenizas volantes de bajo contenido de calcio (menos de 10% de CaO), que cumplen con los requerimientos de la norma. Esta clase de cenizas tienen propiedades puzolánicas.
- Clase C. Son cenizas producidas por carbones lignitas o sub-bituminosos, que cumplen con los requerimientos de la norma. Estas puzolanas, además

---

---

de tener propiedades puzolánicas, tienen propiedades cementantes. Algunas de estas cenizas pueden contener grandes cantidades de cal (del 10% al 30%), cuyos contenidos de carbono usualmente son menores que el 2%.

Las cenizas volantes poseen propiedades puzolánicas similares a las que presentan de forma natural las puzolanas de origen volcánico o sedimentario, encontradas en muchas partes del mundo. Todas las cenizas poseen materiales puzolánicos, sin embargo algunas cenizas poseen varios grados de valores cementantes sin la adición de hidróxido de calcio. Las cenizas volantes utilizan eficientemente los productos de hidratación de cemento Portland. Las soluciones de calcio e hidróxidos alcalinos, los cuales son liberados dentro de la estructura del poro de la pasta, se combinan con las partículas puzolánicas de las cenizas volantes, formando un medio cementante. El calor generado por la hidratación del cemento Portland es un factor importante en la iniciación de la reacción de las cenizas volantes.

**Tabla 1.2.** Componentes de las Cenizas Volantes [27].

<b>Compuesto</b>	<b>Composición (% en peso)</b>
SiO <sub>2</sub>	35 – 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 – 30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 – 20
CaO	1 – 35

---

---

### **1.5.2. Escoria de Alto Horno**

De acuerdo a la norma ASTM C-989, y ACI 233R-03, se define como un producto no metálico obtenido en la industria metalúrgica, que consiste

---

---

esencialmente de silicatos, y aluminosilicatos de calcio y otros compuestos que se desarrollan conjuntamente al fundir el hierro en los altos hornos.

La escoria granulada, se obtiene como el residuo de las industrias metal ferrosas y no ferrosas, en forma de polvo, se ha utilizado como adición mineral, sobre todo como componente en cementos mezclados, llamándolos cementos de escoria. Recientemente, con el crecimiento de las actividades de construcción terrestre o marina, el uso de la escoria de alto horno en el concreto ha ganado gran ímpetu para mejorar la durabilidad del concreto colocado en ambientes marinos. Ya son más de 100 años que se descubrió la actividad hidráulica de la escoria y desde entonces se ha usado en concretos subacuáticos, especialmente en agua de mar.

La escoria de alto horno, es el subproducto de la producción del hierro. La escoria cuando se almacena y se deja enfriar lentamente no adquiere ninguna característica puzolánica ni cementante, incluso después de molerse. Sin embargo, cuando la escoria se enfría rápidamente o se apaga e inmediatamente después se muele, se comporta como un cementante con un cierto valor puzolánico, y adquiere así cualidades idóneas para el uso como aditivo mineral al concreto. El proceso de apagar la llama se llama granulación y el producto final es la escoria granulada.

En los países altamente industrializados, las escorias se clasifican como escoria de alto horno, escoria de horno convertidor y escoria de horno eléctrico. Las dos primeras se producen durante la fabricación de hierro, mientras que la última se genera en el proceso siderúrgico de horno eléctrico, usando el hierro de desecho como materia principal. Las escorias de horno eléctrico tienen fluorescencia y se clasifican más a fondo en dos categorías, escoria oxidada y escoria reducida. La primera es obtenida en el proceso para eliminar la porosidad y la composición impermeable en el acero fundido, mientras que la segunda se obtiene en el proceso para eliminar el oxígeno en el acero fundido, y para ajustar la composición del mismo.

---

La reactividad de la escoria granulada de alto horno (GGBFS por sus siglas en inglés, ground granulated blast furnace slag) es una adición mineral aceptada para el uso en concreto, debido a su naturaleza y composición química que hacen las puzolanas y el material cementante. La alta reactividad hidráulica de la escoria, se debe al rápido apagado o enfriamiento súbito depende el proceso, de la composición química, y de la característica de la partícula. Las escorias altamente cristalinas, enfriadas lentamente no son reactivas, y no se recomiendan en la adición con el cemento.

El rápido enfriamiento minimiza la cristalización y convierte a la escoria de alto horno en un agregado de partículas muy finas, generalmente pasan por un tamiz No. 4 (4.75 mm).

Las características físicas y de la partícula se encuentran en la norma ASTM C-989.

La forma de la partícula generalmente es angular. Al realizar la granulación y la molienda, se producen superficies angulares fracturadas, típicas de un cristal fracturado. Comparando a las partículas de la escoria con las de la ceniza volante que son esféricas y tienen una textura superficial mucho más lisa que proporciona mayor trabajabilidad a los concretos que con las adiciones de escoria. El tamaño de la partícula de la escoria varía entre 10  $\mu\text{m}$  y 45  $\mu\text{m}$  con una porción considerable de partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  las cuales contribuyen al desarrollo de altas resistencias a edades tempranas, por debajo de los 28 días, mientras que las partículas entre 10  $\mu\text{m}$  y 45  $\mu\text{m}$ , contribuyen al desarrollo de las resistencias a largo plazo. El área superficial de las escorias para obtener características cementantes satisfactorias debe de estar entre de 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  a 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La escoria producida después de la granulación en la planta siderúrgica del hierro es demasiado gruesa para utilizarla como adición mineral al cemento pues el mas del 50% de las partículas tienen un tamaño mayor a los 840  $\mu\text{m}$  y es necesario

---

---

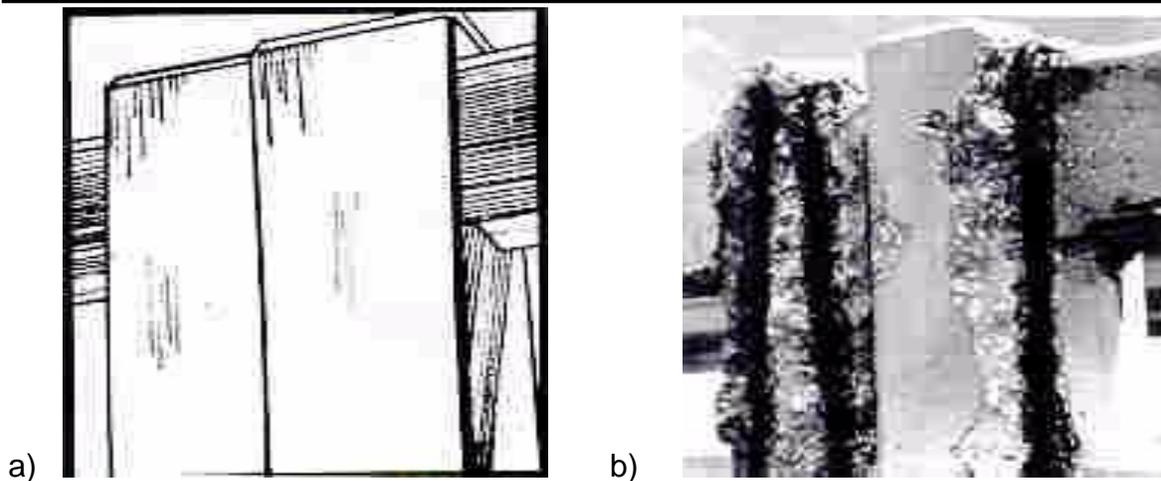
realizar una molienda previa del material para usarse como aditivo mineral (Ramachandran, 1995).

## **1.6 Corrosión en Concreto Reforzado**

La vida útil de cualquier estructura está limitada por su deterioro. Sin embargo, las estructuras de concreto comparadas con las de acero o madera tienen una mayor durabilidad y necesitan de menos mantenimiento. En los últimos años, los problemas relativos a la durabilidad en las construcciones de concreto han tomado mayor vigencia, en razón de la pérdida de inversión por el deterioro de las estructuras.

En la actualidad y desde hace tiempo, el material de construcción más difundido es el hormigón (concreto), que junto con las varillas de acero forman el sistema conocido como hormigón armado (concreto armado). Sin embargo, uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural de obras civiles como puentes túneles, carreteras, muelles, etc., es la corrosión de las varillas de los sistemas de hormigón armado (Baltazar et al, 2004).

Uno de los principales problemas de la industria de la construcción es el deterioro de las estructuras del concreto reforzado o concreto armado (Waddell, 1996; Castro, 1998).



**Figura 1.3.** Fenómeno de corrosión en estructuras de concreto reforzado. a) estructura intacta, b) estructura manchada y corroída.

En los países industrializados de occidente por ejemplo, se ha estimado que la corrosión requiere alrededor de 2 al 3% del producto interno bruto. Es posible que la divulgación más amplia a principios que son bien entendidos que pudieran ahorrar la cuarta parte de esa cantidad (West, 1986).

La durabilidad es una propiedad importante del concreto, es indispensable que tenga la calidad y capacidad para resistir las condiciones de servicio. El ACI-201 (1997) la define como: *"la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente"*. Se evalúa *"en función de su capacidad para resistir las acciones de deterioro derivadas de las condiciones de exposición y servicio a que está sometida"* (ACI, Sección Centro y Sur de México, 1996).

Los agentes que afectan la durabilidad del concreto son de diversa índole, pueden ser clasificados en dos categorías: los agentes externos son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio, entre ellos se encuentran los iones de cloruro, el dióxido de carbono, sulfatos, bacterias, abrasión y ciclos de congelamiento y deshielo. Los agentes internos se hallan

---

---

dentro del mismo concreto, como los iones de cloruro incorporados en determinados aditivos y los álcalis del cemento que reaccionan con agregados potencialmente reactivos.

Se pueden clasificar por su origen: agentes físicos, químicos, biológicos y mecánicos. Los físicos son debidos a cambios en el medio ambiente (congelamiento–deshielo, cargas, etc.). Entre los agentes químicos destacan los ataques por sulfatos, ácidos, agua de mar y cloruros, estos últimos inducen a la corrosión electroquímica del acero de refuerzo.

Los biológicos pueden ser microorganismos, algas y moluscos. Los mecánicos se deben a las condiciones a que se expone el concreto (por ejemplo, abrasión y erosión). En ocasiones, estos agentes se presentan simultáneamente, por lo que se pueden tener combinaciones interesantes. Obviamente el efecto del daño se debe a cuestiones intrínsecas y extrínsecas del concreto, como es la calidad del mismo y el grado del agente activo al que se encuentra expuesto.

La importancia de los agentes agresivos está en función del entorno en que se encuentran, velocidad de penetración y medio de transporte. Dichos agentes agresivos pueden ser gases, líquidos o partículas que forman parte de los suelos adyacentes al concreto. En la literatura del tema se incluyen los siguientes aspectos:

- Exposición al ataque químico.
- Corrosión del acero de refuerzo y otros metales embebidos en concreto.
- Reacciones químicas de agregados.
- Congelamiento y deshielo.
- Abrasión.

En el concreto armado la durabilidad dependerá tanto de las características del concreto y del acero como de la interrelación entre ambos. Asimismo, la estructura porosa resultante y la fase acuosa contenida en los poros influirán de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos hasta la armadura, ya que el contenido de fase líquida en los poros influye enormemente

---

---

en la velocidad de difusión de gases e iones, a la vez que dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero (Sanjuán, 2001).

Aún y cuando el concreto es capaz de actuar como una protección física y química para la varilla de refuerzo, bajo ciertas condiciones el metal tiende a desarrollar fenómenos de corrosión (Biczok, 1981, Andrade, 1984). Estas condiciones pueden ser:

- Disminución de la basicidad o alcalinidad del concreto cuando los constituyentes de éste reaccionan con sustancias ácidas o con dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del medio ambiente, fenómeno que se conoce como “carbonatación del concreto”.
- Presencia de cloruros en el concreto, añadidos durante la mezcla del cemento y sus adiciones.
- Penetración de los cloruros desde el exterior una vez que la estructura ha sido construida.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias que afectan la vida útil de las estructuras de concreto reforzado:

1. Por efecto de la corrosión se pierde metal base de las varillas de acero, causando un detrimento en las propiedades mecánicas de la estructura en su conjunto.
2. El metal perdido se convierte en productos de corrosión, cuyo volumen es superior al del metal base que le da origen. Este aumento no puede ser absorbido por el concreto, generándose esfuerzos internos que lo agrietan e incluso lo desprenden totalmente del resto de la estructura.

Este tipo de fenómeno de corrosión disminuye dramáticamente la vida útil de las estructuras de concreto, por lo que se buscan soluciones a este problema que

---

---

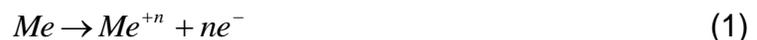
representa costos millonarios de mantenimiento y reparación a nivel mundial para dichas estructuras (Fontana, 1987).

Se realiza investigación para proponer mejoras y minimizar los problemas de corrosión, diseñando métodos de protección, materiales más resistentes y procedimientos de mantenimiento preventivo. Pero para que estas mejoras den resultado, se debe de difundir la información al personal responsable del diseño, de la construcción y del mantenimiento de las estructuras.

### **1.6.1. Celda de corrosión**

La corrosión es un fenómeno natural que comúnmente se define cuando ocurre el deterioro de una sustancia (generalmente un metal) o sus propiedades debido a la reacción con su entorno (Koch et al, 2002). Es un proceso de oxidación química o electroquímica, en la que el metal transfiere electrones al medio ambiente y sufre un cambio de valencia de cero a un valor positivo, el medio ambiente puede ser un líquido, gas o híbridos suelo-líquido (Pérez, 2004).

La corrosión es un proceso electroquímico, aunque el acero se puede corroer por ataque químico, el más común es en medio acuoso. El proceso de la corrosión es similar a lo que ocurre con una batería. Un ánodo, donde ocurre la oxidación electroquímica, un cátodo, donde se lleva a cabo la reducción electroquímica, un conductor eléctrico, y un medio acuoso, llamado electrolito. Cualquier superficie del metal en la cual se esté presentando la corrosión, es un compuesto de ánodos y cátodos conectados eléctricamente entre sí. Las reacciones en los ánodos y cátodos se refieren ampliamente como “reacciones de media celda”. El ánodo es el polo negativo, el hierro se oxida en iones ferrosos.



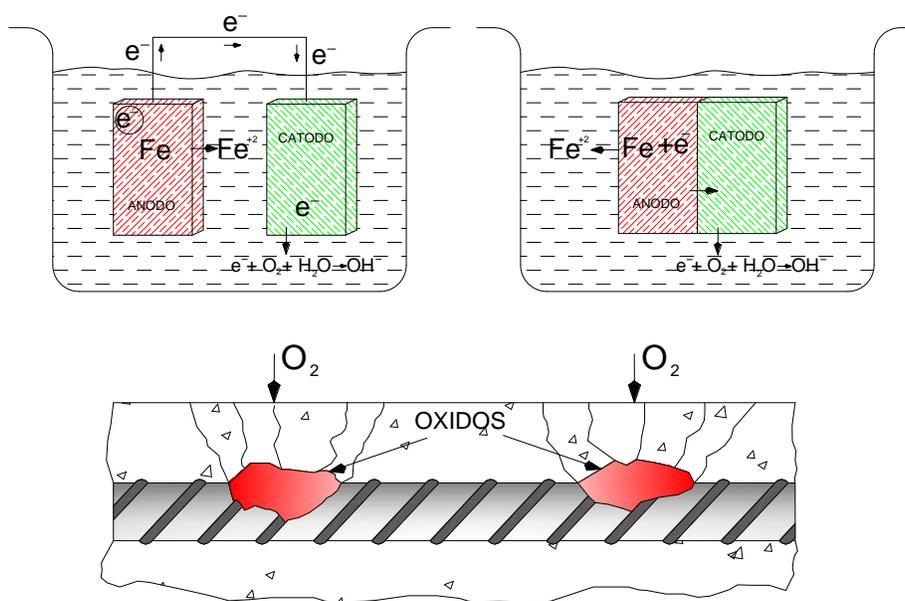
Liberando electrones, que emigran a través del metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. Esta sustancia serán los iones hidrógeno en medios ácidos:



Y el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros.



El proceso de corrosión supone, pues, la generación de una pila electroquímica, tal y como muestra la figura 1.4, la corrosión a través del metal y a través del electrolito entre el ánodo y el cátodo, supone el funcionamiento de un circuito cerrado, Si el circuito se interrumpe en alguno de sus puntos, la pila no puede funcionar y la corrosión se detiene.



**Figura 1.4.** Formación de la pila de corrosión (Maldonado, 2008).

### 1.6.2. Ingreso y ataque de iones cloruro

Los metales se encuentran, en general, en la naturaleza formando compuestos (óxidos, sulfuros, etc.) con otros elementos. Para usarlos en su forma elemental hay que extraer el metal mediante un proceso de reducción, lo que requiere comunicarle cierta cantidad de energía. El proceso inverso por el que el

---

---

metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía de Gibbs, es decir, tiene lugar mediante una reacción espontánea. Este proceso, que corresponde a una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina del metal (Andrade, 2010).

Los iones cloruro se consideran la principal causa de deterioro prematura de las estructuras dañadas por corrosión (W. Chale, 2007). Aunque también la corrosión puede ocurrir en algunas circunstancias donde la presencia de los iones cloruro es nula, como por ejemplo la carbonatación, que es el resultado de la disminución de la alcalinidad del concreto. La carbonatación, sin embargo, es generalmente un proceso muy lento en concretos con relaciones agua – cemento bajas, además de que la carbonatación inducida no es tan común como la corrosión inducida por iones cloruro (T.Y Lo, 2008). Los iones cloruro son muy comunes en la naturaleza, y en pequeñas cantidades generalmente también están presentes en los ingredientes del concreto.

Los iones cloruro también se pueden agregar intencionalmente, comúnmente por razones de aceleración en el fraguado final del concreto. También se puede presentar el ingreso de iones cloruro disueltos en estructuras expuestas en ambientes marinos o a las sales de deshielo. La velocidad de corrosión se ve influenciada altamente por factores ambientales. El oxígeno y la humedad deben estar presentes para que la corrosión electroquímica ocurra.

### **1.6.3 Factores que afectan la corrosión de acero en el concreto.**

El concreto reforzado con cantidades significativas de iones cloruro es vulnerable a la corrosión, especialmente si está sujeto a ciclos de humectación y secado. Otros factores que afectan el índice y el nivel de corrosión son las heterogeneidades del concreto y el acero, el pH del agua del concreto, las grietas, y efectos galvánicos debido al contacto con otros metales. Las condiciones de

---

---

diseño también desempeñan un papel muy importante en la corrosión del acero embebido.

El concreto provee normalmente una protección excelente contra la corrosión al acero de refuerzo. El ambiente alcalino tan alto que presenta el concreto, crea una delgada película en la superficie del acero que la pasiva, protegiéndola contra la corrosión.

Al diseñar un concreto, se puede hacer un proporcionamiento para tener como resultado una permeabilidad baja, y así mismo reducir la penetración de sustancias corrosivas al interior. La baja permeabilidad también aumenta una resistividad eléctrica alta del electrolito, que impide el flujo de corrientes electroquímicas de corrosión. Sin embargo, existe una mayor probabilidad de que la corrosión se puede presentar si la calidad del concreto es deficiente, la estructura no fue diseñada adecuadamente para el ambiente de servicio, o el ambiente presenta cambios no previstos durante la vida de servicio.

La corrosión en concreto reforzado, en los últimos años recibe mayor atención debido a que se presenta en muchos lugares y también a que los gastos de reparación por éste problema son muy elevados. La corrosión en el acero de refuerzo, se observó primeramente en estructuras situadas en ambientes marinos y en plantas de fabricación de reactivos químicos, más recientemente, numerosos informes dan testimonios de ocurrencia en superestructuras de puentes, estructuras de estacionamiento, y otras estructuras expuestas a cloruros se han hecho particularmente prominentes.

Los deterioros del concreto causados por corrosión, son el resultado de una expansión de los productos de corrosión, ya que ocupan mayor volumen que el acero y al presentarse ejercen tensiones substanciales en la matriz del concreto. Esto se manifiesta en el exterior por manchas de herrumbre, grietas y desconchamientos de la estructura. Esto provoca que la sección del acero se reduzca y con el tiempo producirá que la estructura comience a fallar y por

---

---

perdida de adherencia entre el concreto y acero y un debilitamiento ya que el acero diseñado se aminora, y el concreto que fue diseñado para resistir sollicitaciones mecánicas a compresión no cumplirá con su función.

Las proporciones de la mezcla, el recubrimiento, el control de agrietamiento, y obviamente la puesta en práctica de las medidas de protección contra la corrosión. Estos son algunos de los factores que controlan el inicio de la corrosión.

En estructuras pretensadas es de especial preocupación, ya que por los esfuerzos de tensión inducidos al acero de refuerzo, puede ocasionar un colapso severo al ser combinados con pérdida de sección del acero por corrosión.

Los estudios sobre la corrosión, no han logrado hasta la fecha producir un acero u otro tipo de refuerzo que no se corroa, y que sea económica y técnicamente factible para su uso en el concreto.

Sin embargo, las investigaciones han señalado la necesidad de desarrollar concretos de calidad y que protejan al acero de manera eficaz, que sea práctico y económico.

#### ***1.6.4. Mecanismos de corrosión del acero en el concreto***

La corrosión del acero en las estructuras de concreto reforzado (CR), es un fenómeno que es considerado como una de las causas principales del deterioro estructural (Cabrera, 1996 y Raupach et al., 2001).

La diferencia entre la corrosión del acero expuesto al medio ambiente y la del acero incluido en el concreto reforzado, es que en este último, el concreto sirve como una barrera física y química que protege al acero (Jarrah et al., 1995); por un lado, existe una porción de concreto denominada recubrimiento, que impide el paso de agentes dañinos para el acero. Como barrera química, durante el proceso

---

---

de hidratación del cemento, se genera un ambiente altamente alcalino (pH entre 13 y 13,8), principalmente debido a la producción de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , así como  $\text{NaOH}$  y  $\text{KOH}$ , los cuales están presentes en la pasta de cemento.

En este ambiente alcalino los componentes termodinámicamente estables del acero,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (Batis et al., 1999), forman una delgada capa de óxido protectora, denominada *capa pasiva*, que se forma de manera espontánea con espesor de unos cuantos nanómetros, por lo que es muy difícil estudiar sus propiedades. Sin embargo, la barrera física de concreto no es impermeable y pueden penetrar a través de sus poros agentes nocivos que llegan a destruir esa capa pasiva (Cabrera et al., 1995).

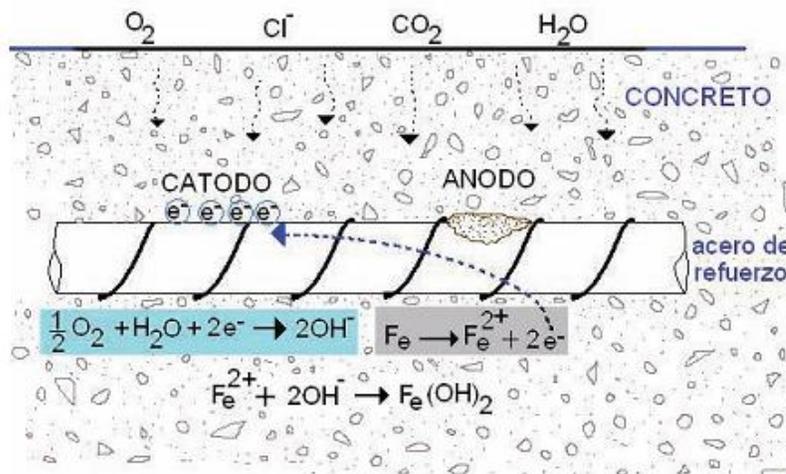
Por lo general, una vez que los iones  $\text{Fe}$  se liberan del acero, reaccionan con el oxígeno circundante y forman óxidos más estables químicamente, los cuales se van depositando en la superficie del acero como se muestra en la figura 1.2 (Castorena-González et al, 2011). Ahí se tiene un fenómeno similar a una celda electrolítica, donde la parte sana actúa como cátodo y la parte corroída como ánodo.

Cuando los óxidos siguen creciendo, al tener menor densidad volumétrica que el acero original (con volumen de hasta 1.7 y 6.25 veces al del acero), ya no es posible que ocupen el mismo lugar que les correspondía en el acero, por lo que se expanden alrededor del refuerzo originando esfuerzos, los cuales al ser más grandes que los de tensión del concreto, provocan que éste se agriete y en casos severos hasta sufrir un desprendimiento del mismo (Pantazopoulou et al., 2001), causando que las condiciones de servicio, así como la capacidad portante de la estructura se vean reducidas (Lee et al., 2002 y Chang, 2003).

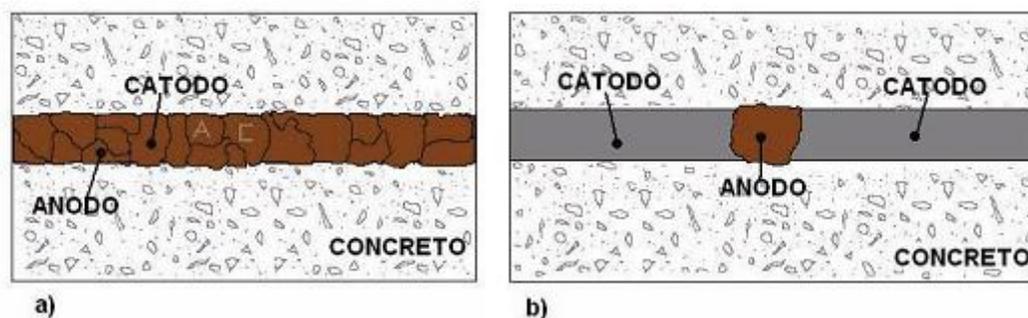
Dependiendo de la localización del ánodo y el cátodo, la corrosión del refuerzo puede ocurrir ya sea en una microcelda, donde las reacciones anódica y catódica prácticamente se dan en el mismo lugar, o bien en una macrocelda, en

donde se distinguen perfectamente al área corroída del refuerzo, ánodo, y a la parte no corroída, cátodo, (González et al., 1994 y Elsener, 2002).

La figura 1.5 muestra estos casos. El caso de la macro-celda es de gran importancia, ya que la reducción de la sección del refuerzo puede acelerarse debido a la relación tan grande entre áreas catódica y anódica, produciendo tasas de corrosión muy altas (Raupach et al., 2001).



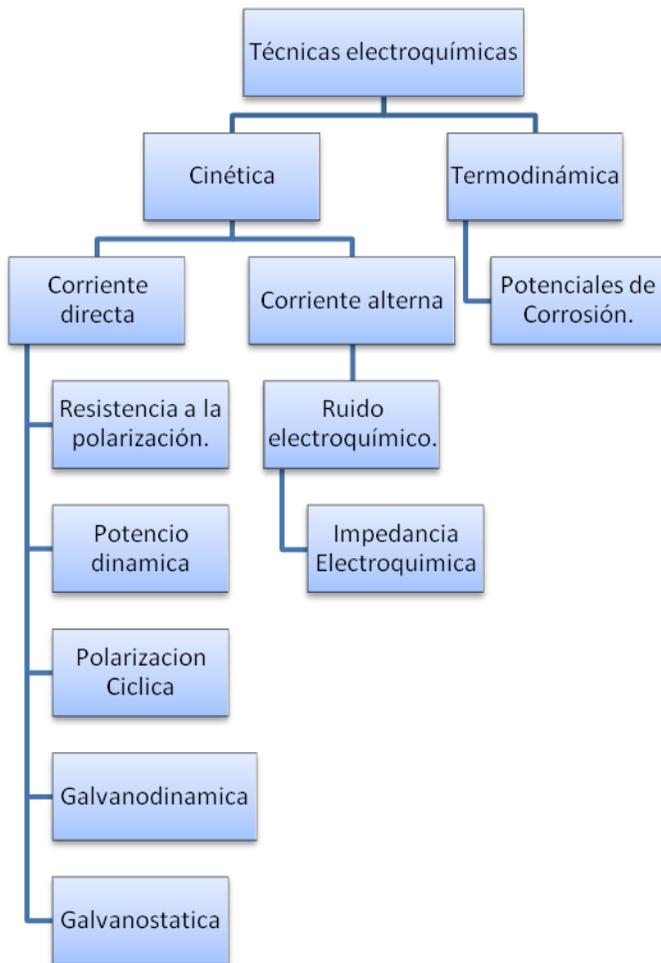
**Figura 1.5.** Proceso de corrosión en el acero de refuerzo. Como proceso electroquímico, existen reacciones anódica  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  y catódica  $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$  y un flujo de electrones del ánodo al cátodo.



**Figura 1.6** Relación entre las áreas corroídas (ánodo) y sanas (cátodo) del refuerzo, el proceso de corrosión puede darse como una microcelda a), o macrocelda b).

### 1.6.5 técnicas electroquímicas utilizados para el estudio de la corrosión.

Las técnicas electroquímicas se pueden clasificar desde un punto de vista cinético, así mismo de un punto de vista termodinámico.



**Figura 1.7** Diagrama de Técnicas Electroquímicas (Termodinámica y Cinética).

Haciendo referencia a la parte termodinámica aplicada a estudios de corrosión del concreto armado, este no dará ninguna idea acerca de la velocidad de la reacción, solo se obtendrá la probabilidad de que pueda o no ocurrir la corrosión del acero de refuerzo del concreto.

Referente al enfoque cinético este podrá predecir la velocidad a la cual el metal se va a corroer, es decir; por medio de estas técnicas se puede obtener la

---

---

cantidad de metal por unidad de tiempo que se está disolviendo en un medio dado, cuando este sistema esté desplazado de una situación de equilibrio.

### 1.6.5.1 Medición del potencial de corrosión.

La corrosión de un metal en un medio acuoso, como es el caso del acero de refuerzo del concreto, es un fenómeno que engloba dos semireacciones de oxidación-reducción, por un lado la oxidación del Fe (hierro) a  $Fe^{2+}$ , y por otro lado la reducción del oxígeno. La intensidad del proceso anódico y catódico son iguales, y son identificadas como la intensidad de corrosión del proceso,  $I_{corr}$ , que es la magnitud eléctrica utilizada como medida de la velocidad de corrosión. En estas condiciones, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y de la del medio. A este potencial al que se encuentra el metal se le denomina potencial mixto o de corrosión ( $E_{corr}$ ).

El  $E_{corr}$  no cuantifica la proporción de metal que se corroe por unidad de área. Por ello estos valores no deben de considerarse más que como valores orientativos y de validez estrictamente cualitativa, sin que se pueda establecer de una forma general y para cualquier condición de exposición una relación constante entre  $E_{corr}$  y la cinética del proceso.

La interpretación de las medidas de potencial de corrosión suele hacerse calificando el riesgo de corrosión según el criterio de la norma ASTM C-876-91:

**Tabla 1.3.** Criterio de evaluación de potenciales de media celda.

Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) Cu/CuSO <sub>4</sub>	Criterio
Más positivos que -200 mV	10% de probabilidad de que no exista corrosión
Entre -200 y -350 mV	Incertidumbre
Más negativo que -350 mV	90% de probabilidad de corrosión

---

### 1.6.5.2 Resistencia a la Polarización Lineal.

La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) o polarización lineal es una de las técnicas electroquímicas que ha sido más utilizada en los últimos 50 años. Se trata de una técnica cuantitativa y no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio. Es la técnica más utilizada para medir la velocidad de corrosión en las armaduras del concreto armado, aunque tiene algunas limitaciones. El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión (Rodríguez, 2002). En la práctica se aplica una pequeña polarización,  $\Delta E$ , de  $\pm 20$  mV y se mide la densidad de corriente resultante,  $\Delta I$ , dando el nombre al método el hecho de que las dimensiones del cociente  $\Delta E/\Delta I$  sean las de una resistencia, ASTM G59.

En el artículo publicado en Journal and Electrochemical Society en 1957, Stern y Geary escribieron que “se deriva una ecuación relacionando la pendiente de esta región con la velocidad de corrosión y las pendientes de Tafel, lo cual es una nueva aproximación experimental al estudio de la electroquímica de los metales corroyéndose.

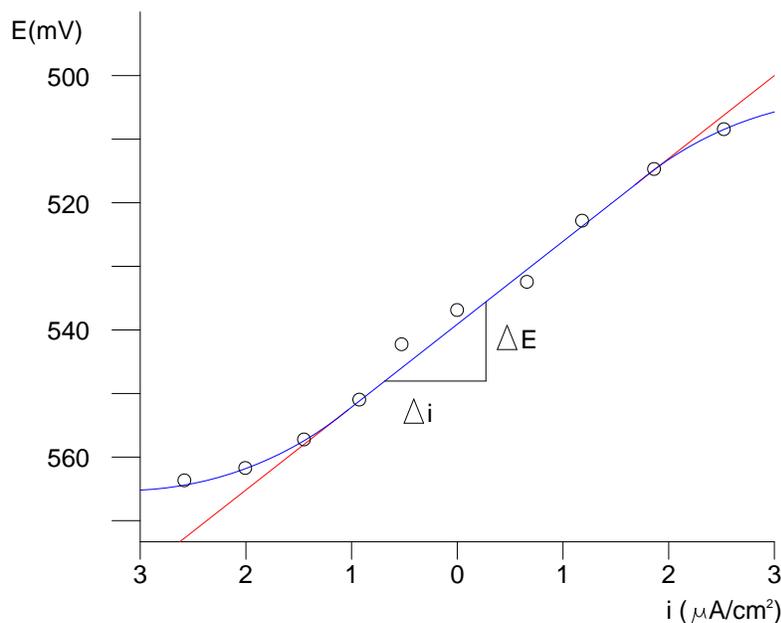
La ecuación desarrollada por Stern y Geary toma el nombre de los investigadores y se presenta a continuación:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \dots\dots\dots (2)$$

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \dots\dots\dots (3)$$

Donde  $b_a$  y  $b_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente. En el concreto armado se asumen valores de 26 mV para el

acero activo y de 52 mV para el acero pasivo. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir; la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización. Esta ecuación recuerda la conocida Ley de ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.



**Figura 1.8.** Curva típica de la técnica de resistencia a la polarización lineal (Maldonado, 2008)

La mayor parte de las pendientes de Tafel oscilan entre valores de 60 mV/década y 120 mV/década, de donde se ha optado por hacer una aproximación suponiendo que ambas pendientes tuvieran el segundo valor. Así se obtiene una  $B= 26$  mV, que en cualquier caso si se aplica este valor de  $B$  a un estudio, los valores de velocidad de corrosión serán comparables y estos serán al menos del mismo orden de magnitud que si se emplearan las pendientes de Tafel reales.

Ventajas de la  $R_p$ :

- Se trata de una técnica no destructiva pues emplea bajas perturbaciones.
- Proporciona velocidad de corrosión instantánea

- No hace falta instrumentación muy sofisticada pues solamente se necesita un potencióstato y, en consecuencia, es una técnica económica.
- Para aplicar la metodología no hace falta personal altamente calificado.

Limitaciones de la Rp:

- Es necesario que el potencial sea estable.
- La Caída óhmica en sistemas la hace poco recomendable en sistemas altamente resistivos.
- Es necesario seleccionar una velocidad de barrido adecuado.

El límite entre corrosión activa y pasiva se sitúa entre  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  y  $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (tabla 1.2), que en corrosión generalizada suponen 1 ( $\mu\text{m}/\text{año}$ ) a 2 ( $\mu\text{m}/\text{año}$ ). Este límite se aplica cuando el proceso da lugar a la formación de herrumbre (óxidos expansivos que fisuran el recubrimiento). En el caso de que el óxido sea invisible al ojo humano, velocidades incluso de  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  no dan lugar a fisuración del recubrimiento, al no tener estos óxidos carácter expansivo.

**Tabla 1.4.** Clasificación de los valores de  $i_{\text{corr}}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) en términos de vida útil (Red DURAR).

$i_{\text{corr}} \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Nivel de corrosión
Menor de 0.1	Despreciable
Entre 0.1 y 0.5	Moderada
Entre 0.5 y 1.0	Elevada
Mayor que 1.0	Muy Elevada

Armaduras que se corroen de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  a  $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  produciendo óxidos expansivos provocarán en un periodo de 10 años a 20 años la fisuración del recubrimiento, esto es considerando corrosión generalizada. Cuando la corrosión

---

---

es localizada, se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicando por 10 el valor medio medido.

### **1.6.5.3 Ruido Electroquímico.**

El estudio del ruido electroquímico se trata de oscilaciones en el potencial y corriente electroquímicas con respecto al tiempo. El ruido electroquímico en potencial se define como las oscilaciones del potencial de corrosión respecto a un electrodo de referencia (generalmente en aplicaciones en concreto se utiliza el electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>), mientras que el ruido electroquímico en corriente es la oscilación de la corriente entre dos electrodos idénticos o de un solo electrodo bajo control potencioestático (González, 2005).

Con esta técnica no se altera el estado del sistema en estudio, ya que no se aplica ninguna perturbación externa para realizar las mediciones. El concepto de ruido electroquímico es un comportamiento inversamente proporcional al intervalo de frecuencia, a menor frecuencia mayor intensidad.

La medición simultánea permite obtener por analogía de la ley de ohm la resistencia del ruido electroquímico y mediante análisis espectral la impedancia de ruido electroquímico; esta resistencia es equivalente a la resistencia de polarización, y en ellas se incluye oscilaciones debidas a la transferencia de carga cinética electroquímica.

Uruchurtu Ch. en 1984, menciona que "el ruido electroquímico parece reflejar la suma individual de los eventos aleatorios, y el valor cuadrado medio (raíz cuadrática r.m.s.) de amplitud de estos eventos o desviación estándar se ha visto que provee la *huella dactilar* de la cantidad de metal disuelto, dependiendo de la combinación metal-medio ambiente".

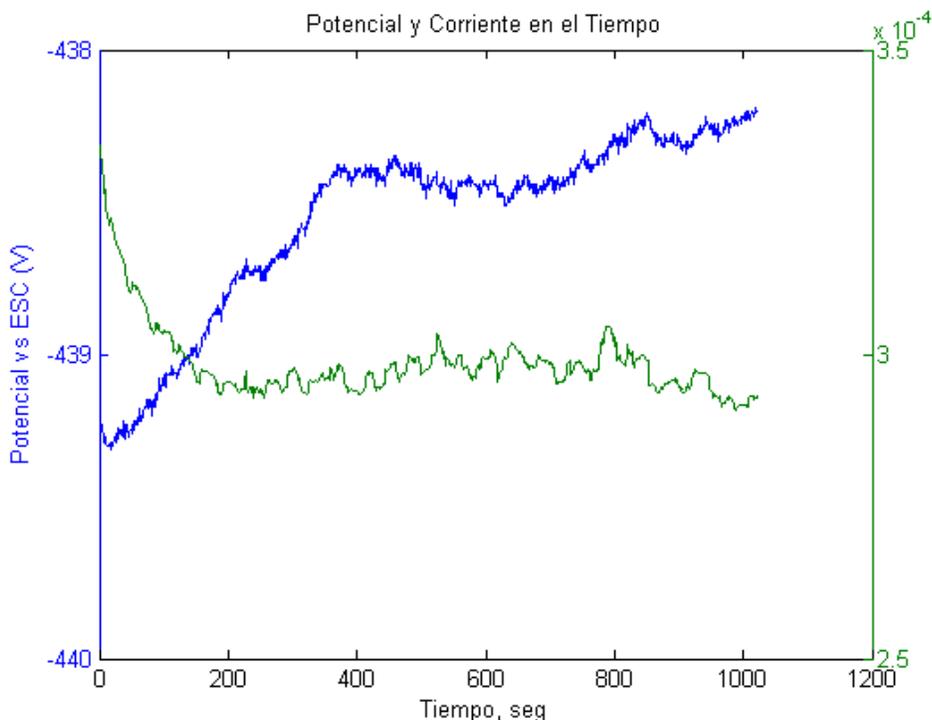
El ruido electroquímico permite obtener información acerca de la cinética de reacción, o sea la velocidad de corrosión; siendo posible la identificación del tipo

de corrosión ya sea: uniforme, generalizada o localizada. Además es posible obtener información acerca de los mecanismos de reacción.

#### 1.6.5.4 Métodos de Análisis.

- **Serie De Tiempo.**

Una forma simple y directa para identificar los detalles característicos de los tipos de corrosión de un sistema en estudio, es el examinar las series de tiempo obtenidas de la aplicación de la técnica. Por ejemplo, la detección visual de transitorios de rompimiento y de repasivación o de oscilaciones asociadas a hendiduras de corrosión por picaduras.



**Figura 1.9.** Ruido electroquímico del acero de refuerzo en cloruro de sodio (NaCl) al 3.5%

El ruido electroquímico producido por algunos sistemas puede mostrar una estructura más definida en la serie de tiempo. Por ejemplo la figura 1.6 representa

---

---

el ruido electroquímico producido por el acero de refuerzo embebido en mortero sometido a una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5%.

- **Métodos Estadísticos.**

Este método suministra información cuantitativa de la velocidad de la reacción a partir de la resistencia de ruido análoga a la resistencia a la polarización.

Los métodos estadísticos simples tratan a la serie de tiempo como una colección de potenciales o corrientes individuales, ignorando la relación entre un valor y el siguiente (muestra de población). La serie de tiempo está definida completamente por la distribución de sus valores. La media o promedio es el más común de los parámetros, y el potencial promedio no se considera como parte de ruido electroquímico, aunque se utiliza para calcular otros parámetros de interés como el de corrosión localizada. Las fluctuaciones de la media en largos periodos de tiempo están directamente relacionadas a cambios en los procesos de corrosión. El ruido en corriente teóricamente presentará un valor de cero entre dos electrodos idénticos; sin embargo, en la práctica no es así, debido a pequeñas diferencias en su comportamiento frente a la corrosión.

La resistencia al ruido ( $R_n$ ) se obtiene al dividir la desviación estándar del potencial y la desviación estándar de la corriente, por analogía de la ley de ohm según la norma ASTM G 199-09. Los análisis estadísticos incluyen la determinación del valor de la raíz cuadrática media (r.m.s.) que es la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado del potencial o corriente (sin substraer la media).

$$R_n = \frac{\sigma_E}{\sigma_I} \dots \dots \dots (4)$$

---

Donde:

Rn= resistencia de ruido.

$\sigma_E$  y  $\sigma_I$ = desviación estándar de potencial y corriente.

Una relación utilizada comúnmente como un índice o grado de corrosión localizada es el coeficiente de variabilidad que determina el índice de localización (IL) que es (Kelly, 1996):

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}} \dots\dots\dots (5)$$

Donde  $\sigma_I$  es la desviación estándar de la corriente e  $I_{rms}$  es la raíz cuadrática media o el valor medio de la corriente. El valor del índice de localización del sistema en estudio, sirve para encontrar el tipo de corrosión que se está presentando en el material estudiado.

---

# Capítulo II.

## Metodología Experimental

En este capítulo se describen los materiales empleados para construir los especímenes de prueba, la metodología experimental a la que fueron expuestos los especímenes de concreto para evaluar resistencia compresión y flexión así como las técnicas de caracterización electroquímica para el comportamiento a la corrosión.

### **2.1. Materiales**

#### **2.1.1 .Cemento Portland Ordinario (CPO)**

Los cementos están normados por la ASTM, y sin importar la empresa que los produzca, deben de causar el mismo efecto cementante para cualquier mezcla de concreto que se diseñe. El cemento que empleo por sus características es tipo I de acuerdo a la norma ASTM C-150.

En el país existen grandes empresas que originan grandes cantidades de subproductos, y se convierte en un reto por la comunidad científica y empresarial en tratar de aprovechar éstos residuos de manera que aporten beneficios tecnológicos, económicos y ecológicos. Por tal motivo se estudió el comportamiento de estos materiales para su posible introducción en la elaboración

---

---

de concreto hidráulico, aunadamente tratando de dar una posible solución que duele mucho a la infraestructura nacional, como es la corrosión en estructuras de concreto.

### **2.1.2. Ceniza Volante (CV)**

Es un subproducto de la industria de la generación eléctrica; proviene de MICARE, Minera Carbonífera Río Escondido, SA de CV. En Pueblo de Nava Coahuila. Produce el 20.20% de la producción nacional de carbón. Es abastecedora de ese energético que requiere la planta termoeléctrica de Río Escondido para la generación de energía eléctrica. Por sus características físicas y químicas se clasifica como una CV de clase F con base en la norma ASTM C 618.

Material que a simple vista puede confundirse con el cemento Portland ya que es un polvo fino, gris y muy denso como se muestra en la figura 2.1 con la diferencia de que este material al mezclarse con agua no produce fraguado.



**Figura 2.1.** Ceniza Volante (CV)

### **2.1.3. Escoria de Alto Horno (EH)**

En los países productores de acero se agrava el problema sobre la gestión, reciclado y aprovechamiento de la escoria de alto horno. En nuestro país se

---

---

producen aproximadamente 3' 224, 000 toneladas al año y por cada tonelada de acero líquido, se estima que la mitad es escoria.

Producto no metálico que se separa de la fundición de metales; Proviene de Altos Hornos de México, S.A. de C.V. (AHMSA), es una planta de Siderurgia Integrada, ubicada en Monclova, Coahuila, en la Región Centro del estado de Coahuila.

Este material a simple vista puede confundirse con arena pomítica, puesto que cuenta con partículas superiores a 3 mm de diámetro, con la diferencia de que éste material es reactivo con el agua y forma productos de hidratación y endurece después de un tiempo, es de color café como se muestra en la figura 2.2 y su densidad es muy baja.



**Figura 2.2.** Escoria de Alto Horno (EH)

#### **2.1.4. Materiales reciclados**

Los materiales reciclados fueron utilizados como agregados ligeros y se obtuvieron de la industria textil, piedra pómez del lavado de la mezclilla y de uso común, costales de polipropileno en donde se almacena azúcar.

---

#### **2.1.4.1. Piedra pómez**

Son rocas comunes de origen volcánico que son lo suficientemente fuertes y ligeras para utilizarse como agregado de peso ligero. Con pesos específicos reales alrededor de  $2.40 \text{ kg/dm}^3$ .

El material utilizado en este trabajo, es el desecho industrial del lavado (*stone wash*) de prendas de mezclillas, re usado como aligerante.

#### **2.1.4.2. Técnicas para envejecimiento de textiles.**

Las prendas fabricadas con tejidos de celulosa como el algodón y, en particular, los tejidos de algodón teñidos con color índigo, han sido prendas comunes durante muchos años. Tras el período de uso, las prendas de vestir, especialmente las de algodón teñido de índigo pueden desarrollar en las costuras y en los revestimientos, zonas localizadas en las que aparecen, en forma de rayo, variaciones en la profundidad o en la densidad del color, además existe una decoloración general de las prendas. En los últimos años este aspecto de envejecimiento o “uso y abuso” se ha convertido en algo muy deseado, sobre todo en dicho tejido.

Para lograr este envejecimiento (*desteñir*), en forma artificial, se utilizan diferentes técnicas para decoloración de telas. Los métodos preferidos para obtener este aspecto de envejecimiento y “uso y abuso” incluyen el lavado a la piedra (*stone wash*) del tejido o de la prenda de vestir. El lavado a la piedra consiste en poner en contacto una prenda de vestir o el tejido dentro de un equipo de cuba con piedras pómez cuyo tamaño de partícula está entre 25,4 mm a 254 mm y con unas partículas pómez más pequeñas que se forman por la naturaleza abrasiva del proceso. Normalmente la prenda de vestir mojada da vueltas en la máquina con el pómez durante un período de tiempo suficiente en el que la piedra abrasa el tejido y produce en el área expuesta a la abrasión un color mas claro al

---

---

igual que en áreas de las costuras. Además, la piedra pómez suaviza el tejido y produce una superficie decolorada similar a la producida por el uso prolongado del tejido. Las partículas de pómez se deben eliminar de forma manual.

El material utilizado se recolecta de un depósito de desechos en la ciudad de Lerdo, Durango.

#### 2.1.4.2. Polipropileno

Se utilizó material de desecho de costales de polipropileno (figura 2.3) en donde se deposita azúcar. Se deshila el costal, el ancho de los hilos varía de 2 a 4 mm y de largo 1/2 pulg (figura 2.4).



**Figura 2.3.** Costal polipropileno



**Figura 2.4** Deshilado y corte del costal

Estructuralmente es un polímero vinílico, pertenece al grupo de los termoplásticos, es una cadena larga de polímero, hecha del monómero de propileno.

La densidad, está comprendida entre 0.90 y 0.93 gr/cm<sup>3</sup>, posee una gran capacidad de recuperación elástica, material fácil de reciclar, tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse, buena dureza superficial y estabilidad dimensional, por presentar buena polaridad, su factor de

perdidas es bajo, tiene muy buena rigidez dieléctrica. Posee gran resistencia a agentes químicos, presenta poca absorción de agua.

## 2.2. Elaboración de los especímenes

Una vez clasificados los agregados y los materiales, y constituido el diseño experimental de acuerdo a las Tablas 2.1 y 2.2 para la elaboración de los especímenes.

**Tabla 2.1.** Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto para los testigos.

Formula	F1	F2	F3	Formula	F4	F5	F6
Material	(%)	(%)	(%)	Material	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	22.5	25	Caliza +10	20	22.5	25
Caliza +50	30	30	30	Caliza +50	30	30	30
Caliza Fina	10	12.5	15	Caliza Fina	10	12.5	15
Cemento	20	20	20	Cemento	20	20	20
Piedra Pómez	20	15	10	Polipropileno	20	15	10
	2.5 (+10)	2.5(+10)	2.5(+10)		100	100	100
	10(+50)	10(+50)	5(+50)				
	7.5(fina)	2.5(fina)	2.5(fina)				
	100	100	100				

Para los ensayos de compresión y flexión se desarrollan las formulaciones tomando en cuenta los materiales ya clasificados, estos se pesan y mezclan según la fórmula, vaciándose en moldes metálicos (cubos de 2.0 x 2.0 x 2.0 pulg compresión y prismas de 9.0 x 1.0 x 1.0 pulg para flexión). Se deja que fragüen por 24 horas, posteriormente se desmoldan y después de 5 horas se someten al curado (inmersión en agua), dejándolos según la prueba por 7, 14 y 28 días.

**Tabla 2.2.** Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto con la adición de aditivos

Formula	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
Material	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Escoria	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Piedra pómez	20	20	20	15	15	15	10	10	10

Fomula	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24
Material	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Escoria	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Polipropileno	20	20	20	15	15	15	10	10	10

Formula	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40	F41	F42
Material	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	20	20	22.5	22.5	22.5	25	25	25
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	10	10	12.5	12.5	12.5	15	15	15
Ceniza volante	10	5	15	10	5	15	10	5	15
Cemento	10	15	5	10	15	5	10	15	5
Piedra pómez	20	20	20	15	15	15	10	10	10

---

Los especímenes que van cumpliendo el tiempo de curado se dejan reposar en bolsas de polietileno para posteriormente obtener las propiedades mecánicas.



**Figura 2.6.** Especímenes para ensayar propiedades mecánicas

Se colocaron los materiales en estado seco en una mezcladora mecánica, conforme al procedimiento ASTM C305 y luego se le agregó el agua (figuras 2.7 a y b).

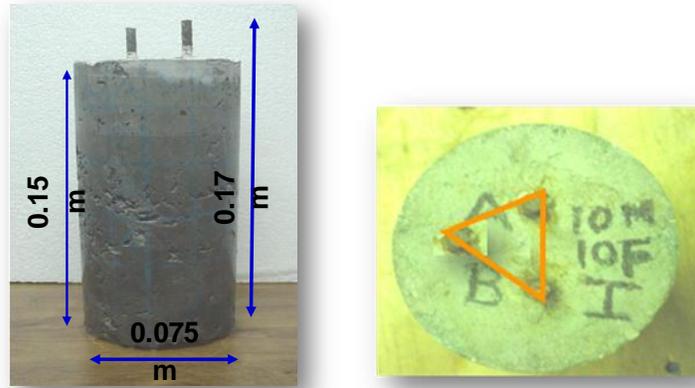


**a)**

**b)**

**Figura 2.7.** a) Materiales en seco y b) Materiales mezclados

Se elaboraron muestras cilíndricas (0.15m de altura y 0.075m de diámetro) con tres varillas de acero de refuerzo, figuras 2.8 y 2.9.



**Figura 2.8** Muestras cilíndricas, medidas y acomodo de acero de refuerzo



**Figura 2.9.** Elaboración de especímenes (cilindros)

Se estudiaron dos lotes, uno nombrado acero limpio o normal (cepillado) y otro acero pre oxidado (dos ciclos de inmersión en agua y secado al aire libre, sin limpieza) figuras 2.10, para inducir actividad corrosiva. Los especímenes se

---

---

sometieron a curado normal de 28 días, posteriormente fueron inmersos en una solución de cloruro de sodio.

De acuerdo con los objetivos de este trabajo, de todos los especímenes y mezclas elaboradas en el proyecto, solo se presentan las formulaciones de los especímenes ensayados electroquímicamente (potenciales, ruido electroquímico). La selección se realizó en función de la condición física de los especímenes, tras el periodo de curado. Además se muestran los datos, de estas formulaciones, que se obtuvieron de la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, a los 28 días de curado.



*Figura 2.10 Acero pre oxidado y acero limpio(normal)*

## **2.3. Métodos experimentales.**

### **2.3.1. Ensayos mecánicos.**

Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura.

---

---

Los especímenes sometidos al ensayo de flexión y compresión se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en probetas curadas y ensayadas de manera estándar según la norma ASTM C-31 y ASTM C-39.

### **2.3.2. Técnicas electroquímicas.**

Las estadísticas a nivel mundial indican que, aproximadamente el 80 % de los casos reportados de corrosión metálica tienen su origen en un proceso electroquímico. Es por ello que las técnicas electroquímicas son aplicables a la investigación y análisis de la mayoría de tipos de corrosión conocidos.

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas.

Las técnicas electroquímicas empleadas en esta investigación fueron:

- Potenciales de Corrosión, Ecorr
- Ruido Electroquímico (RE).

### **2.3.3. Potenciales de corrosión.**

El equipo utilizado para la medición de potenciales de corrosión fue el siguiente:

- Voltímetro, de MC MILLER Co. (figura 2.11).
- Electrodo de referencia (RE) cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>). (figura 2.12).

- Cables conectores (negro para el electrodo de referencia y rojo para el electrodo de trabajo).



**Figura 2.11.** Voltímetro, de MC MILLER

*Procedimiento General para la medición del potencial de corrosión.*

1. Encender el voltímetro con la configuración DC, 2V, y 100.
2. Introducir el electrodo de referencia (RE) en el medio de prueba (agua) justo a un lado del espécimen que se va a monitorear.
3. Hacer las siguientes conexiones (arreglo experimental): el cable negro al electrodo de referencia y el cable rojo al electrodo de trabajo<sup>1</sup>.
4. Enseguida, el voltímetro arroja el resultado, solo hay que esperar de 5 a 10 segundos para que el potencial se estabilice.

<sup>1</sup> El electrodo de trabajo (WE1) es una varilla, de las tres con las que cuenta el espécimen. El electrodo de trabajo siempre será la misma varilla.



*Figura 2.12 Medición del Potencial, con el electrodo de referencia.*

#### **2.3.4. Ruido electroquímico.**

El equipo utilizado para la prueba de ruido electroquímico fue el siguiente:

- Potenciostato/Galvanostato, Gill AC, de ACM Instruments. (figura 2.13).
- CPU (Central Processing Unit) y monitor, de Hewlett-Packard (HP).
- Electrodo de Referencia (RE) cobre sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ).
- Cables conectores (etiqueta roja para el electrodo de referencia, etiqueta negra para el electrodo de trabajo y etiqueta verde para el electrodo de trabajo 2<sup>2</sup>).
- Caimanes (grandes).

---

<sup>2</sup> Seleccionar otra varilla como el electrodo de trabajo 2 (WE2). El electrodo de trabajo 2 siempre será la misma varilla que se seleccionó.



**Figura 2.13.** Potenciostato/Galvanostato/ZRA

Procedimiento general para iniciar una prueba electroquímica

1. Conectar el potenciostato/galvanostato y el monitor al CPU, enseguida encender los equipos. (figura 2.13).
2. Introducir el electrodo de referencia (RE) en el medio de prueba (agua) justo a un lado del espécimen que se va a monitorear.
3. Hacer las siguientes conexiones (arreglo experimental): el cable con etiqueta roja al electrodo de referencia, el cable con etiqueta negra al electrodo de trabajo, y el cable con etiqueta verde al electrodo de trabajo 2.
4. Una vez preparado el arreglo experimental, poner los parámetros de prueba en el software para cada técnica electroquímica a emplear.

En ésta técnica se emplearon los siguientes parámetros:

- Número de muestreo (número de datos): 1024.
- Velocidad de lectura: 1 dato/s.
- Electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

### **2.3.5 Resistencia a la Polarización Lineal.**

Los parámetros con los que se corrió la técnica de RPL, fueron los siguientes:

- Barrido de polarización:  $\pm 20$  mV.
- Velocidad de polarización: 10 mV/min.
- Electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

---

## Capítulo III.

# Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de la caracterización por corrosión de los materiales aligerados con mezclas ternarias por las técnicas electroquímicas las cuales se pudieron obtener la tendía activo-pasiva, el mecanismo de corrosión, la resistencia electroquímica ( $R_n$ ), el índice de picaduras (IL), entre otros parámetros, y de esta manera realizar la evaluación del comportamiento ante la corrosión de los materiales aligerados y compararlos con un concreto fabricado con el 100% de cemento Portland compuesto.

### 3.1 Resistencia Mecánica.

A las mezclas de concretos aligerados con mezclas ternarias se les realizó el ensayo a compresión a los 28 días, después de un curado en inmersión.

En la Tabla 1 se muestran las formulaciones que se eligieron presentar como resultados más alentadores para esta investigación. Las formulaciones F1-F3 corresponden a una mezcla con Piedra Pómez y las F4-F6 llevan Polipropileno. Las demás formulaciones llevan adiciones de Escoria de alto horno y ceniza volante mezclados en diferentes proporciones con piedra pómez y polipropileno.

En la Gráfica 3.1. se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión de las formulaciones seleccionadas, donde se puede ver que los resultados de los diferentes concretos aligerados con mezclas ternarias diseñados a,  $150 \text{ Kg/cm}^2$ , solamente algunos incrementaron la resistencia

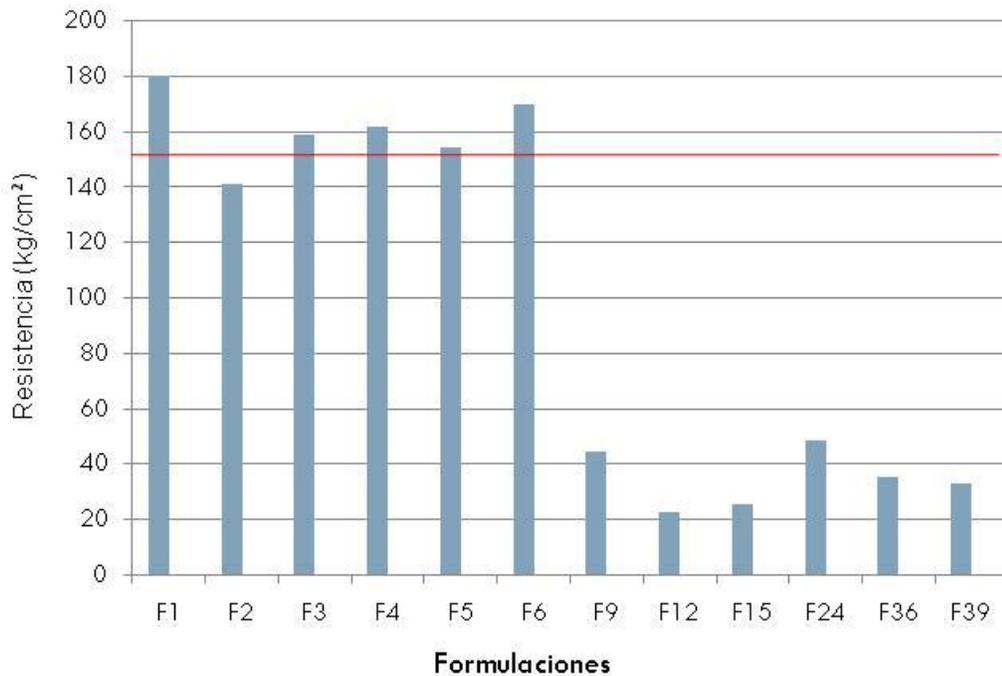
Las mezclas de concretos aligerados con mezclas ternarias que no alcanzaron las resistencias mecánicas fueron F9, F12, F15, F24, F36 y F39. Esto quiere decir que mecánicamente estas formulaciones no tienen un buen comportamiento ya que la resistencia se abatió en más del 60% al tener estas dosificaciones. Esto se puede deber a que el área superficial de estas adiciones resulta ser demasiado grande y por tal motivo requiere de tener mayor agua para que pueda llevarse a cabo una buena hidratación y así poder alcanzar la resistencia mecánica a la cual fue diseñada.

La consistencia a la trabajabilidad se puede ver al llevar a cabo la fabricación de los concretos donde no hubo una buena consistencia.

Como Kemal y Kirca, que realizaron mezclas binarias y ternarias de concretos, usando materiales cementantes y empleando superplastificantes, donde encontraron que reemplazando un 15% de cemento Portland con este material, la mezcla de concreto presentaba una ganancia de resistencia a la compresión del 30% con respecto a un concreto control. Así mismo los concretos aligerados con mezclas ternarias formulaciones F1-F6 obtuvieron ganancias de resistencia a la compresión de hasta un 15%, con respecto al diseño la mezcla control.

**Tabla 3.1.** Relación de la concentración en por ciento de materias primas por formulación de concreto con la adición de aditivos

Formula	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F9	F12	F15	F24	F36	F39
Material	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caliza +10	20	22.5	25	20	22.5	25	20	22.5	25	25	20	22.5
Caliza +50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caliza Fina	10	12.5	15	10	12.5	15	10	12.5	15	15	10	12.5
Cemento	20	20	20	20	20	20	5	5	5	5	5	5
Piedra pómez	20	15	10	-	-	-	20	15	10	-	-	-
Polipropileno	-	-	-	20	15	10	-	-	-	10	20	15
Escoria	-	-	-	-	-	-	15	15	15	15	-	-
Ceniza volante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	15
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )											
Ensayo de Compresión	180.47	140.94	159.33	161.91	154.40	170.26	44.21	22.36	25.17	48.57	34.88	32.80



**Gráfica3.1.** Resistencia a la compresión de concretos aligerados a 28 días

El uso de aditivos minerales con área superficial alta y poco reactivas, no contribuyen al desarrollo de resistencias mecánicas tempranas del concreto, pero si podrán ganar resistencias a futuro.

En la presente investigación, se observo que las mejoras en la resistencia a la compresión del concreto aligerado que contienen puzolanas, se puede explicar por el producto de las reacciones químicas y por efectos físicos de las puzolanas.

El sílice amorfo y el hidróxido de calcio (CH) producido por la hidratación del cemento para formar CSH hacen el efecto químico debido a las reacciones puzolanicas.

El efecto que tienen las partículas de ceniza Volante y Escoria, de envolver o recubrir los materiales sólidos, llenando los espacios entre los granos de cemento, de la misma manera que el cemento llena los espacios entre los agregados finos, y los agregados finos llenan los espacios de los agregados gruesos del concreto.

---

## 3. 2 Técnicas Electroquímicas

### 3.2.1. Potenciales de Corrosión ( $E_{corr}$ )

El potencial electroquímico de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero en concreto es un parámetro que indica el estado de avance de la corrosión del acero (pasivo o activo).

El análisis de las gráficas de potencial de corrosión o potenciales de media celda obtenidas en esta investigación se realizaron de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876 y a criterios establecidos por organismos internacionales como el (DURAR), ver Tabla 1.

Los valores de potencial proporcionan la probabilidad acerca de la corrosión del acero que se esté presentando en el acero embebido dentro del concreto, pero es muy importante que estos sean interpretados.

En la figura 3.1 y 3.2 se puede observar la medición de potenciales y de técnicas electroquímicas (Resistencia a la polarización y ruido electroquímico).



**Figura 3.1.** Espécimen 1 normal.



**Figura 3.2 .** Espécimen 24 oxidado.

---

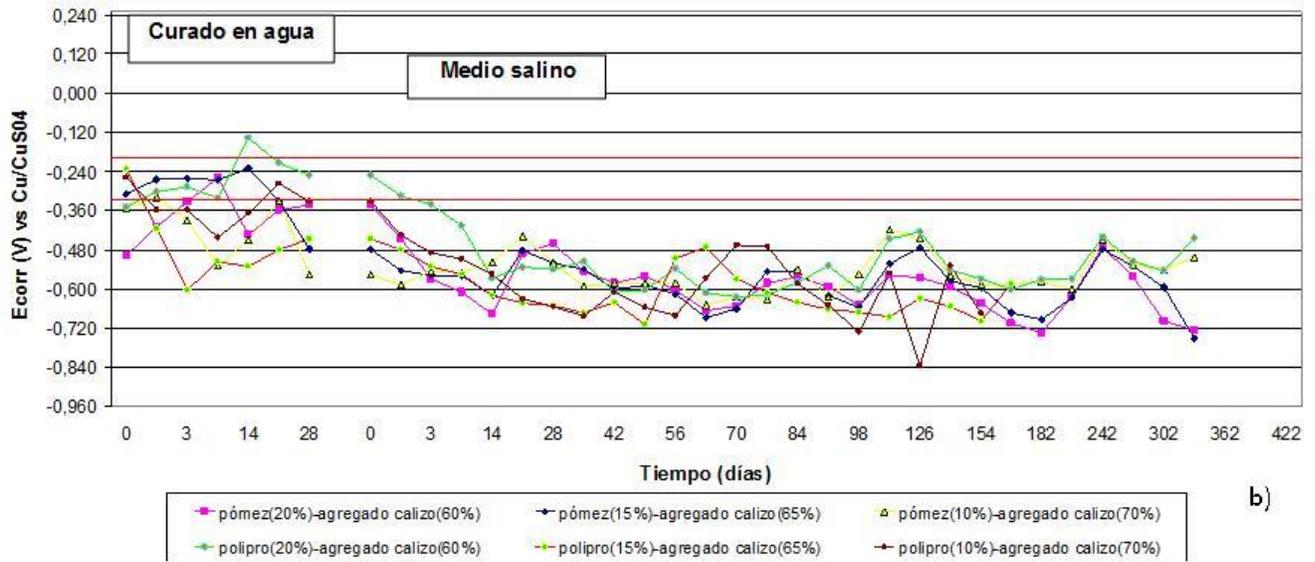
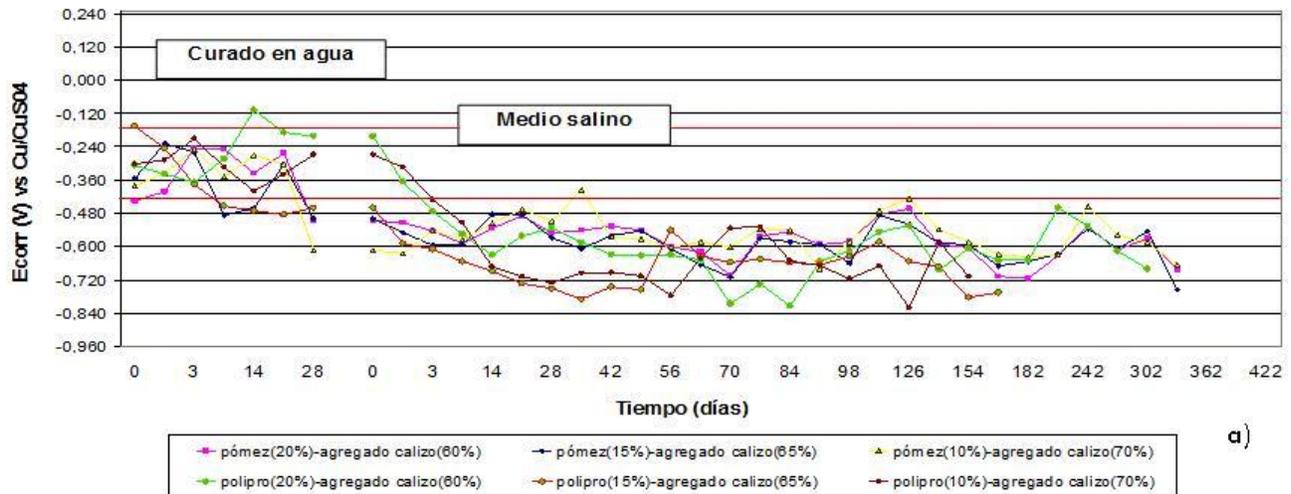
En la Gráfica 3.2, Se presentan los resultados del comportamiento del potencial de corrosión para el espécimen con formulaciones F1-F6 con acero limpio. Los concretos con adiciones de piedra pómez (F1-F3) y con Polipropileno (F3-F6) presentaron en la etapa de curado potenciales entre -120 y -480 mV, pasando desde 10 % de probabilidad de corrosión hasta 90 % de corrosión de acuerdo como se indica en la norma ASTM C876.

Los especímenes de piedra pómez (15%)-caliza(65%) muestra valores muy activos de -480 mV y con una acción muy activa en el tiempo.

Al momento de inmersión en medio salino todos los especímenes con piedra pómez y polipropileno muestran índices de activación, desde el inicio del curado, y esta actividad del acero de refuerzo se va incrementando conforme pasa el tiempo (después de 300 días de exposición). a excepción del espécimen de 15% , el potencial de corrosión es moderado alto, en el transcurso del curado muestran actividad alta, con variación moderada entre los especímenes.

No existe una diferente entre las muestras las formulaciones con piedra pómez y polipropileno ya que todas muestran tendencia a la activación

Los valores de los potenciales especímenes de las formulaciones F1-F6 con acero preoxidado de piedra pómez y polipropileno presentan el mismo comportamiento de los especímenes con acero limpio. Los potenciales si son mas activos (negativos) van desde -240 mV hasta -600mV en la etapa de curado, pero cuando se colocan en el medio salino estos potenciales son más activos hasta llegar a ser más o menos contantes en potenciales promedio de -500 mV. De acuerdo con ASTM C876 los potenciales comienzan en incertidumbre y terminando en 90% de probabilidad de corrosión. Tampoco existe una diferencia significativa en los potenciales de corrosión, entre los especímenes de piedra pómez y polipropileno

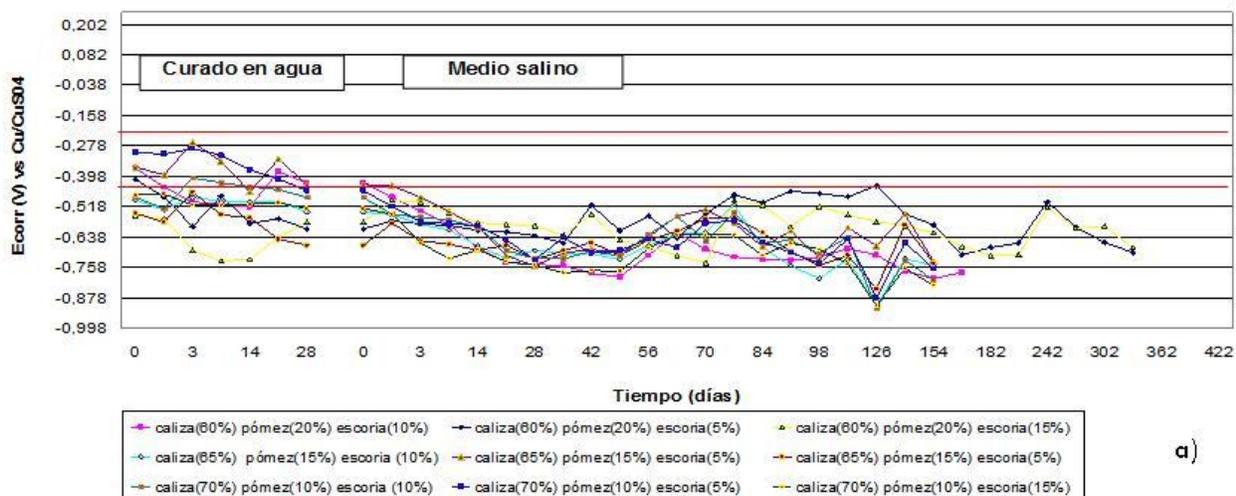


**Gráfica 3.2.** Potenciales de corrosión del espécimen F1-F6, con relación pómez-agregado calizo y Polipropileno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

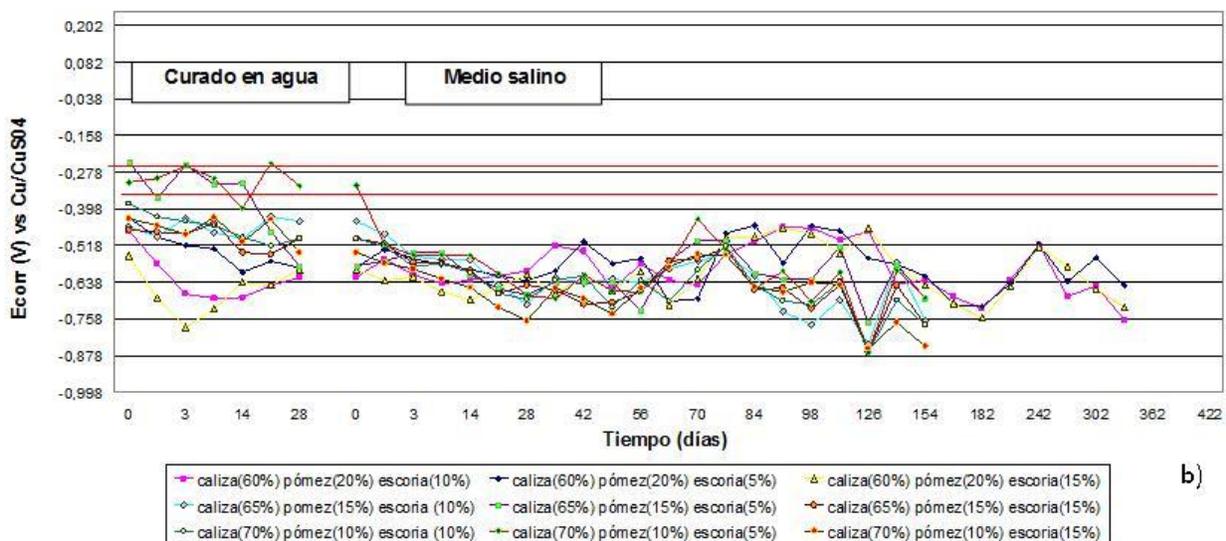
Los resultados del comportamiento del potencial de corrosión para los especímenes de las formulaciones F7-F15 con acero limpio y preoxidado, se presentan en la Gráfica 3.3. Los concretos con adiciones de piedra caliza, piedra pómez y escoria de alto horno en diferentes relaciones, muestran valores del potenciales comenzando desde valores de -280 mV en la etapa de curado y teniendo a los 28 días -650 mV. Esto representa valores muy activos que indican

90 % de corrosión de acuerdo como se indica en la norma ASTM C876 (Gráfica 3.3 a).

Al momento de inmersión en medio salino todos las formulaciones con estas relaciones de piedra caliza, piedra pómez y escoria de alto horno, mostraron índices de activación elevados desde su inicio, marcando potenciales muy negativos de -350 a -700 mV y después manteniéndose en un promedio de los -750 mV. Nuevamente todos los potenciales están en el 90% de probabilidad de corrosión.



a)



b)

**Gráfica 3.3.** Potenciales de corrosión del espécimen F7-15, con relación piedra pómez-agregado calizo y escoria de alto horno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

---

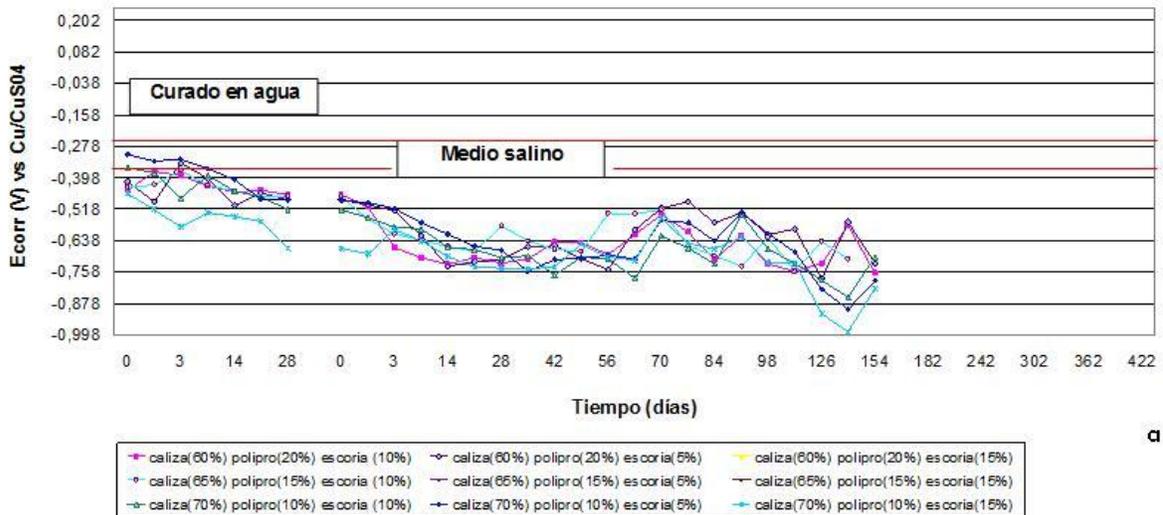
En la Gráfica 3.3b) se presentan los potenciales de las formulaciones de los especímenes con acero preoxidado, donde los potenciales son más activos (negativos) van desde -210 mV hasta -590mV en la etapa de curado, pero cuando se colocan en el medio salino estos potenciales son más activos hasta llegar a ser más o menos constantes en potenciales promedio de -650 mV. De acuerdo con ASTM C876 los potenciales comienzan en incertidumbre y terminando en 90% de probabilidad de corrosión.

En la Gráfica 3.4 a-b) se presentan los resultados del comportamiento del potencial de corrosión para los especímenes de las formulaciones F16-F24 con acero limpio y preoxidado; tanto en la etapa de curado como en inmersión en el medio salino.

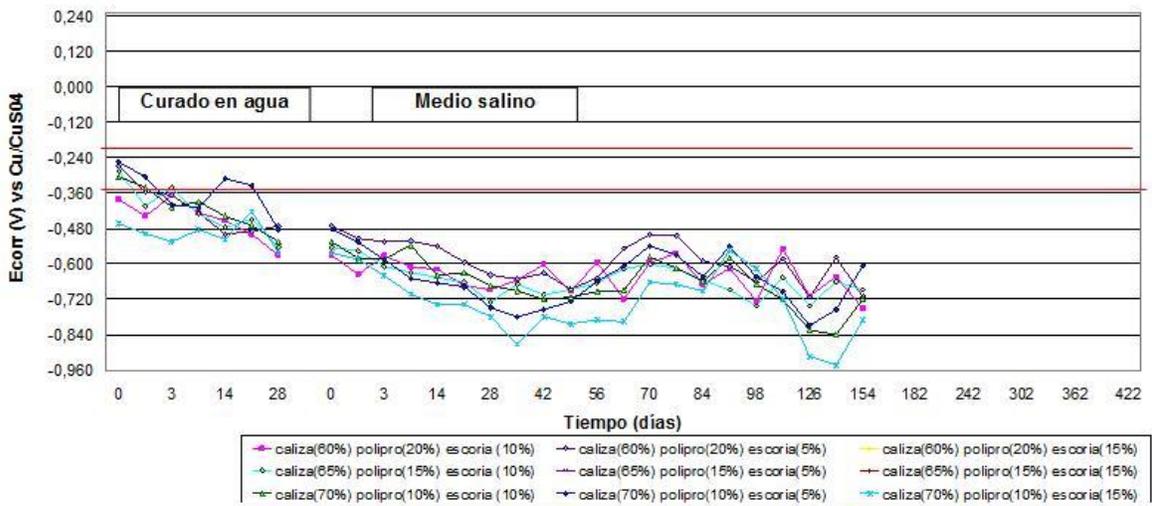
Los concretos con adiciones de piedra caliza, polipropileno y escoria de alto horno en diferentes relaciones, muestran valores del potencial comenzando desde valores de -280 a -450 mV en la etapa de curado y teniendo a los 28 días valores muy activos. Esto representa que tuvieron desde un inicio incertidumbre y pasaron inmediatamente al 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo con la marca ASTM C876.

Al momento de inmersión en medio salino todas las formulaciones con estas relaciones de piedra caliza, polipropileno y escoria de alto horno, mostraron índices de activación muy elevados desde su inicio, marcando potenciales muy negativos de -450 a -700 mV y llegando a tener algunos especímenes 950 mv. (los potenciales están en el 90% de probabilidad de corrosión).

El comportamiento del potencial del acero en condiciones de acero limpio y acero preoxidado, no hay diferencia en cuanto a su actividad por corrosión la tendencia es la misma.



a)



b)

**Gráfica 3.4.** Potenciales de corrosión del espécimen F7-15, con relación Polipropileno, agregado calizo y escoria de alto horno. a) acero limpio y b) acero preoxidado

En la Gráfica 3.5 a-b) se presentan los resultados del comportamiento del potencial de corrosión para los especímenes de las formulaciones F34-F42 con acero limpio y preoxidado; tanto en la etapa de curado como inmersión en el medio salino.

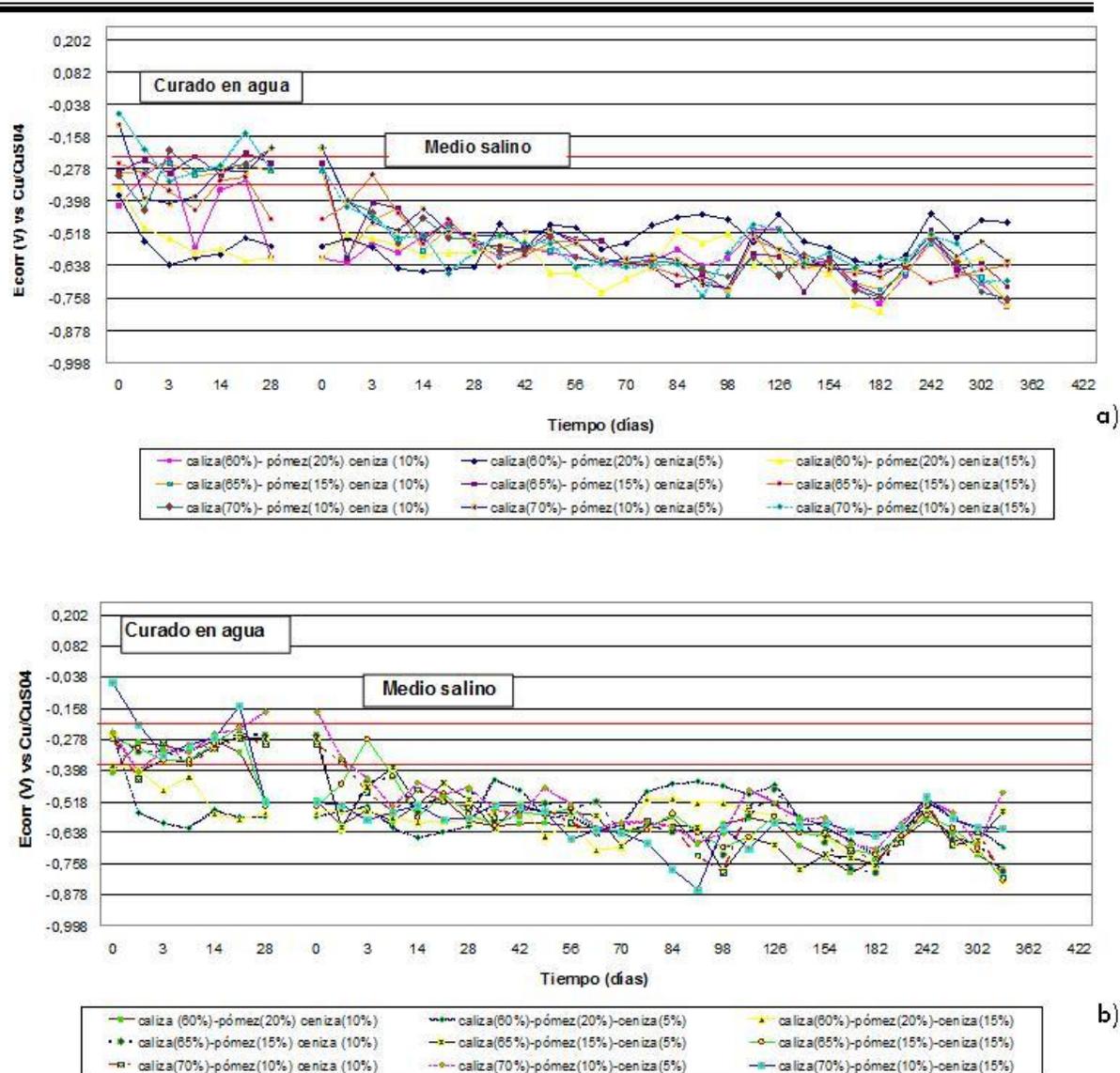
---

Los concretos con adiciones de piedra caliza, piedra pómez y ceniza volante en diferentes relaciones Gráfica 3.5 a) especímenes con acero limpio, muestran valores del potenciales comenzando desde valores de -38 a -250 mV en la etapa de curado (excepto algunas relaciones donde tuvieron potenciales por debajo de los -350 mV) y teniendo a los 28 días valores de aproximadamente -250 mV. Esto representa que tuvieron desde un inicio 10% incertidumbre y manteniendo en incertidumbre la mayoría de las formulaciones en la etapa de curado.

Al momento de inmersión en medio salino todas las formulaciones con estas relaciones, mostraron tendencia a la activación desde -180 mV hasta -670 mV después de 300 días de exposición. Con estos valores se tiene un 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo con la norma ASTM C876.

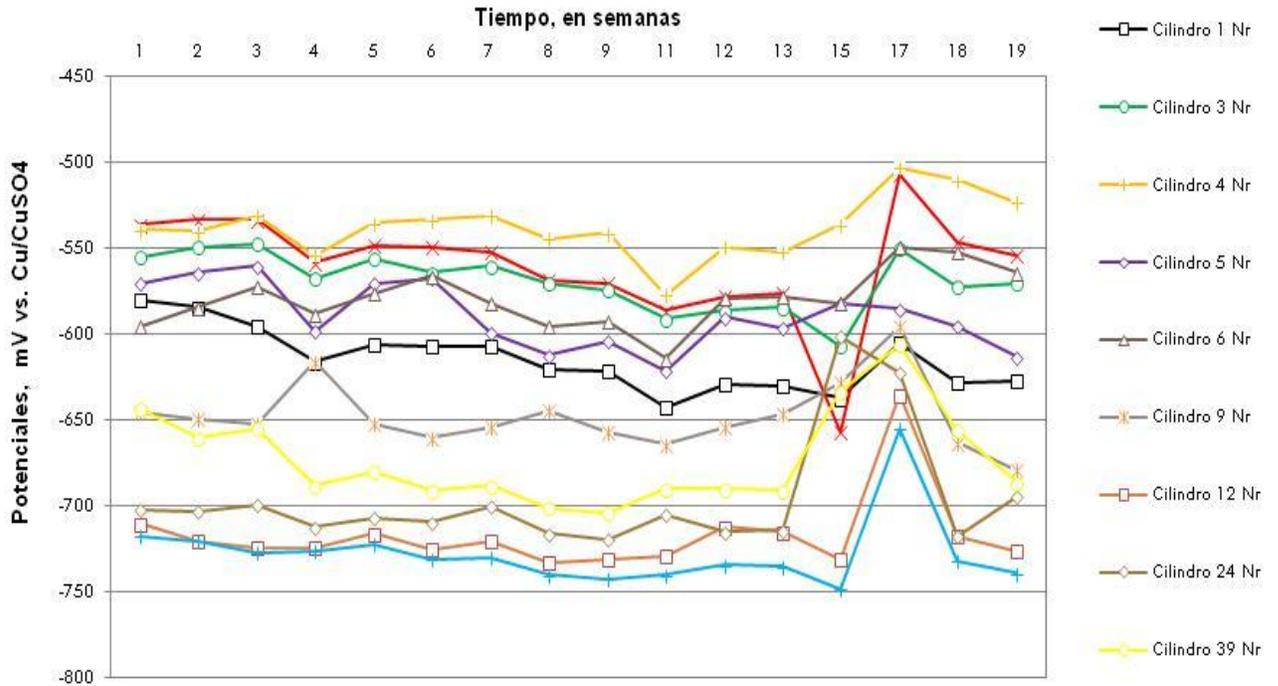
Para los especímenes de concreto con acero preoxidado (Gráfica 3.5 b), presentaron un comportamiento muy similar al de los especímenes con acero limpio tanto en la etapa de curado como en la etapa de inmersión en medio salino. Los potenciales estuvieron desde -200 mV hasta llegar a los -700 mV (solamente algunos tuvieron -870 mV. La tendencia que presentan estos concretos indican que el potencial se vuelve más activo conforme avanza el tiempo y no presenta una tendencia a estabilizarse.

En cuanto a la normatividad de ASTM C876, indica que los potenciales comenzaron teniendo 10% de probabilidad de corrosión pasando por la incertidumbre y activándose después de los -350 mV y presentando un comportamiento del 90% de probabilidad de corrosión.

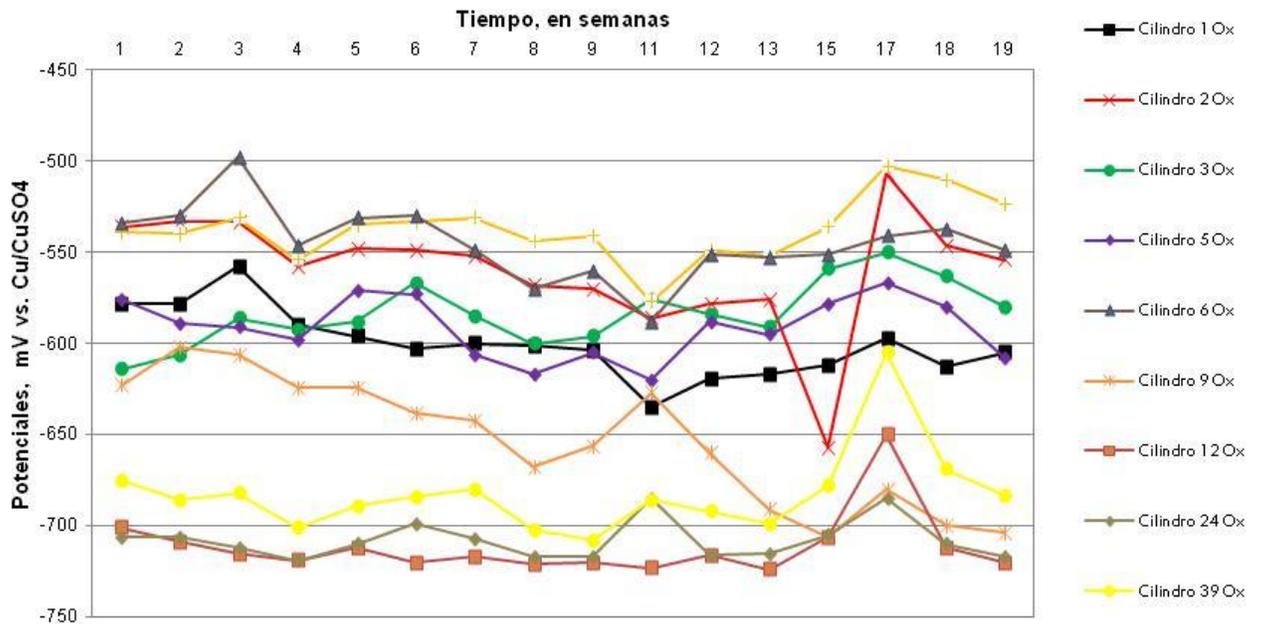


**Gráfica 3.5.** Potenciales de corrosión del espécimen F34-F42, con relación piedra pómez-agregado calizo y ceniza volante. a) acero limpio y b) acero preoxidado

En la Gráfica 3.6 y 3.7 se presenta el comportamiento del potencial por 17 semanas para las formulaciones seleccionadas y con las condiciones de acero limpio y preoxidado. Se puede ver que el potencial inicia en valores de -520 a 730 mV, observándose que se mantiene casi constante por todo este tiempo, hay fluctuaciones en el tiempo pero no son relevantes, estos potenciales son activos e indican que se tiene 90 % de probabilidad de corrosión como se marca en la norma ASTM C876. En el caso de los concretos aligerados con mezclas ternarias pero con acero preoxidado se tiene este mismo comportamiento.



**Gráfica 3.6.** Potenciales de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias y con acero limpio.



**Gráfica 3.7.** Potenciales de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias y con acero preoxidado.

---

### 3.2.2. Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Después de realizar el análisis de las gráficas de Potencial Vs Corriente ( $E$  vs Densidades de corriente,  $I$  en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), y de esta manera poder evaluar el nivel de corrosión presentado en las diferentes formulaciones de concretos aligerados con mezclas ternarias expuestas en medio salado de cloruro de sodio al 3.5 %.

La técnica de RPL se basa en la observación de la linealidad de la polarización de la curva alrededor de  $E_{\text{corr}}$ . Es decir, la pendiente de la curva de polarización (Feliu, 1989).

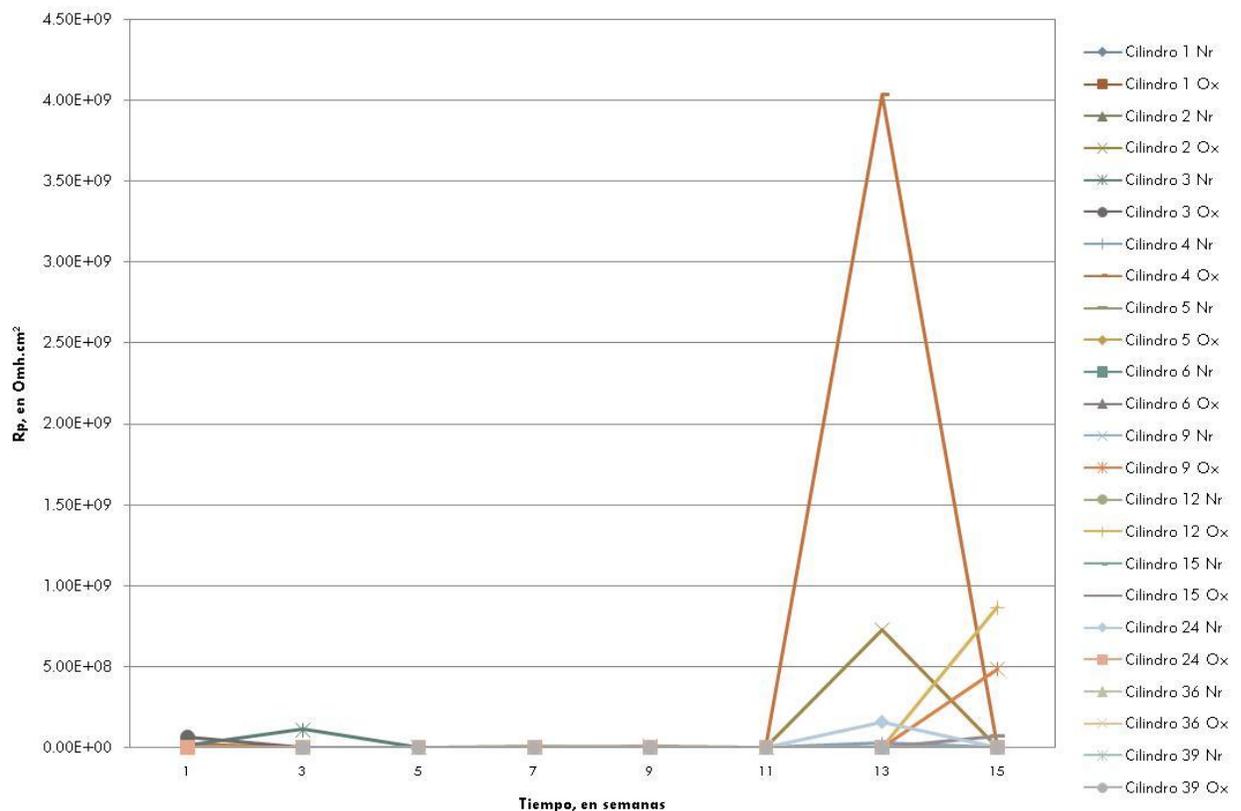
Stern en 1957, se basó en estudios previos realizados por Wagner y Traud, y en los principios generales de electroquímica, y las formulaciones fundamentales de la velocidad de corrosión de acuerdo a los valores de  $E_{\text{corr}}$  originados de las curvas de polarización. Sus notables conocimientos en electroquímica le permitió proponer esta técnica, simple, rápida y no destructiva derivada de la aproximación de un comportamiento lineal de la dependencia logarítmica del potencial y de la corriente,. La técnica de RPL se basa en la observación de la linealidad de la polarización de la curva alrededor de  $E_{\text{corr}}$ . Es decir, la pendiente de la curva de polarización

El criterio que se empleó para evaluar el nivel de corrosión fue el que propone la Red DURAR, donde presenta cuatro niveles de corrosión; que van de despreciables hasta niveles muy elevados de corrosión como se muestra en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.** Criterio de Evaluación del nivel de corrosión

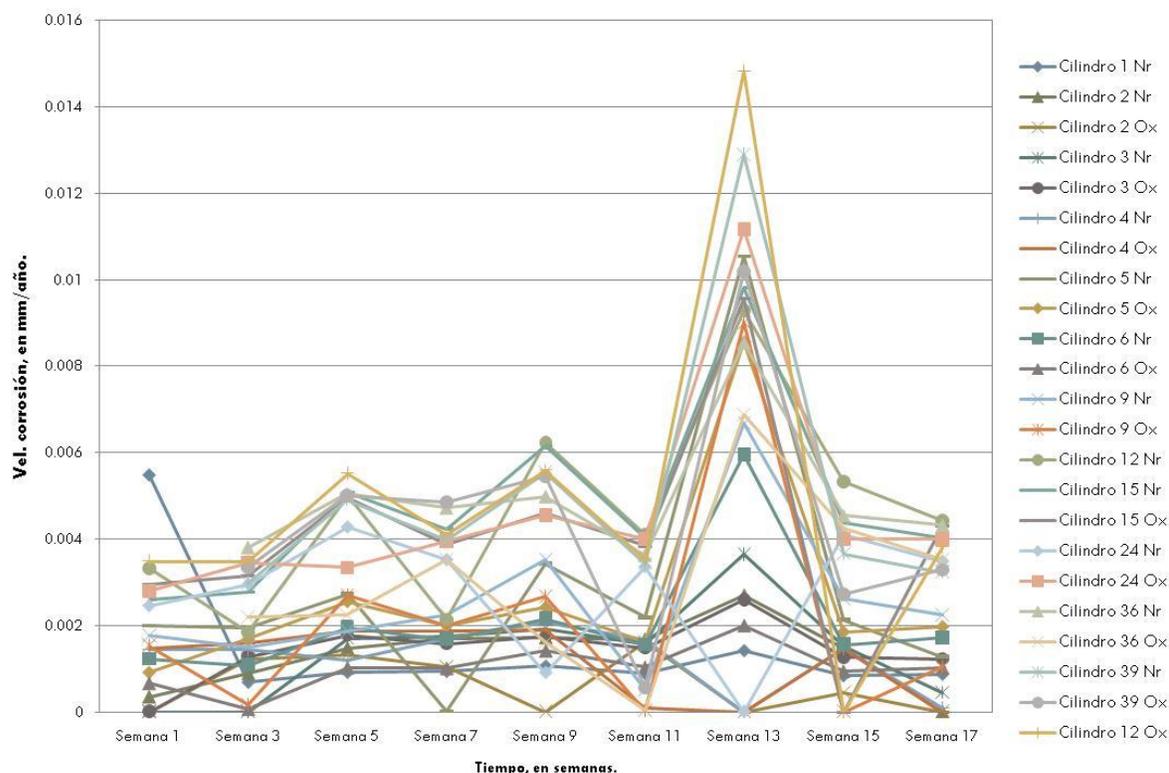
$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0,5	Moderado
0,5 – 1	Elevado
> 1	Muy elevado

En la gráfica 3.8 de Resistencia a la polarización en función del tiempo se puede observar que las formulaciones elegidas de los concretos aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado, tiene valores de  $R_p$  en el orden de  $10^9$  Ohms- $cm^2$  lo que indica que la resistencia es muy alta para estos materiales por lo cual su velocidad de corrosión es elevada (Gráfica 3.9).

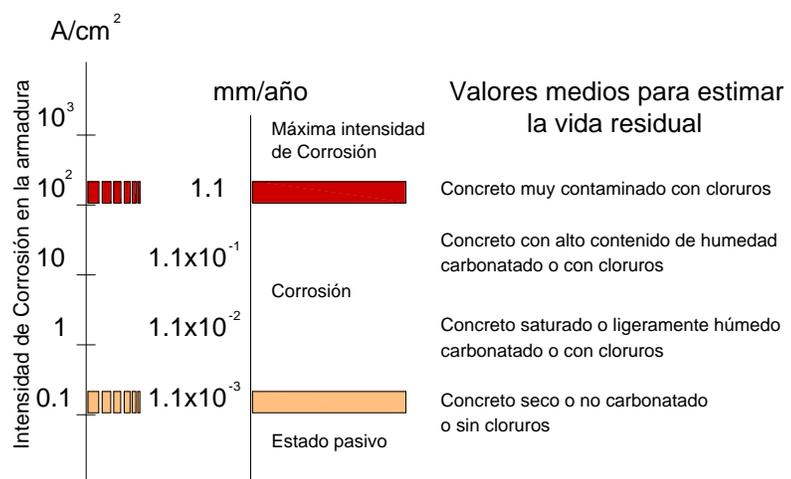


**Gráfica 3.8.** Resistencia a la Polarización Lineal de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado.

Los valores de la velocidad de corrosión para los concretos aligerados con mezclas ternarias presentan velocidades de corrosión del orden de  $10^{-1}$  y  $10^{-2}$  mm/año; esto representa corrosión de acuerdo con los criterios del DURAR, ver figura 3.3.



**Gráfica 3.9.** Velocidad de corrosión de especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado.



**Figura 3.3.** Estimaciones de la velocidad de corrosión. Criterio DURAR

---

---

### 3.2.3 Ruido Electroquímico (RE).

La técnica de ruido electroquímico es muy sensible y útil, además de poder estimar la velocidad de corrosión del sistema, se emplea particularmente en situaciones en donde los procesos incluyen corrosión generalizada o la interpretación del rompimiento de la película pasiva y el ingreso de las especies provocando corrosión localizada, esta técnica caracteriza la forma y el tipo de corrosión mediante dos tipos de análisis: visual y estadístico.

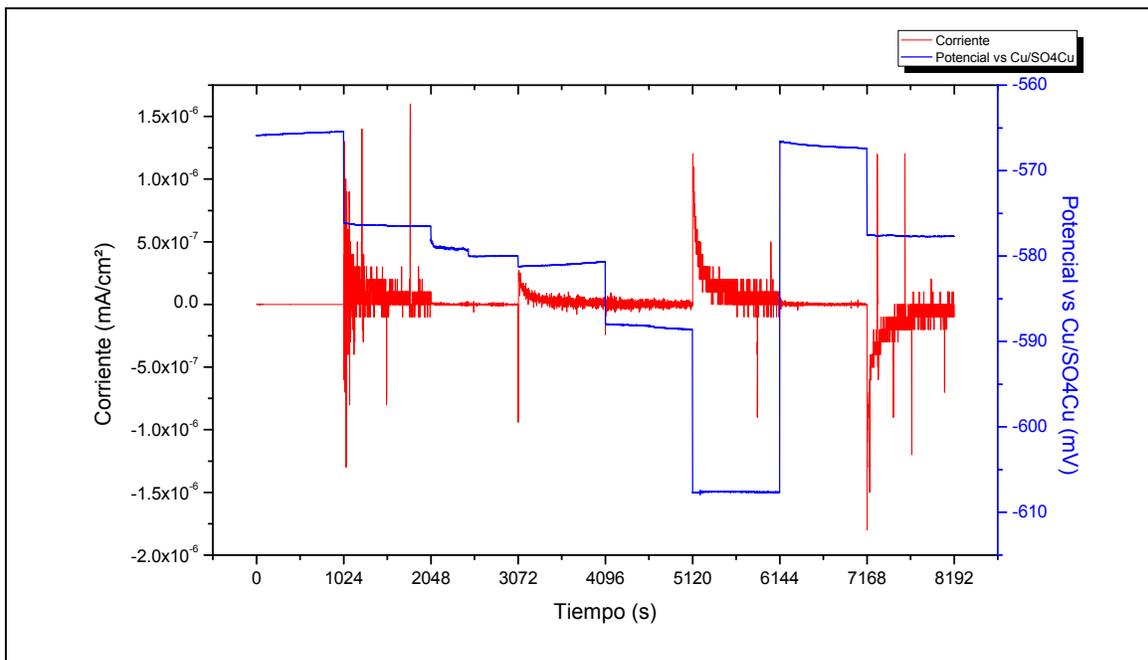
#### 3.2.3.1 Análisis visual de las series de tiempo.

El análisis visual de las series de tiempo, es la manera más sencilla y directa de examinar el comportamiento de la corrosión de materiales sometidos a procesos de corrosión, puesto que solo es necesario identificar los detalles característicos de los tipos de corrosión. Asociando los transitorios a corrosión generalizada o al rompimiento o repasivación, así como las oscilaciones asociadas a hendiduras o picaduras.

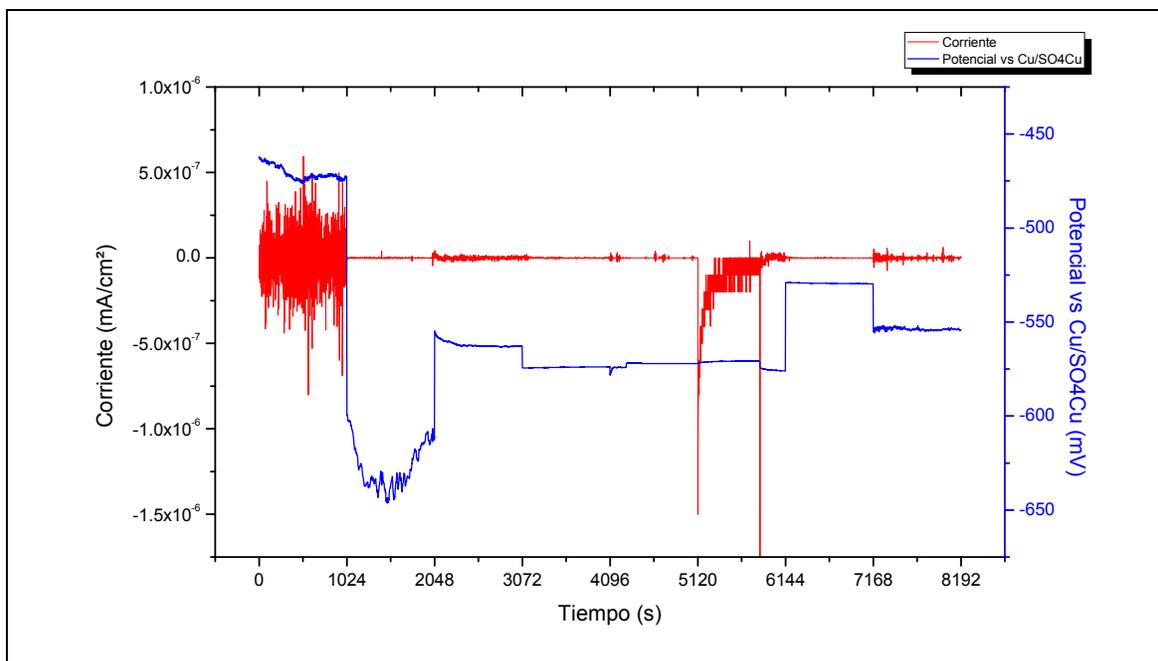
El análisis de las series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial para los especímenes de concreto aligerados con mezclas ternarias se presentan en las gráficas 3.10 a 3.19. Se eligieron solamente las formulaciones F2, F5, F12, F24 y F39 en la condición de acero limpio y preoxidado. Dada la cantidad de información obtenida en esta investigación se seleccionaron las formulaciones mencionadas porque cubren de manera general todas las formulaciones propuestas.

En la gráfica 3.10 se presenta la serie de tiempo de ruido en potencial y corriente correspondiente a la formulación F2 (piedra caliza y piedra pómez) con acero limpio y la gráfica 3.11 de la misma formulación pero con acero preoxidado. Las fluctuaciones del potencial en los dos casos tienen tendencia a la activación siendo más intensa para el concreto con acero preoxidado (Diferencia de -200 mV). Aunque los transitorios del potencial son más bruscos en el acero limpio/normal. Las fluctuaciones de la señal de corriente se observa que hay poca

amplitud y baja frecuencia, excepto para las señales del concreto con acero limpio. Además se observa que si se tienen picos anódicos en el tiempo.



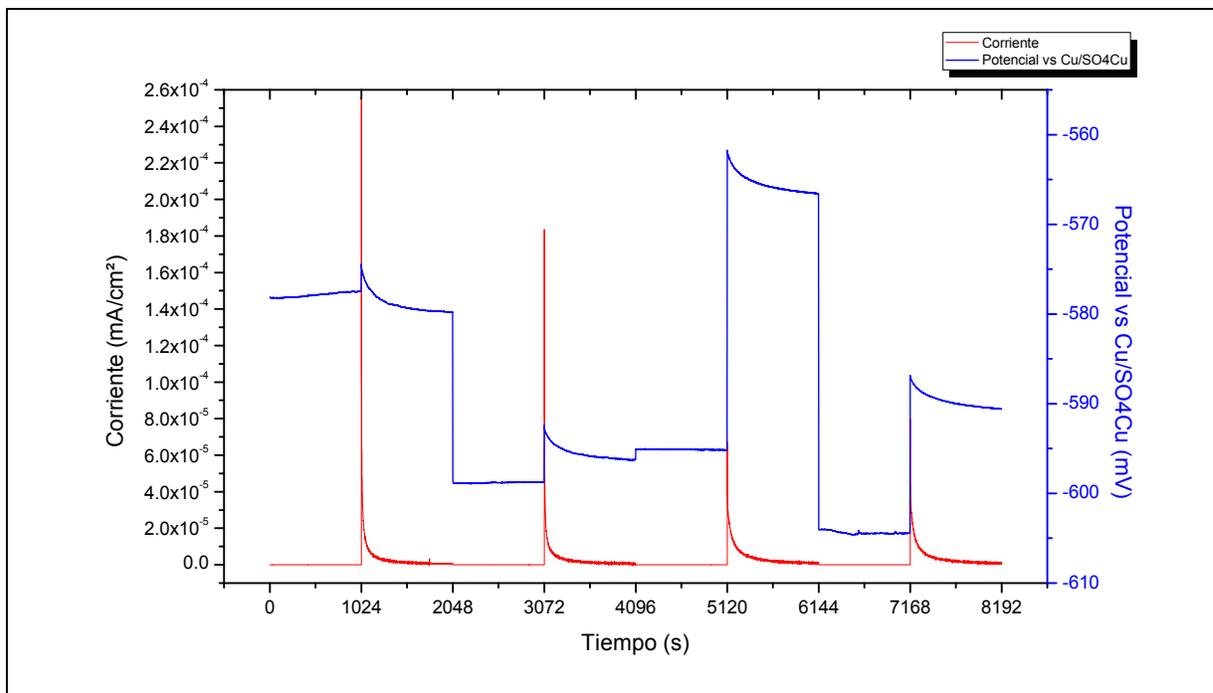
**Gráfica 3.10** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 2 con acero limpio



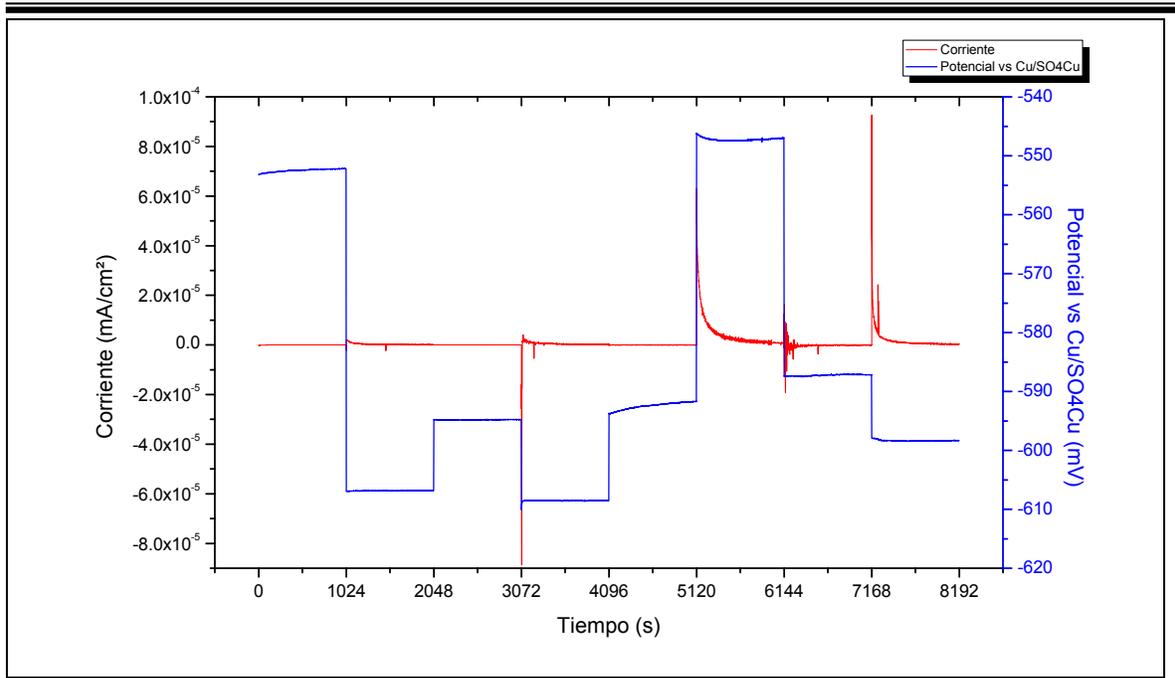
**Gráfica 3.11** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 2 con acero preoxidado

En la gráfica 3.12 se presenta la serie de tiempo de ruido en potencial y corriente correspondiente a la formulación F5 (piedra caliza y polipropileno) con acero limpio y la gráfica 3.13 de la misma formulación pero con acero preoxidado.

Las fluctuaciones del ruido en potencial en los dos casos tienen tendencia a la activación teniendo caídas abruptas y recuperaciones espontáneas. Esto representa indicios de corrosión localizada. Estas fluctuaciones del potencial se ven más intensas en los concretos con acero limpio. En cuanto a las fluctuaciones del ruido en corriente son de menor intensidad en el concreto con acero preoxidado, pero en acero limpio están representando picos anódicos en el tiempo y están bien asociados a las señales del potencial en 1024,3078,5120 y 7168 puntos por segundo.



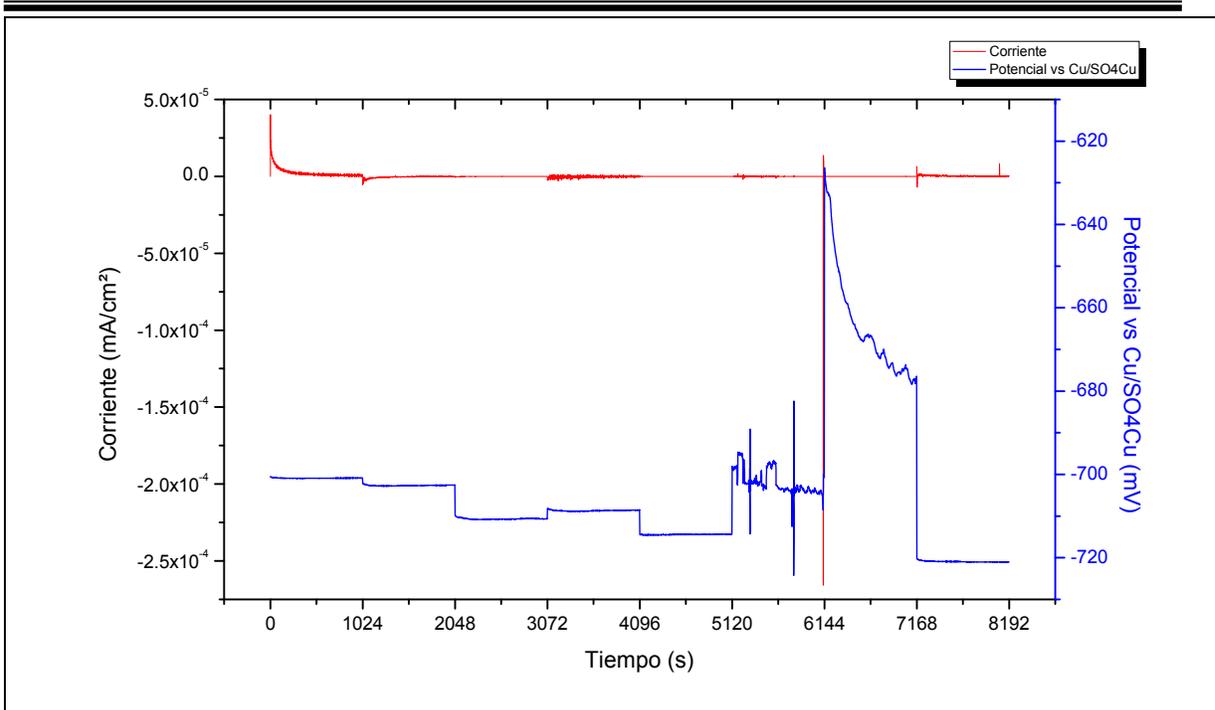
**Gráfica 3.12** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 5 con acero limpio



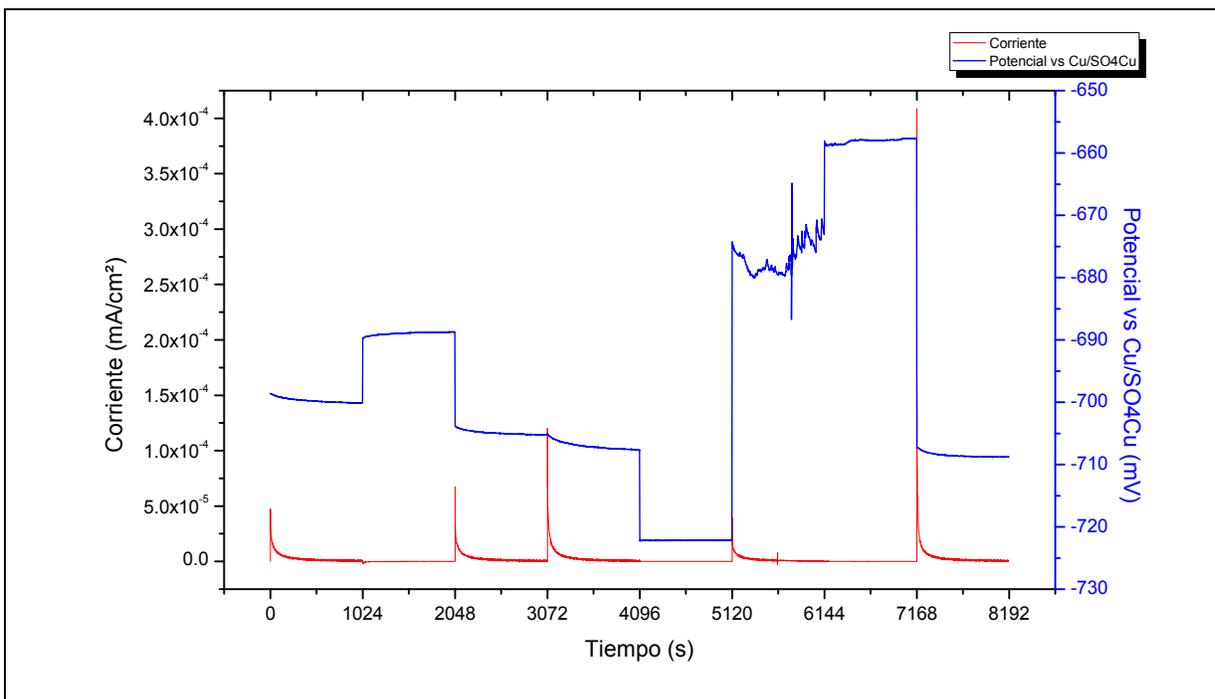
**Gráfica 3.13** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 5 con acero preoxidado

Las serie de tiempo de ruido en potencial y corriente correspondiente a la formulación F12 (piedra caliza, escoria y piedra pómez) con acero limpio gráfica 3.14 y la gráfica 3.15 de la misma formulación pero con acero preoxidado.

El fenómeno de activación se ve muy marcado en las fluctuaciones del ruido en potencial en las dos condiciones de acero limpio y preoxidado, donde hay diferencias del potencial de alrededor de -100 mV, teniendo caídas repentinas del potencial. Esto indica que no hay corrosión generalizada. La señal de ruido en corriente para el acero limpio tiene fluctuaciones de muy baja amplitud y frecuencia. Y en la condición de acero preoxidado se vuelve a presentar los picos anódicos marcados a los tiempo de 2048,3078, 5120 y 7168 puntos por segundo.



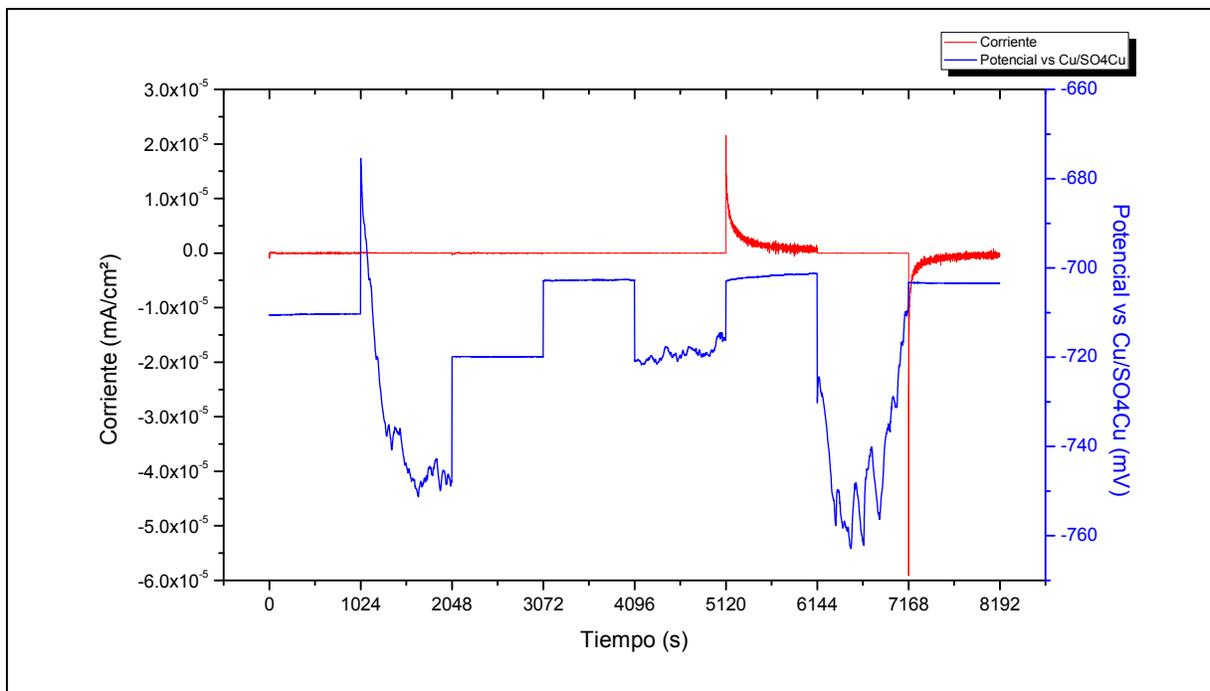
**Gráfica 3.14** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 12 con acero normal



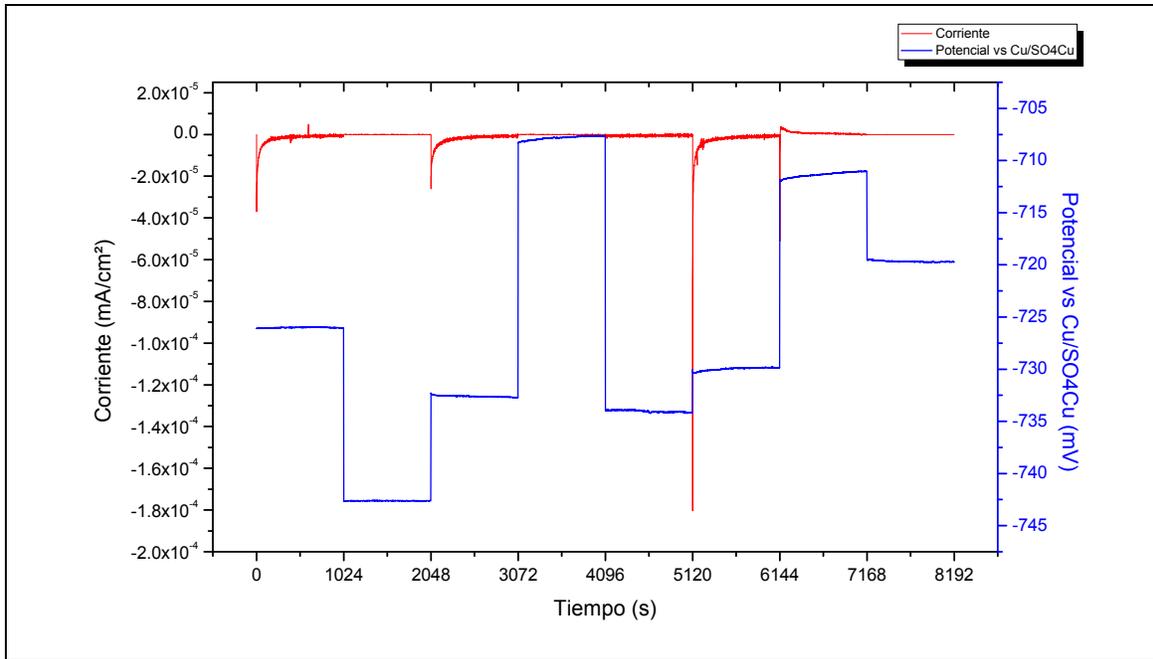
**Gráfica 3.15** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 12 con acero preoxidado

En la gráfica 3.16 y 3.17 se observan las series de tiempo de ruido en potencial y corriente para los concretos aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado. Esta formulación corresponde a la F24 en la cual se adiciona piedra caliza, escoria de alto horno y polipropileno.

En las series de tiempo se puede observar que las fluctuaciones del ruido en potencial en los dos casos tienen tendencia a la activación teniendo cambios abruptos más pronunciados para la condición del acero limpio (aprox. -60 mV) y recuperaciones espontáneas, esto indica corrosión localizada. Las fluctuaciones del ruido en corriente son de menor intensidad en el concreto con acero preoxidado, pero en acero limpio están representando picos anódicos y catódicos en el tiempo.



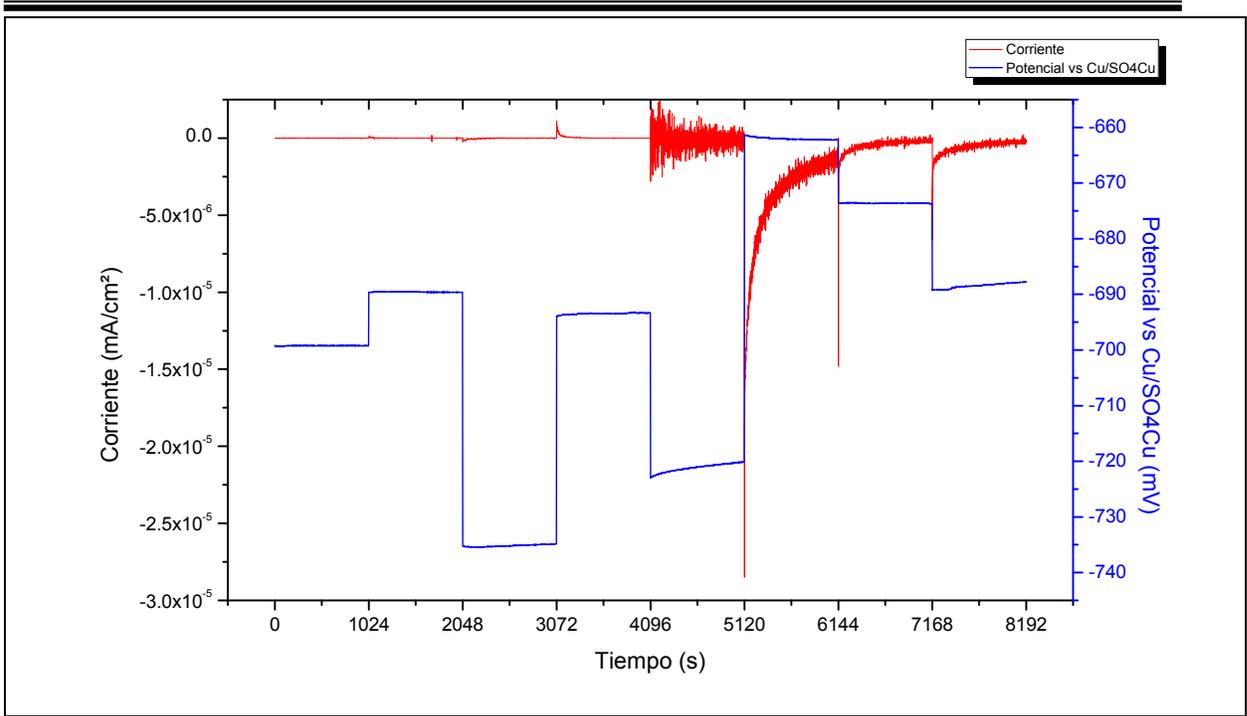
**Gráfica 3.16** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 24 con acero normal



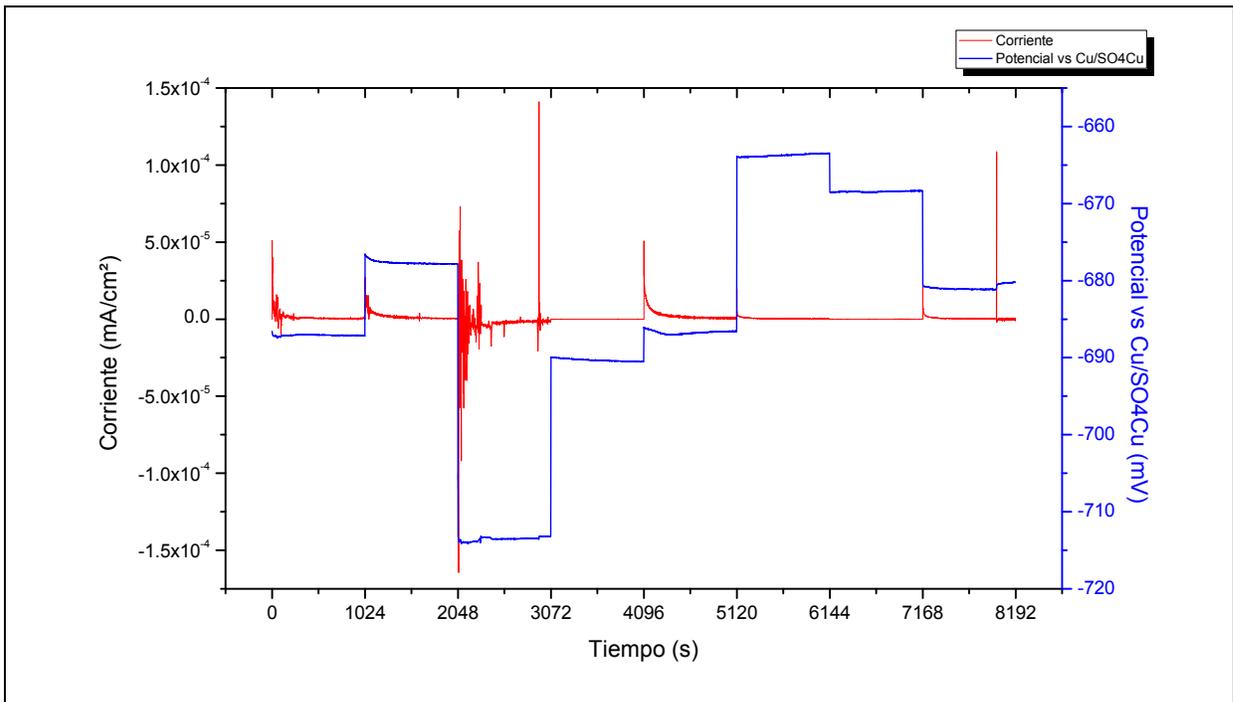
**Gráfica 3.17** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 24 con acero preoxidado

Los resultados de ruido electroquímico para los concretos aligerados con mezclas ternarias con acero limpio y preoxidado con la formulación F39 (piedra caliza, escoria de alto horno, ceniza y piedra pómez), se pueden observar en las gráficas 3.18 y 3.19.

En las series de tiempo se puede observar que las fluctuaciones del ruido en potencial en los dos casos tienen tendencia a la activación teniendo cambios abruptos de baja frecuencia y poca amplitud. Los potenciales se volvieron muy negativos alrededor de los -700 mV. Las series de tiempo de ruido en corriente asocia problemas de corrosión localizada para las dos condiciones acero limpio y preoxidado., nuevamente se observan picos anódicos y catódicos siendo más frecuentes en la condición de acero limpio.



**Gráfica 3.18** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 39 con acero normal



**Gráfica 3.19** Series de tiempo de ruido en corriente y potencial, espécimen 39 con acero preoxidado

---

---

#### 4.3.3.2. Análisis estadístico de las series de tiempo.

El análisis estadístico puede caracterizar los procesos del rompimiento de la película pasiva, ya que identifica la forma y el tipo de corrosión generada, además que es muy útil hacer este análisis para el ruido en potencial, para dichos efectos.

Los métodos típicos de análisis incluyen un análisis estadístico como: media, desviación estándar, sesgo, kurtosis, coeficientes de distribución de probabilidad, análisis transitorios y transformados en la frecuencia de dominio real; las transformadas de Fourier o máxima Entropía Espectral, son las técnicas más comúnmente empleadas. Estos métodos, principalmente, utilizan el análisis de los datos digitalizando la señal de corriente y potencial obtenidos de la serie de tiempo.

La estimación estadística requiere que los métodos sean estacionarios, lo cual no se presenta en la realidad, en consecuencia se tiene que remover la tendencia, usualmente realizando una regresión lineal y sustrayendo esta de los datos (Cottis, 2009). Para realizar esto, los valores de potencial y corriente de la serie de tiempo original se ajustan a un polinomio de grado  $n$ .

Se han empleado varios métodos para analizar las series de tiempo generadas de la medición del ruido electroquímico.

La media o promedio es el más común de los parámetros, y el potencial promedio no se considera como parte del ruido electroquímico, aunque se utiliza para calcular otros parámetros de interés como el de corrosión localizada. Las fluctuaciones de la media en largos periodos de tiempo están directamente relacionadas a cambios en los procesos de corrosión. El ruido en corriente teóricamente presentaría un valor de cero entre dos electrodos idénticos. En la práctica esto no es así, debido a pequeñas diferencias en su comportamiento frente a la corrosión.

---

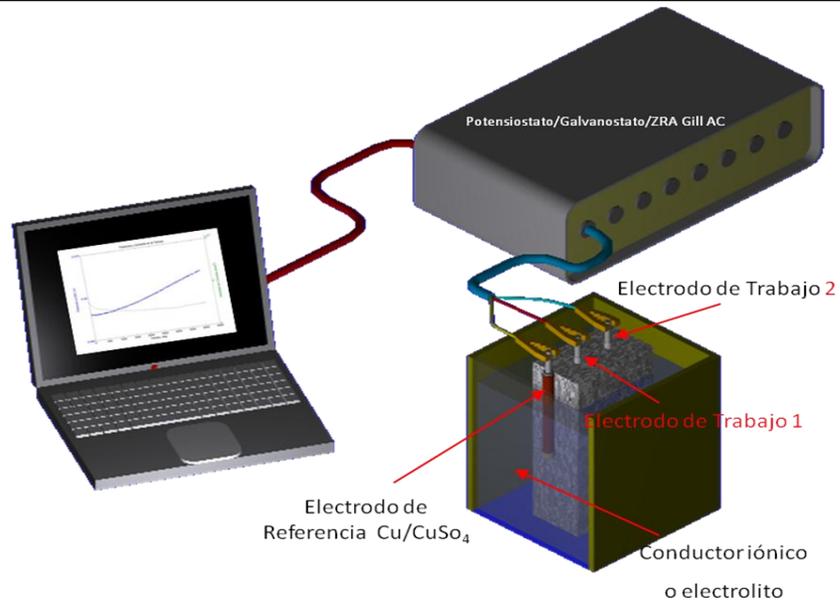
---

La varianza de una señal depende del rango de frecuencias de ésta, y corresponde a la potencia del ruido. Se espera que la varianza de la corriente aumente a medida que la velocidad de corrosión incremente; así como también la corrosión se haga más localizada. En contraste la varianza de potencial disminuye a medida que la corrosión aumenta, pero se incrementa a medida que el ataque se hace más localizado. Esto se cumple para la mayoría de los tipos de corrosión. La desviación estándar es simplemente la raíz cuadrada de la varianza, y su cálculo e interpretación son básicamente la misma. Es un parámetro más comúnmente utilizado y habla del ancho de trazo de la señal o dispersión de los datos de ruido. La raíz cuadrática media (rms) es la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado del potencial o corriente (sin sustraer la media). La rms, varianza, y desviación estándar están relacionadas por lo que no se necesitan calcular las tres.

El coeficiente de variación o variabilidad es la desviación estándar dividida por la media y es la medida de la cantidad de ruido comparado con la media.

A partir de las desviaciones estándar de potencial y de corriente, por la analogía con la ley de Ohm, se calcula la mal llamada resistencia al ruido y equivalente a la resistencia a la polarización. Se relaciona con la velocidad de corrosión total uniforme o generalizada. La resistencia al ruido ( $R_n$ ) incorpora fluctuaciones de la resistencia de la solución, a pesar de que no se aplica una corriente a la celda. Por lo tanto se puede obtener en soluciones de alta resistividad. Una vez obtenida la resistencia se puede calcular la densidad de corriente sustituyendo  $R_n$  en la ecuación de Stern y Geary. Para B se pueden utilizar los valores de 0.026 V y 0.052 V, dependiendo del tipo de sistema a analizar.

En la figura 3.4 se observa el esquema experimental de la prueba de ruido electroquímico.



**Figura 3.4** Arreglo experimental de la técnica de Ruido Electroquímico

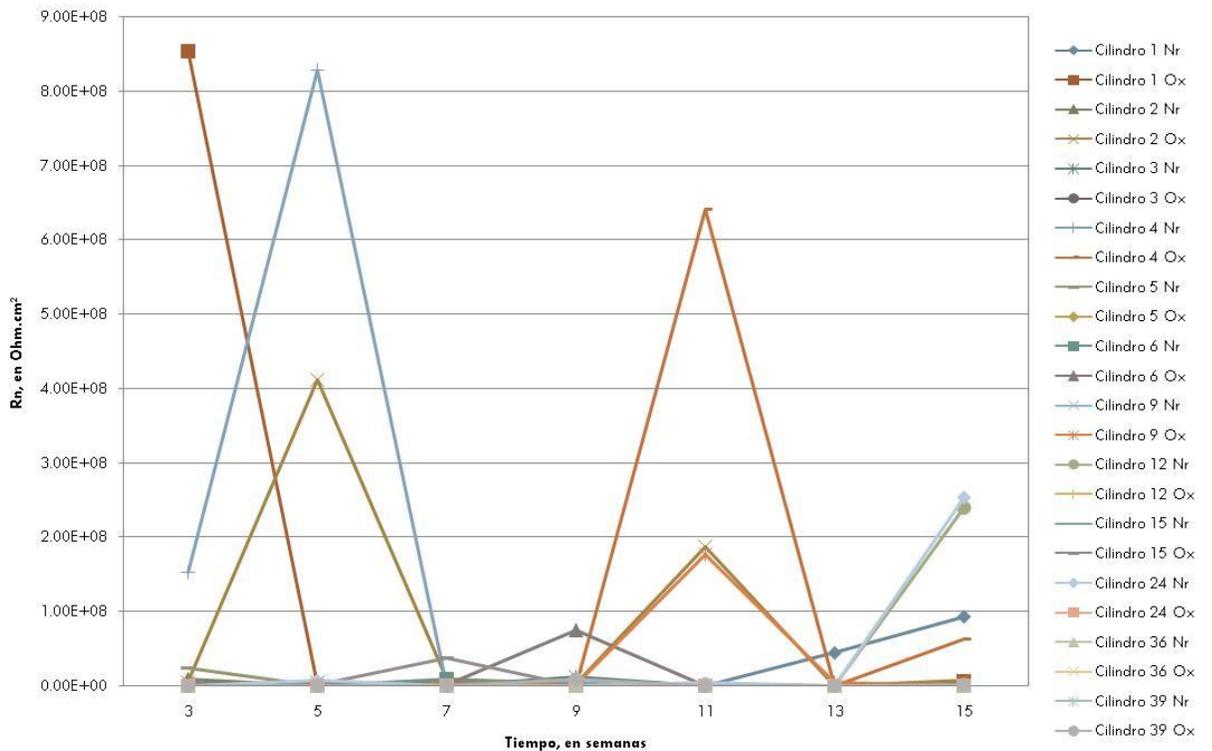
En la tabla 3.3 se presentan los resultados electroquímicos de los concretos aligerados con mezclas ternarias. De estos resultados se puede observar que los potenciales de corrosión en todos los casos están por debajo de los -550 mV, los valores de  $R_n$  son relativamente altos que dan como consecuencia una velocidad de corrosión del orden de  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  mm/año. Basándose en los criterios del DURAR, estos concretos estarían ubicados en corrosión.

Los resultados en general de la resistencia del ruido  $R_n$ , se observa este comportamiento en la gráfica 3.10 donde los valores promedios después de 17 semanas de medición presenta valores altos de  $R_n$  ( $10^8$  ohms-cm<sup>2</sup>) y nuevamente eso indica una velocidad de corrosión moderada.

El cálculo de la  $R_n$  se obtuvo del cociente de la desviación estándar de los valores de potencial entre los resultados de la corriente. Algunos de los concretos aligerados con acero preoxidado presentaron  $R_n$ 's mucho menores y se presentaron algunos valores elevados de la resistencia del ruido en las emanaciones 5 y 11.

**Tabla 3.3** Resultados de ruido electroquímico

Formulaciones		Potencial De Corrosión (mV)	$\sigma V$ (mV)	$\sigma I$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Rn (Ohms.cm <sup>2</sup> )	Icorr (mA/cm <sup>2</sup> )	Velocidad de corrosión (mm/year)
2	N	-577.36	1.0374	4.201E-07	2469800	1.0562E-05	0.0001224
	O	-560.74	1.4873	1.609E-05	92463	0.0002821	0.0032699
5	N	-595.86	19.069	2.534E-05	8134.4	0.003207	0.0371687
	O	-603.03	0.57745	8.656E-05	6671.1	0.0039104	0.0453217
12	N	-706.48	0.18813	5.648E-06	33308	0.0007832	0.0090771
	O	-709.81	0.02629	8.435E-07	31174	0.0008368	0.0096986
24	N	-686.52	0.03409	8.938E-07	38147	0.0006839	0.0079259
	O	-705.61	0.06536	5.506E-07	118700	0.0002198	0.002547
39	N	-673.9	0.49645	1.6546E-05	3087.7	0.0084485	0.0979184
	O	-676.62	0.03046	9.264E-08	328820	7.933E-05	0.0009195



**Gráfica 3.20** Resistencia de ruido electroquímico  $R_n$ .

### 4.3.3.3. Análisis de la morfología de corrosión por el método estadístico.

Para deducir la morfología de corrosión que presentaban los metales después de estar expuestos en medios agresivos, se realiza por el método estadístico (Kelly y Hudson, 1996).

El valor estadístico empleado, se realiza mediante un análisis del ruido en electroquímico en corriente, y es la razón de la desviación estándar con la raíz media cuadrática, llamado “índice de localización o de picado” (I.L)

El resultado indica el tipo de corrosión presente en el sistema en estudio como corrosión localizada, generalizada, mixta o inicio de picaduras, estas morfologías se indican en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Tipo de corrosión en función del índice de localización

Índice de Localización (I.L)	Tipo de Corrosión
0.001 – 0.01	Generalizada
0.01 – 0.1	Mixta
0.1 – 1.0	Localizada
> 1.0	Iniciación de picado

Los resultados del índice de localización para las diferentes formulaciones de concretos aligerados con mezclas ternarias y con diferente condición en el acero, presentan tipos de corrosión generalizada y mixta.

**Tabla 3.5** Resultados del Índice de Localización para las formulaciones de concretos aligerados con mezclas ternarias.

Formulaciones		I.L	Tipo de Corrosión
2	N	0.003451	Generalizada
	O	0.02589	Mixta
5	N	0.01856	Mixta
	O	0.02157	Mixta
12	N	0.01932	Mixta
	O	0.00154	Generalizada
24	N	0.00265	Generalizada
	O	0.001487	Generalizada
39	N	0.0415	Mixta
	O	0.000214	Generalizada

---

# Capítulo IV.

## Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

A continuación se enlistan las conclusiones de las mediciones de resistencia mecánica, potencial de corrosión y ruido electroquímico para los concretos aligerados con mezclas ternarias y con acero limpio y preoxidado.

#### **Resistencia Mecánica**

- Los concretos aligerados con mezclas ternarias formulaciones F1-F6 obtuvieron ganancias de resistencia a la compresión de hasta un 15%, con respecto al diseño la mezcla control.
- El uso de aditivos minerales con área superficial alta y poco reactivas, no contribuyen al desarrollo de resistencias mecánicas tempranas del concreto, pero si podrán ganar resistencias a futuro.
- No se observa un efecto benéfico en las propiedades mecánicas de las adiciones de piedra pómez y polipropileno cuando se mezclan con materiales cementantes como escoria de alto horno o ceniza volante.

---

### **Potenciales de Corrosión**

- Los concretos con adiciones de piedra pómez (F1-F3) y Polipropileno (F3-F6) presentaron en la etapa de curado y medio salino los potenciales desde -120 hasta -600 mV, pasando desde 10 % de probabilidad de corrosión hasta 90 % de corrosión de acuerdo como se indica en la norma ASTM C876.
- Se encontró con la medición de potenciales de corrosión que no existe una diferente entre las muestras de las formulaciones con piedra pómez y polipropileno ya que todas muestran tendencia a la activación
- Los potencial de corrosión para los especímenes de concreto aligerados de las formulaciones F7-F15 (piedra caliza, piedra pómez y escoria de alto horno) y F16-F24 (piedra caliza, polipropileno y escoria de alto horno) en diferentes relaciones, muestran valores del potenciales muy activos comenzando desde valores de -280 mV desde la etapa de curado y terminando en el medio salino con -650 mV. Esto indican Incertidumbre y 90 % de probabilidad de corrosión de acuerdo como se establece en la norma ASTM C876.
- Para las formulaciones F34-F42 (piedra caliza, piedra pómez, polipropileno y ceniza volante) con acero limpio y preoxidado; tanto en la etapa de curado como inmersión en el medio salino. Tienen un mejor comportamiento dado que los potenciales estuvieron desde un inicio 10% incertidumbre y manteniendo en incertidumbre la mayoría de las formulaciones en la etapa de curado y posteriormente pasaron a potenciales muy activos de -650 mV, presentando un 90% de probabilidad de corrosión de acuerdo con la norma ASTM C876.

---

## Ruido Electroquímico

- En las series de tiempo de las formulaciones F2 (piedra caliza y piedra pómez) con acero limpio y preoxidado se observa fluctuaciones de la señal de corriente de poca amplitud y baja frecuencia, así como la presencia de picos anódicos en el tiempo.
- La formulación F5 (piedra caliza y polipropileno) se pudo ver que las fluctuaciones del ruido en potencial en los dos casos (acero limpio y preoxidado) tienen tendencia a la activación teniendo caídas abruptas y recuperaciones espontáneas. Lo cual indica corrosión localizada. Y la señal de ruido en corriente tiene picos anódicos en el tiempo y están bien asociados a las señales del potencial en 1024,3078,5120 y 7168 puntos por segundo.
- Las formulaciones F12 (piedra caliza, escoria y piedra pómez), F24 (piedra caliza, escoria de alto horno y polipropileno) y F39 (piedra caliza, escoria de alto horno, ceniza y piedra pómez), presentan en ruido en potencial tendencia a la activación teniendo caídas repentinas del potencial y en corriente picos anódicos definidos y asociados al potencial. La señal en corriente es de baja amplitud y baja frecuencia.
- En todas las formulaciones no se observa un efecto importante sobre la condición del acero de refuerzo ya sea limpio o preoxidado, si existen algunas caídas del potencial pero fue de este comportamiento todas las formulaciones están en estado de corrosión y no presentan una corrosión generalizada.

- 
- La resistencia de ruido electroquímico  $R_n$ , tiene un comportamiento en general uniforme para todas las formulaciones, si ha cambios en el tiempo pero sus valores son relativamente altos.
  - Se presento un índice de localización para corrosión mixta y generalizada en la mayoría de las formulaciones seleccionadas no importando la condición del acero (limpia o preoxidada).

#### **4.2 Recomendaciones**

- Es importante considerar análisis petrográfico de las diferentes formulaciones propuestas dado que la interacción de los materiales aligerantes como cementantes deberán de verse el efecto microscópico, en cuanto a la adherencia de los materiales.
- Sería conveniente trabajar con menos formulaciones para no perder información importante que establezca mejor los *mecanismos* de corrosión.
- Realizar análisis morfológico por Microscopía electrónica de barrido a los materiales en estudio, para enriquecer estudios de corrosión como el planteado en esta investigación.

---

---

# Capítulo V

## Referencias

- ACI Sección Centro y Sur de México *Guía para la durabilidad del concreto. Suplemento Mexicano del Informe del Comité ACI 201. Guía del Consumidor de Concreto Profesional (1996).*
- Alonso Gómez Javier; *Bombeo del hormigón ligero estructural*, Cemento y Hormigón, Vol. 50, 710 – 727, (1979).
- Al-Rousan T., Mafad, E., Tutumluer, E. & Pan, T., *Evaluation of image analysis technique for quantifying aggregate shape characteristics*, Journal of Construction and Building Materials, Vol 21, 2007, pp. 978-990.
- Andrade C., *Corrosión localizada del acero en contacto con hormigón*, Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. XV Num. 4, 1984.
- Andrade C., S. Feliu “Manual Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras” Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. Madrid España (1998)
- Arango Tobón Jesús; *Evolución de los sistemas prefabricados de losas de entrepiso*, Instituto colombiano de productores de cemento, 11 – 38, (1990).
- ASTM C 989-06 “Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars” American Society for Testing Materials, Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 14.01 West Conshohocken USA (2006).
- ACI 233R-03 “Slag Cement in Concrete and Mortar” American Concrete Institute.

- 
- ASTM C 595-06 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” American Society for Testing Materials Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.01 West Conshohocken USA (2006).
- ASTM C 618-99 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral admixture in Concrete” American Society for Testing Materials, Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 14.01 West Conshohocken USA (1999).
- ACI 116R “Cement and Concrete Terminology” American Concrete Institute (2000).
- ASTM C 470-98 “Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 West Conshohocken USA (1998)
- ASTM C 192-98 “Standard Practice for Making and Curing Concrete test Specimens in the Laboratory” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 West Conshohocken USA (1998)
- ASTM C 33-99 “Standard Specification for Concrete Aggregates” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 West Conshohocken USA (1999)
- ASTM C 39-99 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 West Conshohocken USA (1999) .
- ASTM C150-99 “Standard Specification for Portland Cement” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 14.01 West Conshohocken USA (1999)
- ASTM C-876-91 “ Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA (1991)

- 
- 
- ASTM G 199-09. *Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA (1991)*
- ASTM G 59-97 “Standard Test for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA (1997)
- Biczok I., *Corrosión y protección del hormigón*, Urmo S. A. de Ediciones, España, (1981)
- Calleja José; *Consideraciones a tener en cuenta en la adición de escorias de alto horno a los hormigones*, Cemento y hormigón, Vol. 66, no. 741, 66 – 100, (1995).
- Chale W., M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, C. Jaturapitakkul “Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Enviroment” *Construction and Building Materials* 21 No. 5 (2007) p.p. 965-971.
- Castells X., E., *Reciclaje de residuos Industriales*, Editorial Díaz a Santos, Madrid España, 2000.
- Castro Borges P., Castillo Salazar R., Carpio Pérez, J. J., Genescá Llongueras, J., Helene Paulo., López González, Waltter., Pazini Figueiredo E. J., Sanjuán Barbudo M. A., Véleva Muleshkova L., *Corrosión en estructuras de concreto armado*, IMCYC (2001).
- Comisión Federal de Electricidad *Manual de Tecnología del Concreto*, LIMUSA, México, (1997).
- Cottis P.A. , S. Turgoose “Electrochemical Impedance and Noise” *Corrosion Testing Made Easy. Series NACE*, Houston TX, USA (1999)
- Del Valle Moreno A., Pérez López T., Maerínez Madrid M., *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*, SCT-IMT Publicación Técnica, (2001).
- Díaz Gómez Raúl; Prefabricación, *Instituto mexicano del cemento y del concreto*, Vol. 1, no. 6, 35 – 47, (1973).

- 
- 
- Fernández-Jiménez, A. Palomo, C. López-Hombrados “Precast Elements Made of Alkali-Activated Fly Ash. Concrete” *ACI Mater. Journal* 103 No. 2 (2006) p.p. 106-112
- Feliu S. and J. A. González, M. C. Andrade, V. Feliu “Determining Polarization Resistance in Reinforced Concrete Slabs” *Corrosion Science* 29 No. 1 (1989) p.p. 105-113
- Fontana M. G., *Corrosion Engineering*, Mc Graw Hill International Editions, 1987
- Frondestou-Yannas, Stamatia, *Waste Concrete as Aggregate for New Concrete*, *Journal of American Concrete Institute*, Detroit, Vol. 74 Num. 8 (1977), pp. 373-376.
- González V. Jorge; *Algunas nociones sobre concreto liviano*, IMME, boletín técnico, Vol.1, no. 4 (1963).
- González J.A., J.M. Miranda, N. Birbilis, S. Feliu “ Electrochemical Techniques for Studing Corrosion of reinforcing Steel: Limitations and Advantages” *Corrosion NACE International* 61 No. 8 (2005) p.p. 739-742.
- Halit YazVcV, Serdar AydVn, Hqseyin Yigˇiter, Bqlent Baradan *Effect of steam curing on class C highvolume fly ash concrete mixtures*, Received 11 May 2004; accepted 19 August 2004 *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1122–1127
- Hernández-Moreno S. *Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Portland*, *Ciencia Ergo Sum*, UAEM Vol. 15 Num. 003 (2009) pp. 306-310.
- Higginson E.C. “Manual de Control del Concreto” Universidad Nacional Autónoma de México No. 68 (1962).
- Kihç A. , C. Duran Atis, E. Yaşar, F. Özcan “High-Strength Lightweight Concrete made With Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures” *Cement and Concrete Research* 33 No. 10 (2003) p.p. 1595-1599.
- Kelly R. M.E. Inman, J.L. Hudson. *Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications*, ASTM STP-1277. ASTM Philadelphia (1996) p.p. 101-113.

- 
- KErdem T. Ö. Kirka “ Use of Binary and ternary Blends in High Strenght Concrete”  
Construction and Building Materials 22 No. 7 (2008) p.p. 1477-1483
- Koch G. H., Bronger P. H., Thompso N. G., Virmani Y. P., Payer J. H., *Corrision costs and preventive strategies in the United States*, Suplement to Material Performance, July 2002.
- Kosmatka S. H., Kerkhoff, B., Panarese W. Tanesi J., *Diseño y control de mezclas*, Portland Cement Association PCA, (2004).
- León N. Belisario, Santaella C. María Cristina; *Características de concretos de baja densidad hechos con agentes espumantes*, Pontificia universidad javeriana, 165, (1986).
- Loh, J., Randers, J., et al., *Living planet report, 1998*. Gland: WWF International.
- Lo T.L, W.C. Tang, A. Nadeem “Comparison of Carbonation of Lightweight Concrete With Normal Weight Concrete at Similar Strength Levels”  
Construction and Building Materials 22 No. 8 (2008) p.p. 1648-1655.
- Longo Adolfo, Torrent Pascual Robert; *Methods of addition of blast furnace slag : their effect on the compressive strength of mortars and concretes*, American Concrete Institute, 1381 – 1400, (1986).
- Lydon Frank D.; *Algunos criterios de la selección y el uso de concreto ligero*, Revista del Instituto mexicano del cemento y del concreto, Vol.14, no.81, 23 – 38, (1976).
- Maldonado B. E.D. Tesis Doctorado CIMAV 2008.
- Malhotra V., *Making concrete greener with fly ash*, Concrete International (1999) 21(5): 61-66
- Marulanda A. Johannio, Matajira Manuel; *Agregados minerales livianos para concreto estructural ligero*, Sociedad colombiana de ingenieros, 5 – 17, (1979).
- Mena Ferrer Manuel; *Concreto estructural ligero*, Revista del Instituto mexicano del cemento y del concreto, Vol.20, no.132, 65 – 70, (1982).
- Metha P., *Concrete technology for sustainable development*, Concrete International (1999) 21(11): 47-53.
- Negri Beniamino; *Hormigon ligero estructural*, Técnicas de los prefabricados de hormigón, no. 8, 571 – 579, (1974).

- 
- Neville A. M., Brooks J. J., *Tecnología del concreto*, Ed. Trillas, (1998).
- Nilson A. H., *Diseño de estructuras de concreto*, Mc. Graw Hill, Colombia, (1999).
- Núñez-Jaquez R.E., Tiburcio-Gaona C., Uruchurtu-Chavarin J., Barrios-Durstewitz C.P., Almeraya-Calderón F., Martínez Villafaña A., *Corrosion Evaluation of Modified Reinforcement Concrete by Electrochemical Noise Techiques, Portugalie Electrochimica, Acta 23* (2005).
- Núñez Jaquez R.E. Tesis de Doctorado. CIMAV 2005.
- Oikonomou, N., *Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites* (2005), 27(2): 315-318.
- Pèrez N., *Electrochemistry and corrosion science*, Boston Kluwer Academic Publisher, 2004.
- ueda Rojas Hernando; *Coque como agregado grueso en concretos estructurales aligerados*, Asociación de colombiana de productores de concreto, Vol.2, 11 – 20, (1988).
- Rendón = “Producción del Cemento Crece 3% 2007” CNN [en línea] disponible en: <http://www.cnnexpansion.com/negocios/2007/3/7/produccion-cemento-mexico-crece-3-2007/print> [Accesado el 19 de marzo 2008].
- Ramachandran V.C. “Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science, and Technology” Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Noyes Publications. Second Edition. Canada (1995)
- Rodríguez F.J. “Técnicas Electroquímicas de Corriente Directa para la Medición de la Velocidad de Corrosión: Resistencia a la Polarización” Fundamentos Técnicas Electroquímicas Edit J. Genescá UNAM (2002).
- Red DURAR “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado” CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Río de Janeiro (1997)
- Sanjuán Barbudo M. A., Castro Borges P., *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*, IMCYC (2001).
- Serrano Guzmán M. F., Pérez Ruíz D. D., *Concreto preparado con residuos industriales: resultado de alianza empresa universidad*, Revista Educación en Ingeniería N°. 11 2011 pp 1-11 ISSN 1900-8260.

- 
- 
- Serrano, M. F., *Elaboración de adoquines utilizando escombros como una proporción del agregado grueso*. Reporte de Investigación, Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga (2010 a).
- Serrano, M. F., Influencia de las propiedades mecánicas de los agregados en el modulo de elasticidad del concreto Reporte de Investigación, Dirección General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga (2010 b).
- Spiegel R., *Green Buildings Materials, A. Guide of Product Selection and Specification*, John Wiley and Sons, N.Y. USA (1991).
- Stern T, A.L. Geary “Electrochemical Polarization. I. A. Theoretical Analysis of the Shape of Polarización Curves” *Journal electrochemical Society* 104 No. 1 (1957) p.p. 287-332
- Villas, B. R. C., *Sustainable Development and the Advanced Materials*, Johnson Editorial, Brazil (1995)
- Thomas M.D., M.H. Shehata, S.G. Shashiprakash, D.S. Hopkins, K. Cail “ Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly ash in Concrete” *Cement and Concrete Research* 29 No. 8 (1999) p.p. 1207-1214.
- Tae-hyun Ha “Accelerated Short-Term Techniques to Evaluate the Corrosión Performance of Steel in Fly Ash Blended Concrete” *Building and Enviroment* 42 No. 1 (2007) 78-85
- (WCED), W. C. o. E. a. D (1987). *Our common future*. Members of the Comission West, John M., *Corrosión y oxidación*, Editorial Limusa, 1986
- Xinghua Fu, Zhi Wang, Wenhong Tao, Chunxia Yang, Wenping Hou, Youjun Dong, Xuequan Wu “Studies on Blended Cement Whit a Large Amount of Fly Ash” *Cement and Concrete Research* 32 No. 7(2002) p.p. 1153-1159.
- Uruchurtu Ch. J. Ph. D. Thesis UMIST. Manchester England, 1984.