

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO
AFECTADA POR LA ACCIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL REFUERZO**

WILLIAM ALBERTO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2009**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO
AFECTADA POR LA ACCIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL REFUERZO**

WILLIAM ALBERTO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

**Tesis de grado en la modalidad de investigación
para optar al título de ingeniero civil**

Director

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil, PhD.**

Codirector

**LUIS EDUARDO ZAPATA ORDÚZ
Ingeniero Civil, Ms.C.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero darle gracias a **Dios** porque siempre ha estado conmigo, y cada vez que tuve inconvenientes y se cerraba una puerta, el me habría otra, poniendo en mi camino personas que me colaboraron muy acomedidamente en la realización de este proyecto, que con perseverancia y sacrificio logré sacar adelante.

Gracias a **mi Familia** por su apoyo y paciencia, al ingeniero civil, profesor y amigo **Ricardo Alfredo Cruz Hernández** quien creyó en mi y me dió la grata oportunidad de trabajar con el en este proyecto de investigación, al ingeniero civil **Luis Eduardo Zapata Ordúz** quien me asesoró y apoyó en cada parte del proyecto aportando ideas con su experiencia en el tema de corrosión solucionando mis inquietudes, al ingeniero civil **Jorge Luis Vezga** quien me dió una mano amiga y me colaboró de manera incondicional con la realización de las vigas en su Planta de Concretos, poniendo a mi disposición un excelente equipo de trabajo entre ellos un gran técnico y compañero **Fabio Gonzáles** y a los técnicos **Ambrosio Carrillo, Jairo Hernández y Miguel Agudelo**, quienes con su experiencia me brindaron una gran colaboración con los ensayos pertinentes al proyecto.

Y por último gracias a la persona que estuvo apoyándome en todo momento, quien me ayudó a levantar y mover para muchos sitios de trabajo, cada una de las 20 vigas, quien con su joven experiencia como estudiante me aportó buenas ideas y un fuerte apoyo, mi amigo **Johan Guevara**.

De todo corazón le pido a Dios que bendiga a cada una de estas personas y a toda su familia, que los llene de salud y prosperidad, y les de la sabiduría necesaria para solucionar los inconvenientes que se les presenten en su camino, de nuevo muchas GRACIAS...

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1 DEFICIONES GENERALES	4
1.1.1 Concreto	4
1.1.2 Refuerzo	7
1.1.3 Concreto reforzado	8
1.2 CORROSIÓN DEL REFUERZO EN EL CONCRETO	9
1.2.1 Cloruros	12
1.3 DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO	14
1.4 PROTECCIÓN DEL REFUERZO	16
1.5 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO	22
1.6 RELACIÓN ENTRE CAPACIDAD DE CARGA Y CORROSIÓN	26
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
2.1 PARÁMETROS DE ESTUDIO	28
2.2 GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS	28
2.3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	31
2.4 RECUBRIMIENTO DEL REFUERZO	33

2.5	DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	35
2.6	MATERIAL CONTAMINANTE	39
2.7	MEDIDAS DEL POTENCIAL ELECTROQUÍMICO	44
2.8	ENSAYO DE FLEXIÓN	49
2.8.1	Evaluación de la resistencia a flexión	50
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
3.1	ANÁLISIS DEL MODO DE FALLA DE LAS VIGAS DE CONCRETO	57
3.2	ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA DEL ACERO	61
4.	CONCLUSIONES	63
5.	RECOMENDACIONES	64
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	ANEXOS	67

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Modelo de durabilidad (torres acosta y martínez madrid 2001). [3]	15
Gráfica 2. Carga-deflexión de un elemento, con un porcentaje usual de acero de tensión.	23
Gráfica 3. Gráficas carga - deflexión de elementos con porcentajes variables de acero (sección, $f'c$ y f_y constantes) sujetos a flexión simple. [3]	24
Gráfica 4. Valores promedios de potencial de corrosión para dos meses, tomados respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre.	47
Gráfica 5. Valores promedios de potencial de corrosión para cuatro meses, tomados respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre.	48
Gráfica 6. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en agua potable durante dos meses.	51
Gráfica 7. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante dos meses.	52
Gráfica 8. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en agua potable durante cuatro meses.	53
Gráfica 9. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante cuatro meses.	54

Gráfica 10. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante dos meses.	55
Gráfica 11. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante cuatro meses.	55
Gráfica 12. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante dos y cuatro meses.	56

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de elementos con distintos índices de refuerzo. [3]	24
Tabla 2. Cálculo de la resistencia de los elementos.	30
Tabla 3. Masas iniciales (m_i) de las varillas de refuerzo.	32
Tabla 4. Cemento tipo III.	36
Tabla 5. Arena pescadero.	36
Tabla 6. Triturado pescadero.	36
Tabla 7. Valores del potencial de corrosión del refuerzo de acero, tomados con el electrodo de de Cu/CuSO_4 , para las vigas sumergidas durante un periodo de dos meses.	45
Tabla 8. Valores del potencial de corrosión del refuerzo de acero, tomados con el electrodo de de Cu/CuSO_4 , para las vigas sumergidas durante un periodo de cuatro meses.	46
Tabla 9. Valores promedios vigas sumergidas en agua potable durante dos meses.	51
Tabla 10. Valores promedios vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante dos meses.	52

Tabla 11. Valores promedios vigas sumergidas en agua potable durante cuatro meses. **53**

Tabla 12. Valores promedios vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante cuatro meses. **54**

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción anódica en el acero.	11
Ecuación 2. Reacción catódica en el acero.	11
Ecuación 3. Momento resistente de elementos rectangulares con refuerzo de tensión únicamente, de acuerdo con el reglamento aci 318-83. [3]	25
Ecuación 4. Capacidad de carga por corrosión de un elemento estructural.	27

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Vigas de concreto vista frontal y superior.	29
Fotografía 2. Vigas de concreto vista lateral y superior.	29
Fotografía 3. Acero de refuerzo.	30
Fotografía 4. Marcaje de las varillas.	31
Fotografía 5. Formaleta.	32
Fotografía 6. Recubrimiento de protección.	33
Fotografía 7. Elementos utilizados para la aplicación.	34
Fotografía 8. Elementos de seguridad.	34
Fotografía 9. Varillas protegidas con el recubrimiento.	35
Fotografía 10. Formaleta engrasada.	37
Fotografía 11. Colocación de la mezcla.	37
Fotografía 12. Curado de vigas vista frontal.	38
Fotografía 13. Curado de vigas vista superior.	38
Fotografía 14. Tanques de almacenamiento.	39

Fotografía 15. Material contaminante.	40
Fotografía 16. Vigas sumergidas.	40
Fotografía 17. Vigas contaminadas inicio de exposición.	41
Fotografía 18. Vigas contaminadas dos meses de exposición.	41
Fotografía 19. Vigas contaminadas cuatro meses de exposición.	42
Fotografía 20. Vigas testigos inicio de exposición.	42
Fotografía 21. Vigas testigos dos meses de exposición.	43
Fotografía 22. Vigas testigos cuatro meses de exposición.	43
Fotografía 23. Lectura del potencial de corrosión del refuerzo de acero, empleando el electrodo de cu/cuso4 como referencia.	44
Fotografía 24. Viga reforzada montada en la máquina universal.	49
Fotografía 25. Viga reforzada lista para ensayar.	50
Fotografía 26. Tendencia de la falla vigas testigos.	57
Fotografía 27. Varilla de refuerzo viga testigo.	58
Fotografía 28. Tendencia de la falla vigas contaminadas.	58
Fotografía 29. Varilla de refuerzo viga contaminada.	59

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO AFECTADA POR LA ACCIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL REFUERZO*

AUTOR: WILLIAM ALBERTO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ **

PALABRA CLAVE: Despasivación, deterioro de la capa de óxido pasiva que protege el acero de refuerzo, originada como consecuencia del PH de la pasta de cemento y el oxígeno presente.

RESUMEN: En este trabajo se evalúa el comportamiento del concreto reforzado expuesto a agentes agresivos. El efecto de la corrosión se determina evaluando la resistencia a flexión de veinte vigas de concreto reforzado, fabricadas con cemento tipo III, relación agua/cemento 0.6 y con veintiocho días de curado, distribuidas de la siguiente manera; un primer grupo de cinco vigas fueron sumergidas en solución contaminada y otras cinco vigas fueron sumergidas en agua potable, tomando estas últimas como testigos, durante un período de dos meses. El segundo grupo de vigas fue de la misma cantidad y bajo condiciones similares, pero estuvieron sumergidas en un período de cuatro meses.

El material utilizado para proporcionar la despasivación de la varilla de acero e iniciar el proceso de corrosión fue el Cloruro de Sodio (NaCl) Analítico. Una vez finalizado el tiempo de exposición se midió el potencial electroquímico de cada grupo de vigas y posteriormente fueron ensayadas a flexión para su respectivo análisis.

El resultado general indica una clara incidencia en la disminución de la resistencia a flexión de las vigas analizadas, producida esta por el efecto del ion cloruro sobre el acero de refuerzo, reflejada en la forma de falla de los elementos, la pérdida de masa de las varillas y posteriormente en la disminución de la adherencia entre el acero y el concreto, lo que ocasionó pérdida en el aporte del refuerzo a tensión.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ing. Civil PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector Ing. Civil Ms.C. Luis Eduardo Zapata Ordúz.

TITLE: EVALUATION OF THE FLEXION RESISTANCE OF CONCRETE BEAMS AFFECTED BY THE ACTION OF THE CORROSION IN THE REINFORCEMENT *

AUTHOR: WILLIAM ALBERTO RODRÍGUEZ SÁNCHEZ **

KEYWORD: Depassivation, deterioration of the layer of oxide passive that protects the reinforcement steel, originated as consequence of the PH of the cement paste and the present oxygen.

ABSTRACT: In this work the concrete reinforced behavior exposed to aggressive agents is evaluated. Twenty concrete beams reinforced made of cement type III, relation water/cement 0.6 and with twenty-eight days of cured, were used for this study of this way; in the first group, five beams were submerged in polluted solution and five beams were submerged in drinkable water during two months, and in the second group, five beams were submerged in polluted solution and five beams were submerged in drinkable water during four months. The beams submerged in drinkable water were taken as witness.

The material used to provide this depassivation was the Analytic Chloride of Sodium (NaCl). Once these period of time finished the electrochemical potential were measured and each group of beams were rehearsed to flexion for their respective analysis. The corrosion effect was determinate by evaluating and comparing the flexion resistance of each group.

The general result indicates a clear incidence in the decrease of the flexion resistance of the analyzed beams, produced this by the effect of the ion chloride on the reinforcement steel, reflected in the way of flaw of the elements, the loss of mass of the bars and later on in the decrease of the adherence between the steel and the concrete, what caused loss in the contribution of the reinforcement to tension.

* Undergraduate thesis

** Physic - Mechanic Sciences Faculty. Civil Engineering School. Director Civil Engineer PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Codirector Civil Engineer Msc. Luis Eduardo Zapata Ordúz.

INTRODUCCION

Las estructuras de concreto reforzado son cada vez más utilizadas en los proyectos de ingeniería civil. Edificios, puentes, plantas de tratamiento, muros de contención, presas, son algunos de estos ejemplos. Las dimensiones de los elementos que conforman dichas estructuras, son objeto de diseño de la ingeniería civil, de acuerdo a las sollicitaciones que actúan sobre cada una de ellas, incluyendo su peso propio, y las propiedades mecánicas de los materiales. Centrándose esta en la búsqueda y desarrollo de soluciones óptimas para mejorar la calidad de vida de la población, a través de obras más funcionales, seguras y eficientes.

El acero de refuerzo ofrece varias ventajas, como por ejemplo, alta resistencia a la tensión y a la compresión, mayor ductilidad y dureza, pero tiene como desventajas que es un material más costoso, a altas temperaturas su resistencia disminuye debido a su alta conductividad térmica, y posee baja resistencia a la corrosión, siendo esta última el factor en estudio de este proyecto.

El hormigón presenta una acción protectora sobre el acero, caracterizado por su capacidad de actuar como aislante con el medio exterior, y por la formación sobre el acero de una película de óxido pasivante como consecuencia del pH de la pasta de cemento y el oxígeno presente. Sin embargo, cuando por cualquier circunstancia la situación se altera y la pasividad desaparece, las armaduras se corroen mediante un mecanismo electroquímico con una velocidad que es función de las causas que han originado el fenómeno. [2]

El concreto reforzado constituye un material estructural cuya misión es resistir y durar, cumplir mecánicamente con los esfuerzos para los cuales ha sido diseñado y permanecer inalterado en el tiempo en las condiciones de servicio. [2]

Es por ese motivo que surge la presente investigación, en donde se pretende estudiar el efecto que produce el fenómeno de oxidación del refuerzo, evaluando su resistencia a flexión y analizando su correspondiente modo de falla.

Los objetivos general y específicos planteados para llevar a cabo la investigación son:

- **GENERAL**

- ❖ Evaluar el modo de falla y los cambios en la resistencia a flexión en el tiempo de un elemento viga de concreto reforzado, sometido a un proceso de deterioro controlado por acción de la corrosión.

- **ESPECIFICOS**

- ❖ Determinar la resistencia experimental a flexión de vigas afectadas por corrosión en el acero.
- ❖ Determinar por observación la tendencia de la forma de falla de las vigas afectadas por corrosión.
- ❖ Obtener información sobre el comportamiento estructural del concreto expuesto en ambientes agresivos en donde se compromete su vida útil.

Este trabajo consta de seis capítulos. Primero se presenta el estado del arte, las definiciones generales de los tres materiales que tanto han aportado a nivel estructural, los cuales son el concreto, refuerzo y concreto reforzado, seguidamente el problema de la corrosión y la durabilidad del hormigón armado, continua con la protección del refuerzo y el comportamiento a flexión de vigas de concreto y finaliza tratando acerca de la relación entre capacidad de carga y corrosión. El segundo capítulo muestra la metodología experimental utilizada en esta investigación, finalizando con el ensayo de flexión. En la tercera parte se exponen los resultados y su respectivo análisis. Por último en las secciones cuarta, quinta y sexta se dan a conocer las conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas respectivamente.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 DEFICIONES GENERALES

1.1.1 Concreto

Mezcla de áridos (agregado fino y grueso), una pasta cementante (cemento + agua), y ocasionalmente aditivos químicos que modifican sus propiedades. El cemento y el agua reaccionan químicamente produciendo la pasta que se encarga de unir las partículas de los agregados, conformando así un material de características especiales muy utilizado en la construcción desde hace varios años.

- **Cemento**

El cemento Portland es una mezcla cerámica artificial que se fabrica a partir de arcilla y piedra caliza. La primera aporta sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en tanto que la segunda proporciona la cal (CaO), los intervalos de composición normal son: 19-25% SiO_2 , 5-9% Al_2O_3 , 60-64% CaO y 2-4% FeO .

Los cementos Portland se elaboran con la incorporación de una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos. La materia prima se dosifica con todo cuidado para obtener las cantidades deseadas de cal, sílice, óxido de aluminio y óxido de hierro. Después de triturada, para facilitar la calcinación, la materia prima se pasa a un largo horno rotatorio, que se mantiene a una temperatura de alrededor 2700 F°. La materia prima, durante su calcinación, sufre reacciones químicas y forma nódulos duros, del tamaño de una nuez, de un nuevo material llamado clinker. El clinker, después de descargarlo del horno y enfriarlo, se tritura para formar un

polvo fino. Durante este proceso de trituración, se agrega un retardante (por lo general un pequeño porcentaje de yeso) para controlar la velocidad de fraguado en el momento en que se hidrate el cemento. El polvo fino resultante es el cemento Portland. Como el cemento es una mezcla de muchos compuestos, resulta difícil su representación con una fórmula química. No obstante, hay cuatro compuestos que constituyen más del 90% del peso de cemento, los cuales son: silicato dicálcico (2CaOSiO_2), silicato tricálcico (3CaOSiO_2), aluminato tricálcico ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$) y ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$). [5]

- **Características de los componentes del cemento**

- ❖ **Silicato Dicálcico (C_2S)**

Se encuentra en tres formas diferentes designadas alfa, beta y gamma. Dado que la fase alfa es inestable a la temperatura ambiente y la fase gamma no muestra endurecimiento al hidratarla, sólo la fase beta es importante en el cemento Portland.

El C_2S beta, es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento Portland. Este mismo compuesto desarrolla resistencias menores que el C_3S en las primeras edades, del cemento. Luego aumenta gradualmente, alcanzando a unos tres meses una resistencia similar a la del C_3S . [5]

- ❖ **Silicato Tricálcico (C_3S)**

Produce la alta resistencia inicial del cemento Portland hidratado. La reacción del C_3S con agua desprende una gran cantidad de calor (calor de hidratación): La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento está en la relación directa con el calor de hidratación; cuanto más rápido sea el fraguado, tanto mayor será la exotermia. El C_3S hidratado alcanza gran parte de su resistencia en siete días. [5]

❖ **Aluminato Tricálcico (C₃A)**

Es el causante primario del fraguado inicial del cemento Portland y desprende grandes cantidades de calor durante la hidratación. El yeso agregado al cemento Portland durante la molienda o trituración en el proceso de fabricación, se combina con el C₃A para controlar el tiempo de fraguado. Un aumento en la cantidad de C₃A en el cemento Portland ocasiona un fraguado más rápido y, también disminuye la resistencia del producto final al ataque de los sulfatos. [5]

❖ **Ferró aluminato Tetracálcico (C₄AF)**

No muestra un fraguado instantáneo. Se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia. [5]

• **Ventajas del concreto como material de construcción**

- ❖ Fácil de preparar.
- ❖ Facilidad de manejo en estado blando (estado plástico).
- ❖ Alta resistencia al fuego y al clima.
- ❖ A excepción del cemento los materiales son de fácil consecución y bajo costo.
- ❖ Alta resistencia a la compresión.
- ❖ Baja conductividad térmica.

• **Desventajas conocidas**

- ❖ Material frágil: baja resistencia cuando se somete a tensión.
- ❖ Debido a los cambios bruscos de temperatura y a la reacción por fraguado, se pueden formar grietas o inducir esfuerzos en estructuras masivas.

• **Comportamiento estructural**

El concreto es un material frágil que presenta una curva esfuerzo-deformación a la compresión de tipo parabólico. Tiene una porción inicial relativamente elástica y lineal en la cual el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales. Luego se inclina tomando una forma parabólica hasta alcanzar su esfuerzo

máximo o resistencia a la compresión para deformaciones unitarias que varían entre 0.002 y 0.0035. Las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Ley 400 de 1977, Decreto 33 de 1998 (NSR 98), recomienda tomar como deformación máxima en el concreto $\epsilon_u = 0.003$. Para los concretos de densidad normal, la resistencia especificada f'_c varía entre 21 y 35 Mpa (210 y 350 Kg/cm²) o (3000 y 5000 psi.). Sin embargo con el avance de la ciencia y las investigaciones sobre los componentes del cemento y aditivos químicos, en la actualidad se están logrando concretos de alta resistencia llegando a obtener resistencias mayores de 210 Mpa (2100 Kg/cm²) o (30000 psi).

1.1.2 Refuerzo

Por lo general lo constituye el acero. Usualmente son barras de sección recta circular, con su superficie exterior rugosa o corrugada para darle una mejor adherencia cuando se une al concreto, o mallas de acero conformada por barras electrosoldadas, las cuales se fabrican de acuerdo con Normas Icontec. El refuerzo se coloca en las formaletas antes de vaciar el concreto.

- **Ventajas del acero reforzado**

- ❖ Alta resistencia a la tensión y a la compresión.
- ❖ Mayor ductilidad y dureza.
- ❖ La resistencia a tensión y a compresión en estado de fluencia en los aceros comunes es aproximadamente 15 veces la resistencia a compresión del concreto y más de 100 veces su resistencia a la tensión.

- **Desventajas**

- ❖ Es más costoso que el concreto.
- ❖ Posee baja resistencia a la corrosión.
- ❖ A altas temperaturas su resistencia disminuye debido a su alta conductividad térmica.

- **Comportamiento estructural**

La curva esfuerzo-deformación presenta inicialmente una zona elástica con una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, esta proporcionalidad se presenta hasta alcanzar la fluencia. La fluencia del acero le permite deformarse gradualmente a medida que se aplica carga manteniendo el esfuerzo constante. Al esfuerzo que se alcanza en la fluencia se le denomina Esfuerzo de fluencia y es el que se considera como resistencia del acero.

1.1.3 Concreto reforzado

Sabiendo que el concreto no soporta esfuerzos de tensión debido a que es un material frágil, se colocan barras de acero como refuerzo, tan cerca como sea posible de la fibra sometida a tensión, conservando una protección adecuada del acero contra el fuego y la corrosión. Usualmente el concreto es capaz de soportar los esfuerzos de lado de la compresión. Esta acción conjunta de los dos materiales se garantiza si se impide su deslizamiento relativo. Esto se logra mediante el corrugado superficial de las barras de acero y mediante anclajes especiales en los extremos de las barras.

Cuando el esfuerzo a tensión en el concreto excede el módulo de rotura, se forman grietas en el concreto. Si el esfuerzo a compresión en el concreto se encuentra menor o cercano a $0.45 f'c$, y el acero a tensión no ha alcanzado la fluencia, ambos materiales se comportan en forma elástica. A medida en que se aumenta la carga, la viga soporta deformación adicional, propiciando el desarrollo de las grietas por flexión. Incrementos continuos en el nivel de la carga conducen a la falla del elemento estructural cuando la carga externa alcanza la capacidad del elemento.

1.2 CORROSIÓN DEL REFUERZO EN EL CONCRETO

La corrosión de la armadura en el hormigón consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales: un ánodo, donde ocurre la oxidación; un cátodo, donde ocurre la reducción; un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones y un electrolito, en este caso el hormigón, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso. [4]

Durante el proceso de corrosión en estructuras de concreto, la zona anódica y la zona catódica están localizadas en la superficie del acero de refuerzo, mientras que el concreto actúa como el electrolito, completándose así los elementos que se requieren para formar la celda electroquímica. En algunos textos, la celda electroquímica también es llamada "pila de corrosión", "celda electrolítica" o "celda galvánica". [9]

La corrosión electroquímica del acero en el hormigón resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (hormigón) que rodea el acero. Ahora bien, aunque la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la falta de uniformidad del acero en el hormigón, la corrosión normalmente se previene por la formación de una película de óxido de hierro pasivante (protector) de forma duradera. [4]

La cooperación del concreto para con el acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) se basa en que el concreto provee al refuerzo una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido (del orden de un par de nanómetros) en la superficie del acero, impidiendo que el acero continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasividad (Fontana, 1986), ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto es debida, principalmente, al hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se forma durante la hidratación de los silicatos (Silicato dicálcico C_2S , silicato tricálcico C_3S , aluminato tricálcico C_3A , ferroaluminato tetracálcico C_4AF) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio) que pueden estar incorporados como sulfatos en el clinker (Mangat y Elgarf 1999). Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14 (Andrade et al, 1990), es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. [3]

La cantidad relativa de cada uno de esos iones depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, del grado de hidratación y de la relación agua/cemento (a/c). A esta elevada alcalinidad y con el contenido de O_2 normal del ambiente en las estructuras aéreas, el acero se recubre de una capa pasiva de óxidos muy adherentes, compacta e invisible, que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el hormigón sea de buena calidad y no cambie sus características físico-químicas por acción del medio exterior. Por otra parte, en ausencia de oxígeno, el refuerzo de acero se oxidaría muy lentamente sin causar problemas de corrosión del mismo, como es el caso de las estructuras sumergidas, donde el hormigón no se encuentra agrietado. [4]

El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasivar al acero e iniciar su corrosión. [3]

Cuando las condiciones de servicio cambian y el hormigón se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de la película protectora de óxido de hierro y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia:

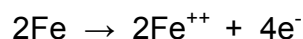
- ❖ El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido.
- ❖ El hormigón puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- ❖ La adherencia armadura-hormigón disminuye o desaparece.

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:

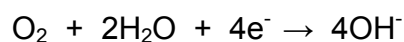
- ❖ Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido.
- ❖ Por acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno.

Así el acero se corroe por la reacción anódica que permite que él se disuelva como ion ferroso. Debe haber una reacción catódica simultánea, como la reducción de oxígeno, todo esto en presencia de agua.

Ecuación 1. Reacción anódica en el acero.



Ecuación 2. Reacción catódica en el acero.



Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el hormigón de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero, cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, lo detienen completamente.

La corrosión se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (<8), por lo que serán pues factores que afectan o desencadenan todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del hormigón o bien, como es el caso de las fisuras y coqueras, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el hormigón.

Así, los problemas de corrosión del acero estructural están íntimamente asociados a la despasivación del mismo, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico sobre las distintas interfaces hormigón/acero y de las diferencias metalúrgicas y mecánicas del metal. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes eléctricas llevando a la formación de áreas anódicas y catódicas que constituyen las celdas de corrosión. [4]

1.2.1 Cloruros

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

De acuerdo al modelo de vida útil, también es necesario que los iones cloruro avancen desde el exterior hasta llegar al nivel de la varilla. Una vez que llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de romper la estabilidad de la película pasiva y dar inicio al proceso de corrosión. Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros, lo que constituye la disolución poro. Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos. [9]

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

En el caso de una fuente externa de iones cloruro, el acceso es a través de los poros del concreto. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se adsorbe y otra fracción queda disuelta. El medio de exposición es determinante para el ingreso de los iones cloruro. En una estructura sumergida en agua de mar, el mecanismo lo determina la diferencia de concentración entre el exterior y el interior del concreto, es decir, se favorece un proceso difusivo. En obras que se hallan a la intemperie, durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando parcialmente llenos. Si la brisa marina deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion es por succión capilar, o sea cuando que la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua (punto de rocío) que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. [9]

1.3 DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

La durabilidad de una estructura de concreto esta directamente relacionada con su vida útil o tiempo antes de reparar y su vida residual. Se entiende pues como vida útil, el período en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento y por vida residual el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza su valor límite de deterioro en donde es necesario iniciar su reparación. [4]

Al momento se han propuesto varios modelos 'durabilísticos' que relacionan la degradación por corrosión del acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) en concreto, en función del tiempo. Éstos se discuten brevemente a continuación.

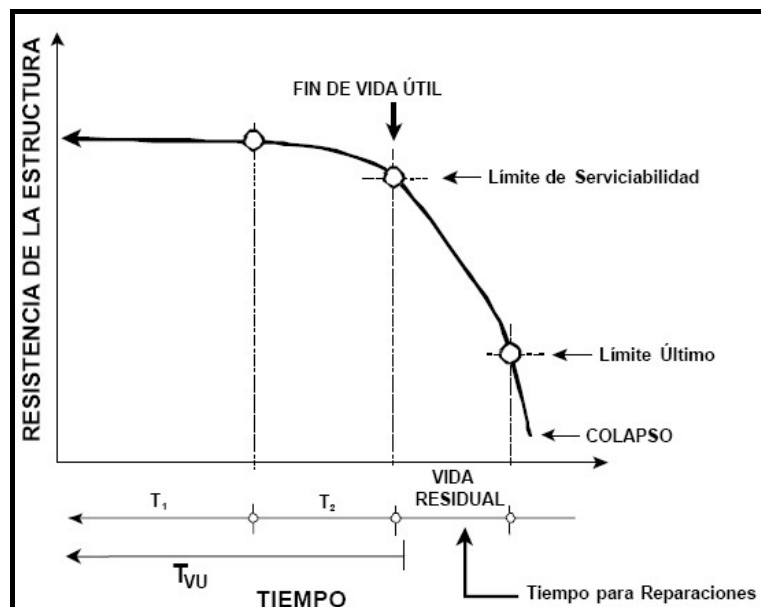
El modelo de Tuutti (Tuutti, 1982), en el cual se basan la mayoría de los ya existentes, diferencia dos etapas de degradación: T_1 y T_2 (donde T_1 es el periodo de vida útil a su máxima capacidad y T_2 marca el fin de la vida útil). Los modelos de Bazant (Bazant, 1979a y 1979b) Browne (1980) y Beeby (1983) son similares al propuesto por Tuutti (1982), ya que son modelos que dividen las dos etapas T_1 y T_2 . Los modelos de Bazant y Browne, especifican que T_2 finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura o elemento estructural. En cambio, el modelo de Beeby especifica que T_2 finaliza hasta que se ha alcanzado un nivel inaceptable de la corrosión. Esto quiere decir que el elemento puede estar más allá de su periodo de vida útil y encontrarse en la etapa de su vida residual. [3]

El modelo de durabilidad considerado por Tuutti, estima el tiempo de vida útil de la estructura como: $T_{VU} = T_1 + T_2$, en donde T_1 y T_2 son denominados periodos de iniciación y de propagación. Se define al T_1 como al lapso de tiempo que

tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación; en tanto T_2 se refiere al periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos, o desprendimientos de la cobertura del concreto).

La etapa T_2 finalizará a la formación de pequeñas grietas (con anchos menores de 0.1 mm) o manchas de óxido. Si en la estructura se observan otros tipos de gradaciones como grietas más anchas de 0.1 mm, delaminaciones, barras de refuerzo expuestas con corrosión visible, etc., dicha estructura se encontrará más allá de su vida útil, o sea, en el periodo de su vida residual. El periodo de la vida residual finaliza hasta un límite inaceptable de durabilidad, el cual se podría expresar en función de la capacidad de carga del elemento estructural. [3]

La siguiente figura presenta, de una manera gráfica, las etapas T_1 y T_2 , así como el periodo de la vida residual.



Gráfica 1. Modelo de durabilidad (Torres Acosta y Martínez Madrid 2001). [3]

1.4 PROTECCIÓN DEL REFUERZO

Los métodos de protección y control de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). Uno de los métodos consiste en controlar la calidad de los constituyentes de la mezcla (controlando las propiedades físico-químicas). También se puede minimizar la corrosión con recubrimientos en el acero, revestimiento del hormigón, con protección catódica, agregando inhibidores, removiendo los iones cloruros y realcalinizando el hormigón. Estos dos últimos métodos se encuentran en período de investigación.

En estructuras nuevas, el uso de un buen hormigón sería la mejor solución ya que no existe mejor protección del refuerzo de acero que la película pasivante formada por la hidratación del cemento. En estructuras existentes, el control de corrosión dependerá del diagnóstico de la patología determinada. Sin embargo es importante indicar que aun con todas las investigaciones realizadas sobre el particular todavía existe incertidumbre al respecto. [4]

- **Protección directa del acero**

- **❖ Recubrimientos**

Se ha investigado mucho sobre el uso de armaduras recubiertas, siendo el uso de “epoxis” (recubrimientos epóxicos) y galvanizados los más usados en experiencia de campo. El recubrimiento epóxico protege por barrera, de allí que cualquier poro/daño en el revestimiento es perjudicial para la protección del acero. Los resultados sobre el particular no han sido muy halagadores y actualmente existen muchas estructuras donde este método ha sido aplicado, que muestra corrosión

severa de la armadura, con el agravante que el uso de cualquier otro sistema de control incluyendo protección catódica podría no ser efectivo si a la armadura no se le elimina el recubrimiento.

El cinc en general protege al acero por un mecanismo de sacrificio. Ahora bien, en un medio alcalino como el del hormigón, el cinc fundamentalmente protege por formación de una capa compacta de productos de corrosión. Si hay riesgo de ataque por cloruros es importante que la capa de cinc puro del galvanizado tenga un espesor mínimo de alrededor de 50 μm y que la capa aleada Fe-Zn sea lo más pequeña posible. [4]

❖ **Protección Catódica**

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

La protección catódica se puede aplicar por ánodos de sacrificio o por corriente impresa, siendo este último el sistema más usado a nivel mundial. La protección por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como el ánodo. Resultados de laboratorio y a escala piloto en campo han demostrado efectividad en el uso de ánodos de aluminio u cinc. Este último ha sido aplicado en diferentes pilotes en

campo con resultados satisfactorios. También se ha usado para protección de tuberías de hormigón reforzado y pretensado, en suelos de baja resistividad.

En el caso de corriente impresa el ánodo podría ser cualquier material, ya que se utiliza una fuente de energía de corriente continua para inducir corriente que entra en la estructura a proteger, haciéndola cátodo. Sin embargo en el caso de la protección del acero en hormigón en estructuras aéreas, es necesario el uso de materiales (que van a actuar como ánodos) que no produzcan deterioro del hormigón, por lo cual deberían ser inertes o con muy bajas velocidades de oxidación. [4]

- **Protección indirecta a través del hormigón**

- **❖ Morteros de Reparación**

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

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

(activo), acelerándose su corrosión por la formación de una celda galvánica. En cualquier caso se debe remover todo el hormigón contaminado antes de reparar.
[4]

❖ **Revestimientos**

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

P Revestimientos Hidrófugos

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

P Membranas Orgánicas Prefabricadas

Son usadas para colocarse sobre la superficie del hormigón de manera temporal o permanente.

P Polímeros Impregnados sobre el Hormigón

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

P Otros Revestimientos

Son aplicados sobre el hormigón en forma líquida, formando una película protectora. Han sido eficaces para retardar/evitar la carbonatación del hormigón y a la vez son los responsables de presentar la buena apariencia necesaria de las edificaciones de hormigón. Entre los más importantes están los epóxicos, acrílicos y poliuretanos. Es bueno destacar los productos emulsionados con agua llamados

comúnmente látex, a base de acrílicos y muy usados a nivel doméstico. Se utilizan distintos tipos, siendo los más efectivos los barnices para hormigón arquitectónico, como los acrílicos y poliuretanos alifáticos. Para protección con pintura convenciones está extendido el uso de vinílicos, epóxicos y poliuretanos, entre otros. [4]

❖ **Extracción de los iones cloruro del hormigón**

Esta es una técnica electroquímica, actualmente en desarrollo, donde se aplica un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ion cloruro para ser atraído por un ánodo colocado externo a la superficie de la estructura tratada. En la protección catódica propiamente este efecto se lograría también, pero a largo plazo. La remoción de la mayor parte del cloruro libre y la producción de OH^- permite reestablecer la pasivación de la armadura. [4]

❖ **Realcalinización**

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

El principio de la realcalinización electroquímica es una técnica que involucra el paso de una corriente, a través del hormigón, hacia la armadura, por medio de un ánodo colocado externamente sobre la superficie de hormigón. Al igual que en la protección catódica se utiliza una fuente de energía de corriente continua, lográndose realcalinizar el hormigón mediante varios mecanismos, siendo los más importantes: la electrólisis en los electrodos (alrededor de la armadura cátodo), se generan iones OH^- (por electrólisis del agua y reducción del O_2 difundiendo en el

hormigón) y electroósmosis, movimiento del electrolito en el hormigón hacia el cátodo. Los hidróxidos de sodio y de calcio son generalmente utilizados como electrolitos cubriendo el hormigón, y al penetrar en los poros del mismo, prevendrían futuros decrecimientos del pH, atrapando el CO₂ que pudiese ingresar desde el exterior. [4]

❖ **Inhibidores de Corrosión**

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

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

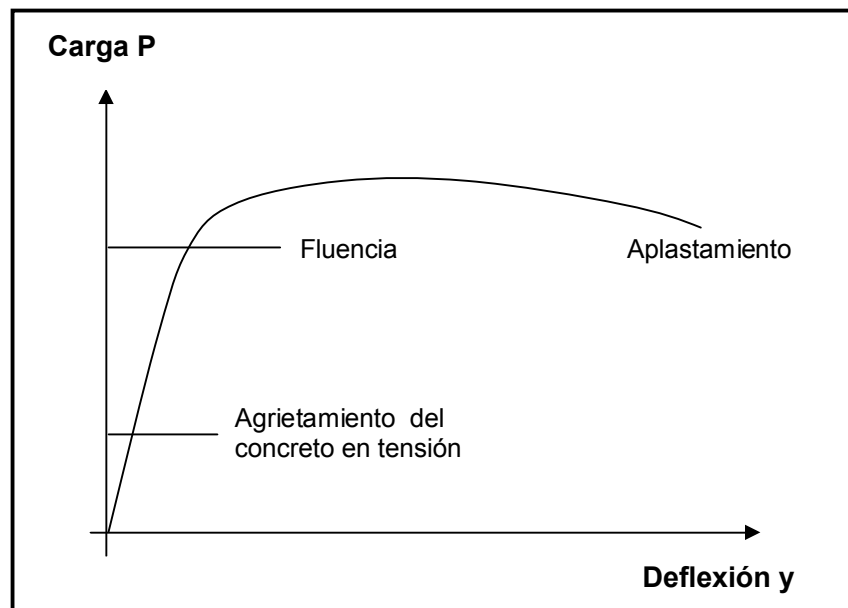
A nivel de laboratorio se han estudiado otros inhibidores como el ZnO con resultados satisfactorios, sin embargo su evaluación en campo es muy reciente.[4]

1.5 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO

Cuando se carga una viga, el comportamiento de ésta es esencialmente elástico y toda la sección contribuye a resistir el momento exterior. Cuando la tensión en la fibra más esforzada de alguna sección excede la resistencia del concreto a la tensión, empiezan a aparecer grietas. A medida que se incrementa la carga, estas grietas aumentan en número, en longitud y en abertura. A partir de la aparición de las primeras grietas, el comportamiento del espécimen ya no es elástico y las deflexiones no son proporcionales a las cargas. En las regiones agrietadas, el acero toma prácticamente toda la tensión. En esta etapa, el esfuerzo en el acero aumenta hasta que alcanza su valor de fluencia. Desde que el acero empieza a fluir, la deflexión crece en forma considerable, sin que apenas aumente la carga. Esto es, la resistencia del elemento es sólo ligeramente mayor que la carga que produce la fluencia del acero. Los primeros síntomas de la fluencia del acero son un incremento notable en la abertura y longitud de las grietas y un quiebre marcado en la curva carga-deflexión. A medida que aumenta la longitud de las grietas, la zona de compresión se va reduciendo, hasta que el concreto en esta zona es incapaz de tomar la compresión y se aplasta. El primer indicio de aplastamiento es el desprendimiento de escamas en la zona de compresión. Cuando esto ocurre, la carga disminuye con mayor o menor rapidez, dependiendo de la rigidez del sistema de aplicación de la carga, hasta que se produce el colapso final. [3]

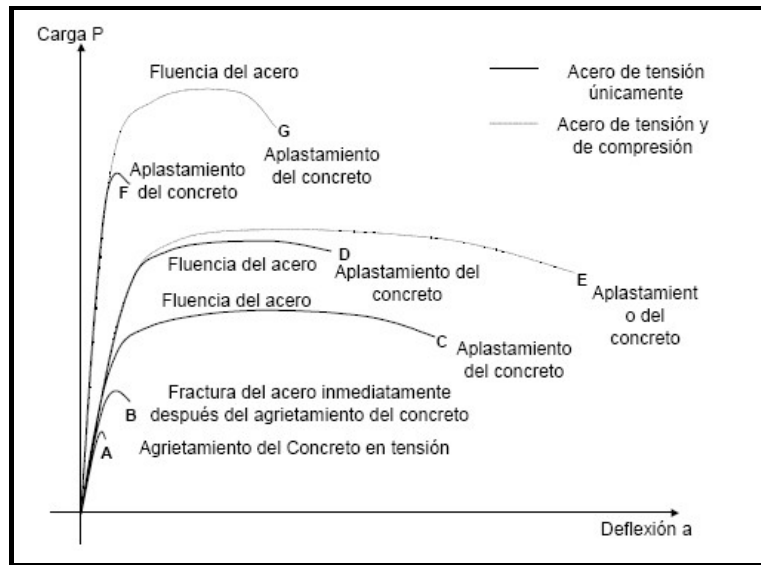
Según la cantidad de acero longitudinal con que está reforzada la pieza, éste puede fluir o no antes de que se alcance la carga máxima. Cuando el acero fluye, el comportamiento del miembro es dúctil; es decir, se producen deflexiones considerables antes del colapso final. En este caso se considera que el elemento

es subreforzado. Por otra parte, si la cantidad de acero longitudinal a tensión es grande, éste no fluye antes del aplastamiento y se dice entonces que el elemento es sobrerreforzado. Puede suceder que el elemento alcance su resistencia precisamente cuando el acero empieza a fluir. En este caso, se dice que el elemento es balanceado. A continuación se muestra el comportamiento típico a flexión de una viga de concreto reforzado:



Gráfica 2. Carga-deflexión de un elemento, con un porcentaje usual de acero de tensión.

La siguiente figura muestra la variación en el comportamiento de elementos que tienen distintos porcentajes de acero. Cada curva de trazo lleno representa la gráfica carga-deflexión de un elemento reforzado con una cantidad diferente de acero de tensión, desde una viga de concreto simple hasta otra con porcentaje muy alto de acero, del orden de siete por ciento. Se puede observar de inmediato el efecto de la cantidad y distribución del acero longitudinal. [3]



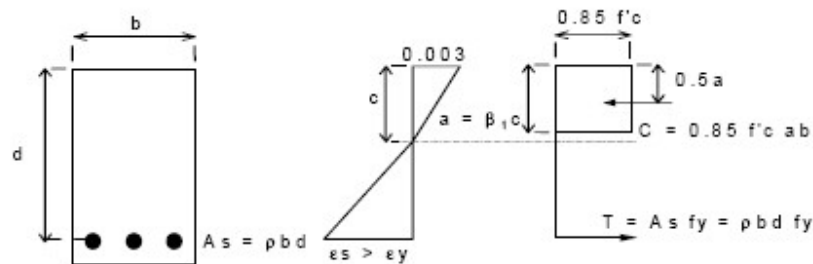
Gráfica 3. Gráficas carga - deflexión de elementos con porcentajes variables de acero (Sección, f'_c y f_y constantes) sujetos a flexión simple. [3]

A continuación se presenta una tabla que tiene un resumen que complementa lo expuesto en la figura anterior. En ella se muestran los casos propuestos en la gráfica 3 y los respectivos porcentajes de acero en tensión y en compresión, índice de refuerzo, tipo de elemento, modo de falla y grado de ductilidad para cada curva. [3]

Tabla 1. Características de elementos con distintos índices de refuerzo. [3]

Curva correspondiente a la Figura 2.2	Porcentaje de acero		Índice de refuerzo ω	Tipo de elemento	Modo de falla	Grado de ductilidad
	Tensión ρ	Compresión ρ'				
A	Nulo	Nulo	Nulo	Concreto simple	Concreto en tensión	Frágil
B	Muy pequeño	Nulo	Muy pequeño	Muy Subreforzado	Fractura del acero, frágil	Poco dúctil
C	Normal bajo	Nulo	Normal bajo	Subreforzado	Aplastamiento después de la fluencia	Muy dúctil
D	Normal alto	Nulo	Normal alto	Subreforzado	Aplastamiento después de la fluencia	Dúctil
E	Normal alto	Del orden de tensión	Normal bajo	Subreforzado	Aplastamiento después de la fluencia	Muy dúctil
F	Muy alto	Nulo	Muy alto	Sobrerreforzado	Aplastamiento sin fluencia del acero	Frágil
G	Muy alto	Del orden de tensión	Normal bajo	Subreforzado	Aplastamiento después de la fluencia	Dúctil

En la siguiente figura se muestra la deducción de una fórmula para la obtención del momento nominal M_n , según el reglamento ACI 318-83. Esta deducción es aplicable únicamente a secciones rectangulares subreforzadas, con refuerzo de tensión únicamente. [3] (Aplicable a los elementos de esta investigación).



Por equilibrio:

$$C = T$$

$$0.85 f'_c * a b = \rho * b d * f_y$$

$$a = \frac{\rho * d * f_y}{0.85 f'_c} \quad (1)$$

Tomando momentos respecto al acero de tensión:

$$M_n = C \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.85 f'_c * a b * d \left(1 - \frac{a}{2d} \right)$$

Sustituyendo a de la ecuación (1) y tomando en cuenta que $\omega = \rho * \frac{f_y}{f'_c}$:

Ecuación 3. Momento resistente de elementos rectangulares con refuerzo de tensión únicamente, de acuerdo con el reglamento ACI 318-83. [3]

$$M_n = b d^2 * f'_c * \omega (1 - 0.59 * \omega)$$

1.6 RELACIÓN ENTRE CAPACIDAD DE CARGA Y CORROSIÓN

Basado en la información experimental que se encuentra en la literatura versada en este tema, (Almusallam et al, 1997 y 1996; Cabrera, 1996; Huang y Yang, 1997; Mangat, 1999; Rodríguez et al 1997 y 1996; Tachibana et al, 1990) es en la etapa de vida remanente en donde la estructura comienza a disminuir considerablemente su capacidad de carga, o resistencia. Pocos han sido los investigadores que han intentado determinar la pérdida de resistencia de un elemento estructural producida por corrosión del acero de refuerzo (Almusallam et al, 1997 y 1996; Cabrera, 1996; Huang y Yang, 1997; Mangat, 1999; Rodríguez et al 1997 y 1996; Tachibana et al, 1990). Muchas han sido las especulaciones sobre este tema y mucho se necesita investigar antes de poder llegar a conclusiones que sean aceptadas por la comunidad científica.

En estudios anteriores hechos por diferentes autores (Almusallam et al, 1997 y 1996; Andrade et al, 1996; Cabrera, 1996; Huang y Yang, 1997; Mangat, 1999; Rasheeduzzafar et al, 1992; Rodríguez et al 1997 y 1996; Saeki, 1988; Tachibana et al, 1990), se determinó experimentalmente la pérdida de resistencia de elementos de concreto sometiéndolos a diferentes tipos de carga (compresión, flexión, tensión) y a diferentes grados de corrosión de la barra de refuerzo. Estos autores usaron en sus investigaciones vigas, columnas, o pequeños prismas reforzados, a los cuales se le aplicaron cargas dependiendo del tipo de elemento estructural que conformaba. La corrosión de la(s) barra(s) de refuerzo en todos estos experimentos fue acelerada por algún medio electroquímico (corriente o potencial anódico constante).

Como un primer intento para correlacionar pérdida de acero por corrosión con la resistencia del elemento estructural, se realizaron algunas simplificaciones para poder determinar una relación entre la penetración de la corrosión promedio en la barra de acero (también llamada pérdida promedio de radio o x_{PROM}), el ancho de grieta promedio, w_G , medidos en la superficie del concreto, y la disminución de la resistencia original de elemento estructural por corrosión (Torres Acosta y Martínez Madrid, 2001). Para esto, se tomó la información de los autores mencionados con anterioridad y se compararon los valores de la capacidad de carga (momento flexionante M_C y carga axial en compresión P_C) de los elementos corroídos con los valores de capacidad de carga de los elementos no corroídos (momento flexionante M_{NC} y carga axial en compresión P_{NC}). Esto es:

$$\text{Vigas: } CC_{CORR} = M_C/M_{NC}$$

$$\text{Columnas: } CC_{CORR} = P_C/P_{NC}$$

Ecuación 4. Capacidad de carga por corrosión de un elemento estructural.

En donde CC_{CORR} es la capacidad de carga por corrosión de un elemento estructural independiente del tipo de carga que actúa sobre éste. Los valores de M_{NC} , P_{NC} fueron tomados de los valores experimentales de los elementos llamados 'controles', a los cuales no se les aplicó corriente anódica (o potencial anódico) alguna(o). [3]

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 PARÁMETROS DE ESTUDIO

La variable sobre la cual se realizó el experimento fue el tiempo de corrosión. Cinco vigas permanecieron sumergidas en Cloruro de Sodio Analítico por un período de dos y cuatro meses respectivamente, con una concentración del 3% de NaCl con respecto al peso del agua. Simultáneamente la misma cantidad de vigas fueron sumergidas en agua potable. En los períodos de prueba se midió el potencial de corrosión, la resistencia a flexión de todas las vigas, y posteriormente la masa correspondiente a cada varilla de refuerzo.

2.2 GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS

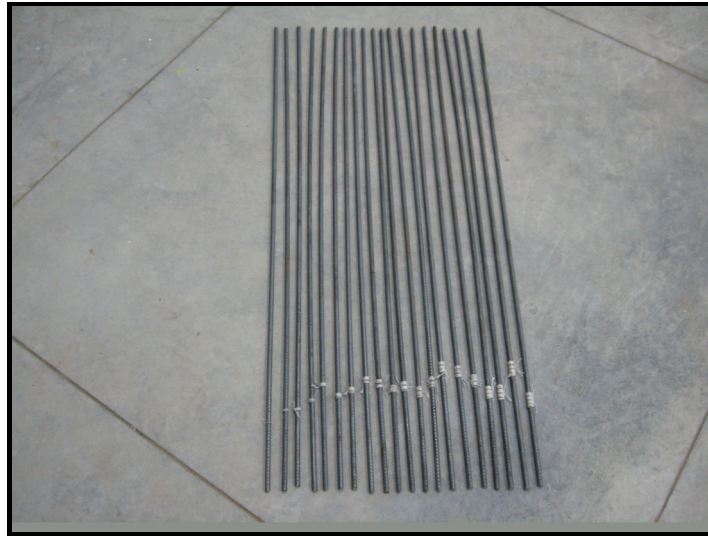
Se fabricaron veinte (20) vigas de concreto con las siguientes dimensiones: 10 cm de base, 15 cm de altura y 110 cm de longitud. El refuerzo lo constituye una varilla de 0.95 cm de diámetro (3/8") y 120 cm de longitud, sin estribos y un recubrimiento de 4 cm. (Fotografías 1, 2 y 3).



Fotografía 1. Vigas de concreto vista frontal y superior.



Fotografía 2. Vigas de concreto vista lateral y superior.



Fotografía 3. Acero de refuerzo.

A continuación se muestran los valores de resistencia de las vigas de concreto reforzado (Tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de la resistencia de los elementos.

Datos			
$f'_c =$	210	kg/cm ²	$\rho_{\min} =$ 0,0033
$f_y =$	4200	kg/cm ²	$\rho_b =$ 0,02125
			$\rho_{\max} =$ 0,0159
$r =$	4	cm	
$h =$	15	cm	$\rho =$ 0,00673
$b =$	10	cm	$\omega =$ 0,1347
$\Phi_v =$	0,95	cm	$M_n =$ 28843,43 kg*cm
$d =$	10,53	cm	$P =$ 1048,85 kg
$A_s =$	0,71	cm ²	
$L =$	110	cm	

Siendo:

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y}$$

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f'c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \text{ Con } f'c \text{ y } f_y \text{ en Mpa.}$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = 0.75 * \rho_b$$

$$\rho = \frac{A_s}{(bd)}$$

$$\omega = \frac{(\rho * f_y)}{f'c}$$

$$Mn = bd^2 f'c \omega (1 - 0.59\omega)$$

$$P = \frac{(4Mn)}{L}$$

2.3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Las varillas de refuerzo, fueron cortadas todas a la misma longitud (120 cm), y marcadas en uno de los extremos con pita, a su vez se pesaron individualmente para llevar un control de la perdida de masa, y el volumen de material corroído durante el experimento. (Fotografía 4 y Tabla 3).

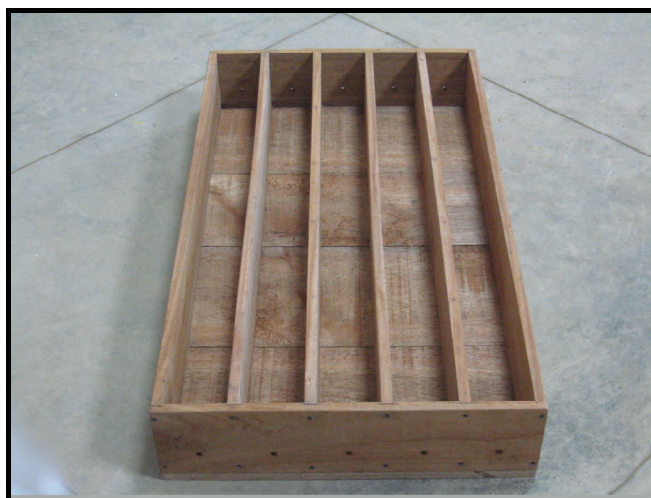


Fotografía 4. Marcaje de las varillas.

Tabla 3. Masas iniciales (m_i) de las varillas de refuerzo.

Viga	Refuerzo	Masa (gr)
01	01	595
02	02	590
03	03	590
04	04	590
05	05	590
06	06	590
07	07	590
08	08	590
09	09	595
10	10	590
11	11	590
12	12	590
13	13	590
14	14	590
15	15	590
16	16	595
17	17	590
18	18	590
19	19	590
20	20	590

La formaleta para la realización de las vigas, se fabricó de madera Caracolí, con un espesor de hoja de 2 cm, dejando una base de 114*62 cm², y 8 hojas de 15 cm de altura, 2 de ellas como caras frontal y posterior de 62 cm de longitud y 6 hojas como caras laterales de 110 cm de longitud cada una, sostenida entre si por 24 tornillos para madera. En las caras frontal y posterior, a 4 cm de su base se ubicó un agujero de 1.2 cm, para permitir el paso de la varilla de refuerzo. (Fotografía 5).



Fotografía 5. Formaleta.

2.4 RECUBRIMIENTO DEL REFUERZO

La varilla de acero sobresale 5 cm a lado y lado de la viga, con el propósito de facilitar las posteriores mediciones del potencial eléctrico de corrosión. Esta porción del refuerzo se verá expuesto a corrosión tanto en las vigas sumergidas en agua potable como en las contaminadas, es por este motivo que para evitar inicios de deterioro en los extremos de las vigas reforzadas, se recubrió la varilla 8 cm en cada lado, con un producto Sika denominado Sika Top – Armatec 108, el cual se aplicó siguiendo las especificaciones técnicas descritas en el manual de productos Sika edición 2007. (Fotografías 6, 7, 8 y 9).



Fotografía 6. Recubrimiento de protección.



Fotografía 7. Elementos utilizados para la aplicación.



Fotografía 8. Elementos de seguridad.

Sika Top – Armatec 108 es un recubrimiento protector, cementoso, modificado con resina acrílica, de dos componentes, con inhibidor de corrosión. El producto sobre el acero de refuerzo se aplicó en dos capas.



Fotografía 9. Varillas protegidas con el recubrimiento.

2.5 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

Las vigas se fabricaron en la planta de concretos PREVESA LTDA, obteniendo elementos de concreto reforzado con un $f'c$ de 21 Mpa (210 kg/cm² o 3000 psi), con una relación agua/cemento de 0.6. Los materiales utilizados en la planta fueron Cemento Argos Tipo III, Arena y Triturado de Pescadero. Todos los materiales cumplen con las especificaciones de la Norma para los diferentes ensayos en los agregados y el cemento. (Tablas 10, 11 y 12).

Tabla 4. Cemento Tipo III.

DESCRIPCION	UNIDADES	VALORES	RANGO
Peso específico	g / cm ³	3,13	
Finura blaine	cm ² / gr	5107	min 2800
Consistencia normal	%	27,66	
Fraguado inicial	min	101	> 45
Fraguado final	min	197	< 480
Resistencia 1 día	Kg / cm ²	202	> 100
Resistencia 3 días	Kg / cm ²	306	> 210
Resistencia 7 días	Kg / cm ²	422	
Resistencia 28 días	Kg / cm ²	553	
SO ₃	%	2,1	max 3,5
Cal libre	%	1,22	
SiO ₂	%	20,58	
AlO ₃	%	4,51	
FE ₂ O ₃	%	3,92	
CaO	%	64,92	
MgO	%	2,99	max 7,0
K ₂ O	%	0,22	
Na ₂ O	%	0,19	

Tabla 5. Arena Pescadero.

DESCRIPCION	UNIDADES	VALORES	RANGO
Densidad aparente	g / cm ³	2,4	
Materia organica	%	No contiene	
Humedad natural	%	5	
Modulo de finura	M.F.	3	2,6 - 3,3
Absorción	%	1,19	
Masa unitaria suelta	g / cm ³	1,567	
Masa unitaria compactada	g / cm ³	1,7	

Tabla 6. Triturado Pescadero.

DESCRIPCION	UNIDADES	VALORES	RANGO
Densidad aparente	g / cm ³	2,67	
Absorción	%	1,04	
Masa unitaria suelta	g / cm ³	1,426	
Masa unitaria compactada	g / cm ³	1,501	
Desgaste los angeles	%	27,38	
Indice de aplanamiento	%	17,61	
Indice de alargamiento	%	22,89	

Fue necesario engrasar la formaleta de madera para facilitar el desencofrado de las vigas. (Fotografía 10).



Fotografía 10. Formaleta engrasada.

Los elementos se dejaron 28 días en curado, tiempo necesario para que el concreto alcanzara su máxima resistencia. El curado se realizó en la planta de concretos, sumergiendo las vigas en una pileta destinada para esta labor. (Fotografías 11, 12 y 13).



Fotografía 11. Colocación de la mezcla.



Fotografía 12. Curado de vigas vista frontal.



Fotografía 13. Curado de vigas vista superior.

2.6 MATERIAL CONTAMINANTE

Las vigas de concreto reforzado se colocaron verticalmente dentro de cuatro tanques, de 90 cm de altura y 57 cm de diámetro, en cada tanque se ubicaron 5 elementos. (Fotografía 14).



Fotografía 14. Tanques de almacenamiento.

El material utilizado para contaminar las vigas de concreto reforzado fue el Cloruro de Sodio (NaCl) Analítico. La solución contaminante se realizó con una concentración del 3% de NaCl con respecto al peso del agua contenido en el tanque. Dos tanques contenían agua potable y los otros dos fueron contaminados con la misma concentración, la variable fue el tiempo de corrosión, evaluada para los período de dos y cuatro meses respectivamente. (Fotografías 15 y 16).



Fotografía 15. Material contaminante.



Fotografía 16. Vigas sumergidas.

Las vigas en contacto con cloruros mostraron grandes cambios en su aspecto en los períodos de contaminación, principalmente en el acero expuesto a la solución. En los elementos testigos también se observaron algunos cambios. (Fotografías 17, 18, 19, 20, 21 y 22).



Fotografía 17. Vigas contaminadas inicio de exposición.



Fotografía 18. Vigas contaminadas dos meses de exposición.



Fotografía 19. Vigas contaminadas cuatro meses de exposición.



Fotografía 20. Vigas testigos inicio de exposición.



Fotografía 21. Vigas testigos dos meses de exposición.



Fotografía 22. Vigas testigos cuatro meses de exposición.

2.7 MEDIDAS DEL POTENCIAL ELECTROQUÍMICO

El potencial electroquímico es un parámetro muy importante desde el punto de vista termodinámico, ya que permite conocer qué metal se comporta como ánodo y cuál como cátodo. Aún en situaciones en donde un metal presenta diferencias de potencial debido a heterogeneidades superficiales, algunas veces es posible determinar qué zona se encuentra actuando como cátodo y cuál como ánodo. [9]

Las medidas de potencial del refuerzo de las vigas, se realizaron empleando el electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) como referencia. El ensayo consiste en conectar dos cables al voltímetro, uno de ellos se conecta directamente al acero de refuerzo y el otro cable que tiene al final el electrodo se sitúa sobre el concreto separado a su vez por una esponja húmeda. Se registraron cinco valores por cada cara de la viga. (Fotografía 23 y tablas 7 y 8).



Fotografía 23. Lectura del potencial de corrosión del refuerzo de acero, empleando el electrodo de Cu/CuSO_4 como referencia.

Tabla 7. Valores del potencial de corrosión del refuerzo de acero, tomados con el electrodo de Cu/CuSO₄, para las vigas sumergidas durante un periodo de dos meses.

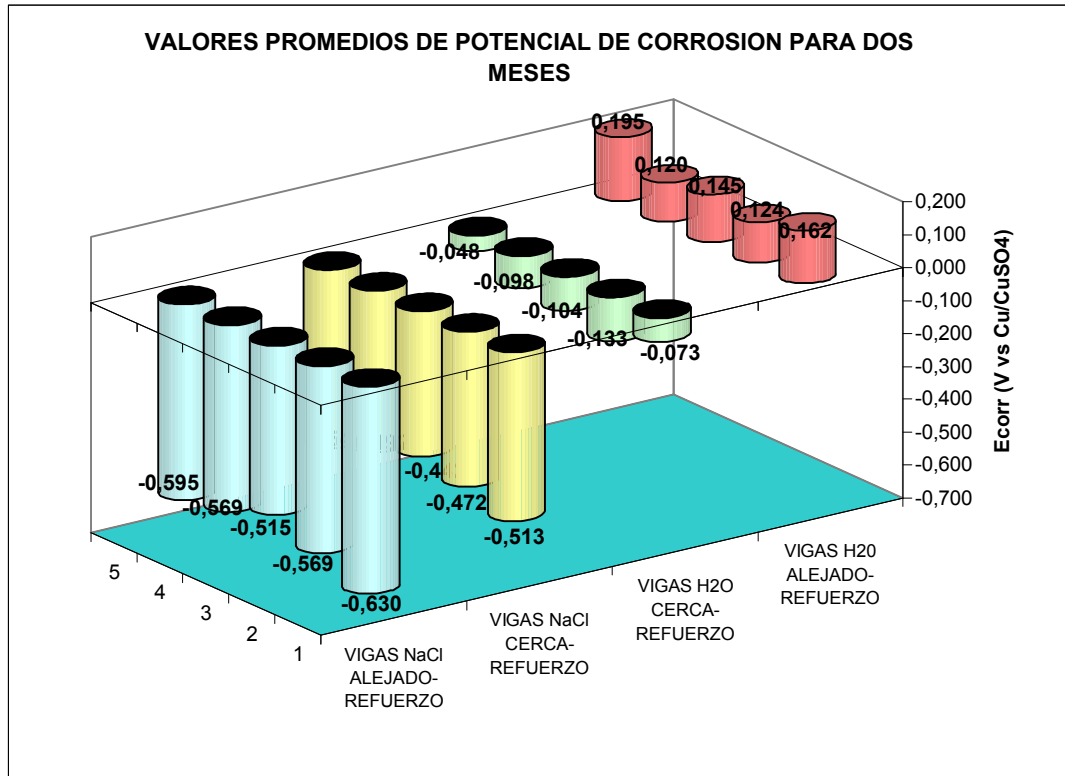
VALORES DEL POTENCIAL DE CORROSION										
Vigas sumergidas en H ₂ O	Potencial (Voltios) lado mas alejado del refuerzo					Potencial (Voltios) lado mas cercano al refuerzo				
01	0,130	0,226	0,202	0,080	0,232	0,020	-0,076	0,030	0,074	0,082
04	0,210	0,100	0,170	0,150	0,190	-0,235	-0,256	-0,250	-0,233	-0,190
07	0,190	0,160	0,160	0,148	0,210	0,030	-0,042	-0,051	-0,050	0,010
09	0,188	0,050	0,120	0,110	0,195	-0,200	-0,240	-0,270	-0,246	-0,160
11	0,090	0,082	0,074	0,110	0,150	0,020	-0,053	0,020	-0,033	0,020

Vigas sumergidas en NaCL	Potencial (Voltios) lado mas alejado del refuerzo					Potencial (Voltios) lado mas cercano al refuerzo				
02	-0,777	-0,726	-0,631	-0,672	-0,705	-0,618	-0,582	-0,506	-0,569	-0,672
03	-0,682	-0,646	-0,627	-0,631	-0,633	-0,472	-0,418	-0,406	-0,435	-0,474
05	-0,591	-0,527	-0,471	-0,575	-0,583	-0,385	-0,331	-0,328	-0,363	-0,403
06	-0,580	-0,512	-0,503	-0,550	-0,560	-0,414	-0,381	-0,308	-0,411	-0,459
08	-0,522	-0,435	-0,341	-0,418	-0,493	-0,675	-0,650	-0,660	-0,682	-0,705

Tabla 8. Valores del potencial de corrosión del refuerzo de acero, tomados con el electrodo de Cu/CuSO₄, para las vigas sumergidas durante un periodo de cuatro meses.

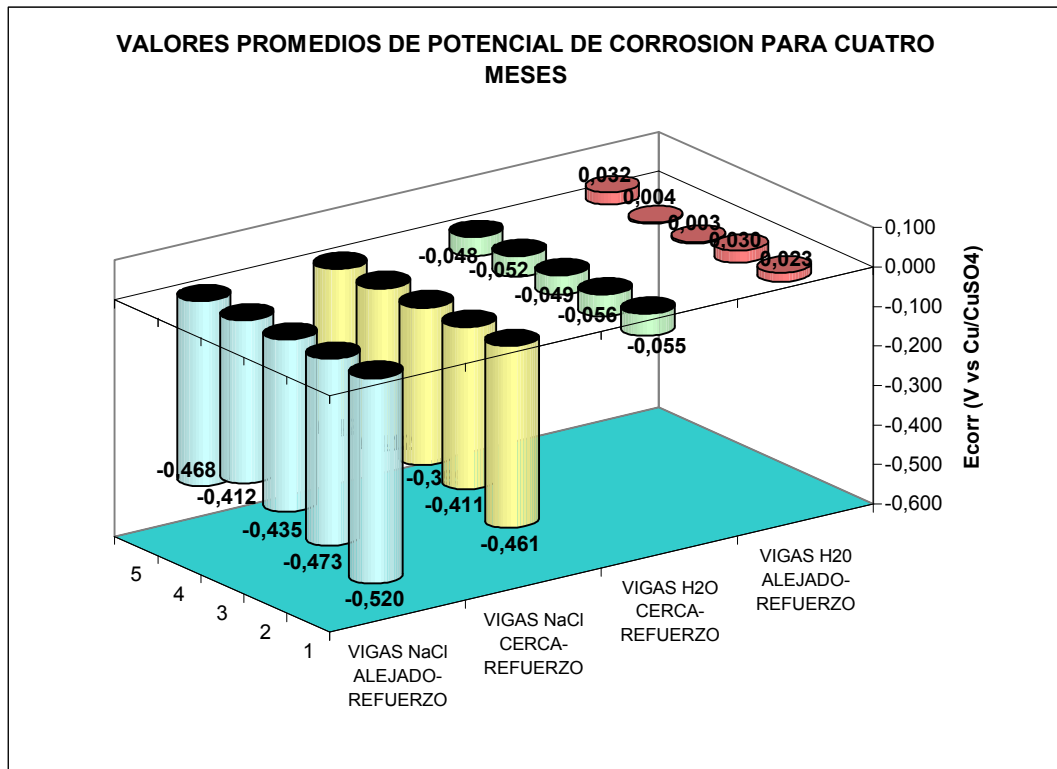
VALORES DEL POTENCIAL DE CORROSION										
Vigas sumergidas en H ₂ O	Potencial (Voltios) lado mas alejado del refuerzo					Potencial (Voltios) lado mas cercano al refuerzo				
12	-0,038	-0,040	-0,048	-0,040	-0,030	-0,080	-0,084	-0,078	-0,060	-0,040
14	0,160	0,162	0,105	0,030	0,060	-0,011	-0,012	-0,012	-0,031	-0,030
18	-0,032	-0,010	-0,062	-0,018	-0,012	-0,093	-0,082	-0,071	-0,072	-0,074
19	-0,010	-0,011	-0,018	-0,012	-0,010	-0,018	-0,015	-0,013	-0,012	-0,010
20	0,035	0,048	0,040	0,060	0,150	-0,075	-0,085	-0,073	-0,083	-0,087

Vigas sumergidas en NaCl	Potencial (Voltios) lado mas alejado del refuerzo					Potencial (Voltios) lado mas cercano al refuerzo				
10	-0,575	-0,570	-0,489	-0,490	-0,505	-0,463	-0,403	-0,405	-0,458	-0,430
13	-0,535	-0,478	-0,475	-0,420	-0,490	-0,447	-0,412	-0,400	-0,393	-0,408
15	-0,457	-0,385	-0,405	-0,393	-0,428	-0,420	-0,370	-0,384	-0,392	-0,428
16	-0,557	-0,503	-0,435	-0,410	-0,456	-0,456	-0,385	-0,350	-0,383	-0,375
17	-0,478	-0,430	-0,373	-0,347	-0,460	-0,517	-0,485	-0,455	-0,432	-0,463



Gráfica 4. Valores promedios de potencial de corrosión para dos meses, tomados respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre.

En la grafica anterior se muestran los potenciales promedios para la cara superior e inferior de las vigas estudiadas (lado alejado y lado cercano del refuerzo). Los valores de potencial registrados son favorables conforme al comportamiento esperado. Los elementos en contacto con cloruros presentaron una clara agresividad, mientras que las vigas testigos (vigas sumergidas en agua potable) presentaron un comportamiento pasivo.

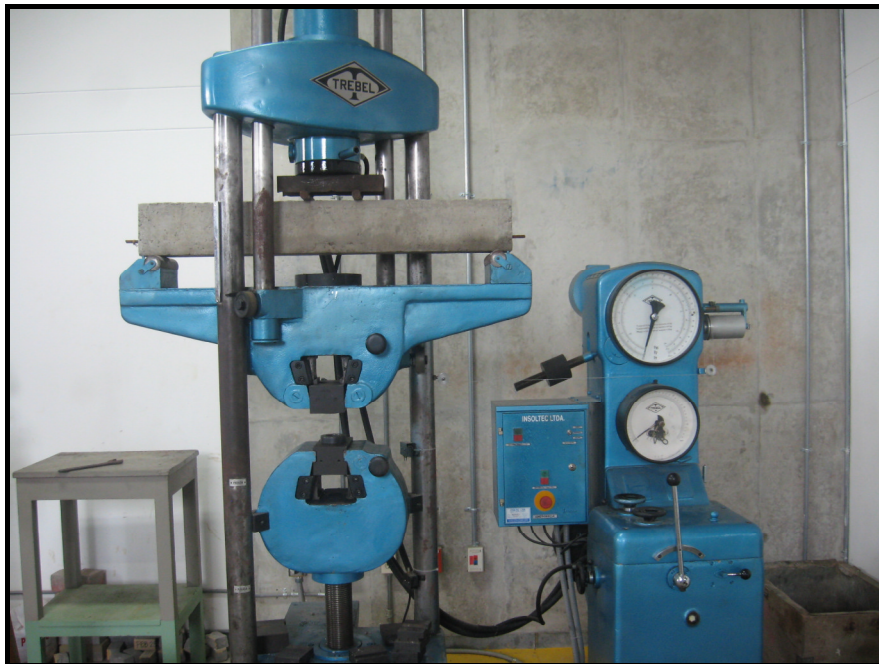


Gráfica 5. Valores promedios de potencial de corrosión para cuatro meses, tomados respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre.

Para el tiempo de cuatro meses de contaminación los resultados continuaron siendo los esperados, manteniéndose constante la presencia de valores menores (más negativos) de potencial para las vigas en contacto con cloruros.

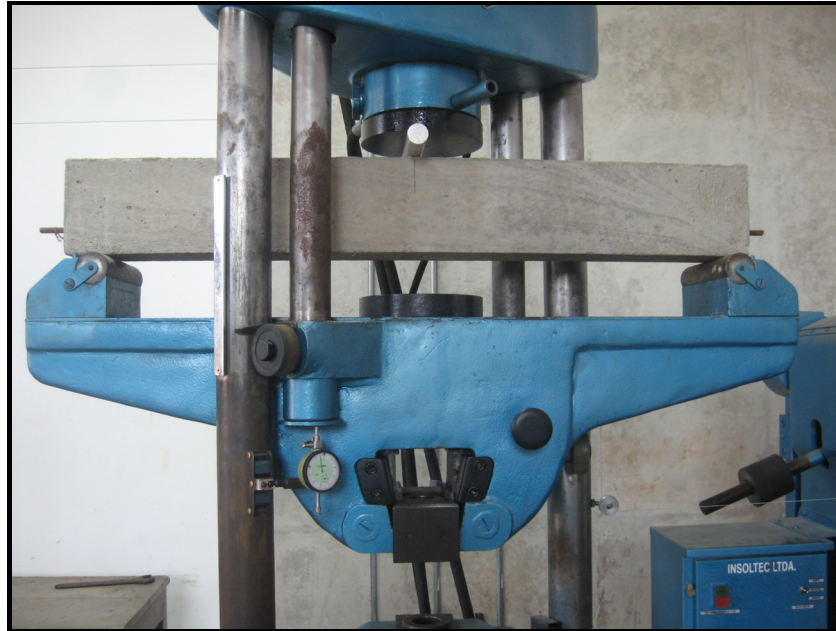
2.8 ENSAYO DE FLEXIÓN

Después de medir el potencial de corrosión de las vigas se realizó el ensayo a flexión de cada una de ellas, para analizar la resistencia de los elementos contaminados comparándola con la obtenida en las vigas testigos. La prueba de carga fue la misma para cada uno de los especímenes y se realizó en la máquina UNIVERSAL de 50 toneladas de capacidad. La carga inicial de todas las vigas fue de 100 Kg. Cada 100 Kg de carga se media el desplazamiento del elemento utilizando un deformímetro. (Fotografía 24).



Fotografía 24. Viga reforzada montada en la máquina UNIVERSAL.

2.8.1 Evaluación de la resistencia a flexión



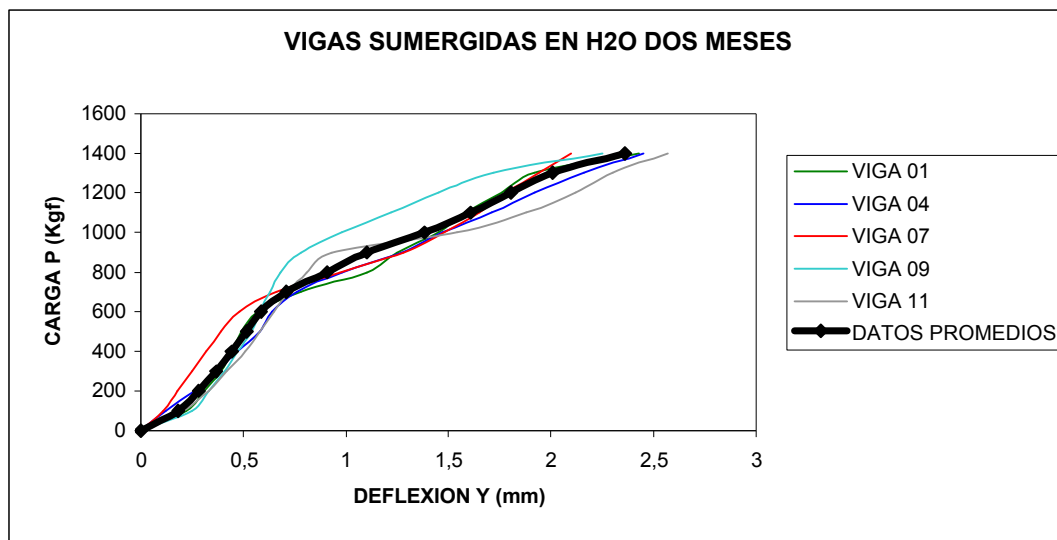
Fotografía 25. Viga reforzada lista para ensayar.

A continuación se muestran los valores promedios obtenidos en el ensayo de flexión junto con su correspondiente gráfica, para los períodos establecidos de dos y cuatro meses. Los valores obtenidos en la prueba para cada una de las vigas se encuentran en la sección anexos.

Vigas sumergidas durante un periodo de dos meses

Tabla 9. Valores promedios vigas sumergidas en agua potable durante dos meses.

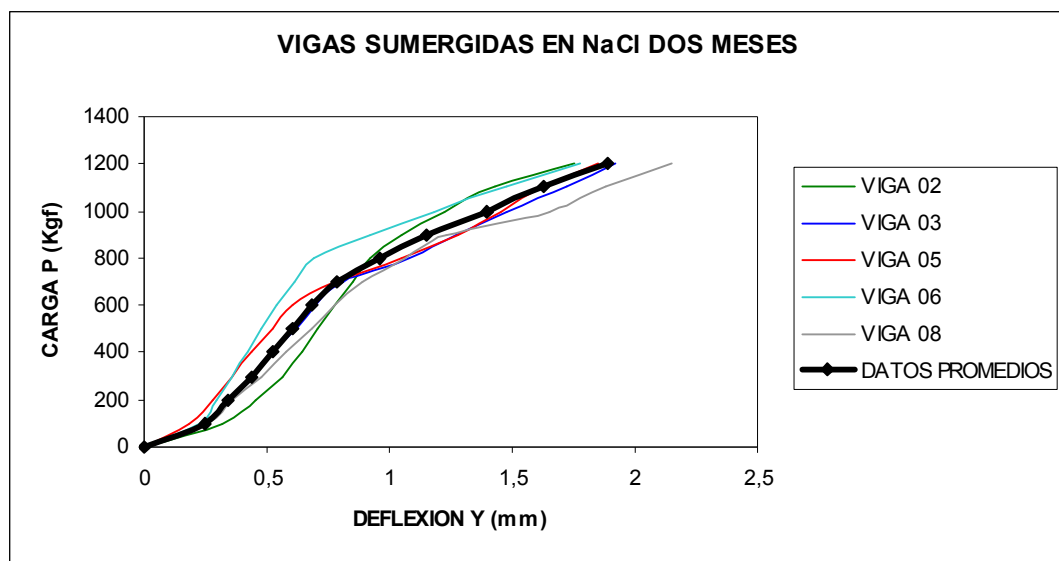
PROMEDIO SUMERGIDAS EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,18
200	0,28
300	0,37
400	0,44
500	0,52
600	0,58
700	0,71
800	0,91
900	1,10
1000	1,38
1100	1,61
1200	1,81
1300	2,01
1400	2,36



Gráfica 6. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en agua potable durante dos meses.

Tabla 10. Valores promedios vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante dos meses.

PROMEDIO SUMERGIDAS EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,24
200	0,34
300	0,44
400	0,52
500	0,60
600	0,68
700	0,79
800	0,96
900	1,15
1000	1,40
1100	1,63
1200	1,89

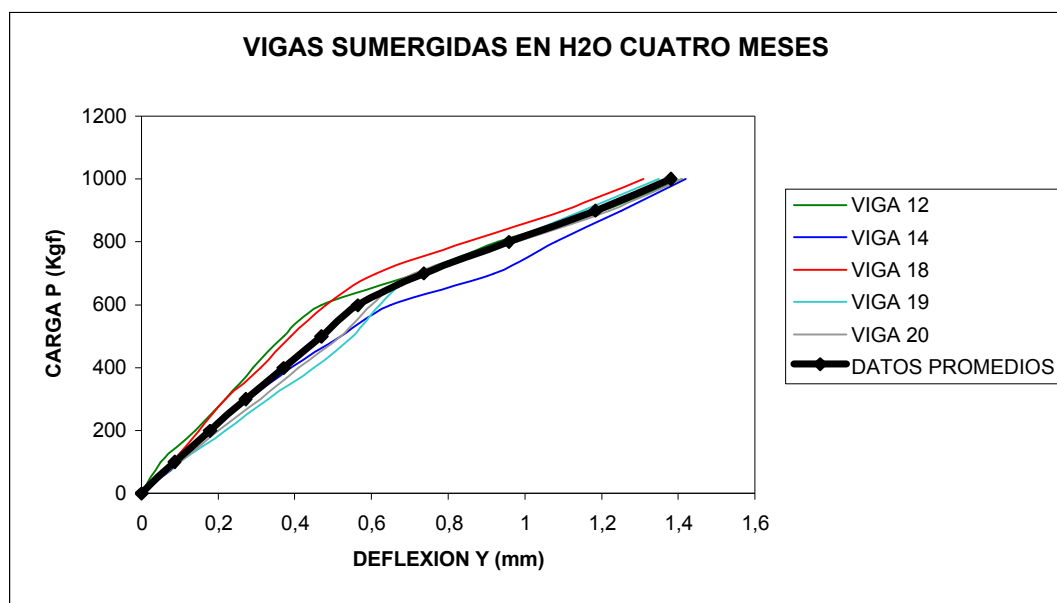


Gráfica 7. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante dos meses.

Vigas sumergidas durante un periodo de cuatro meses

Tabla 11. Valores promedios vigas sumergidas en agua potable durante cuatro meses.

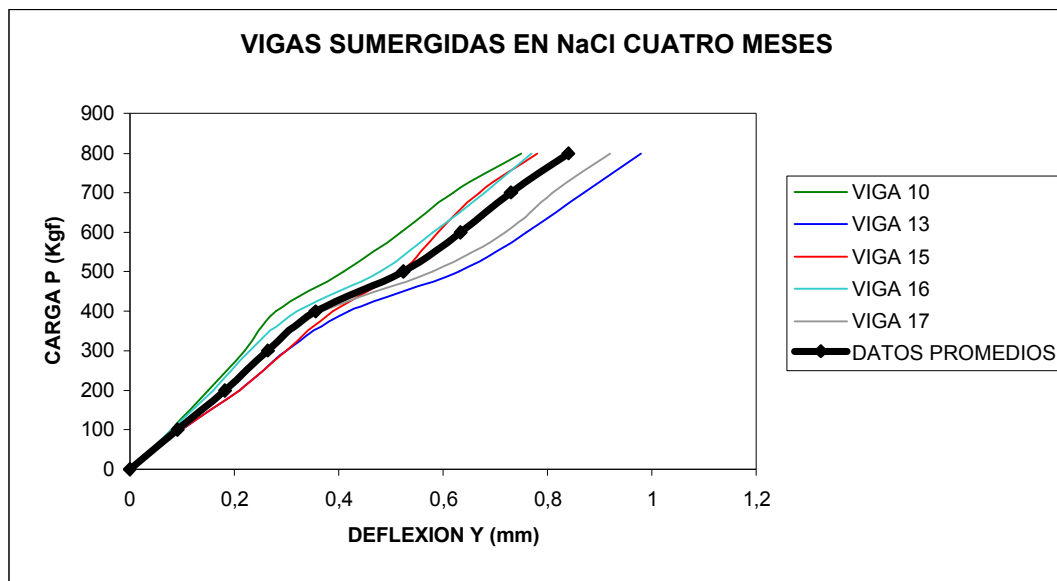
PROMEDIO SUMERGIDAS EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,09
200	0,18
300	0,27
400	0,37
500	0,47
600	0,56
700	0,74
800	0,96
900	1,18
1000	1,38



Gráfica 8. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en agua potable durante cuatro meses.

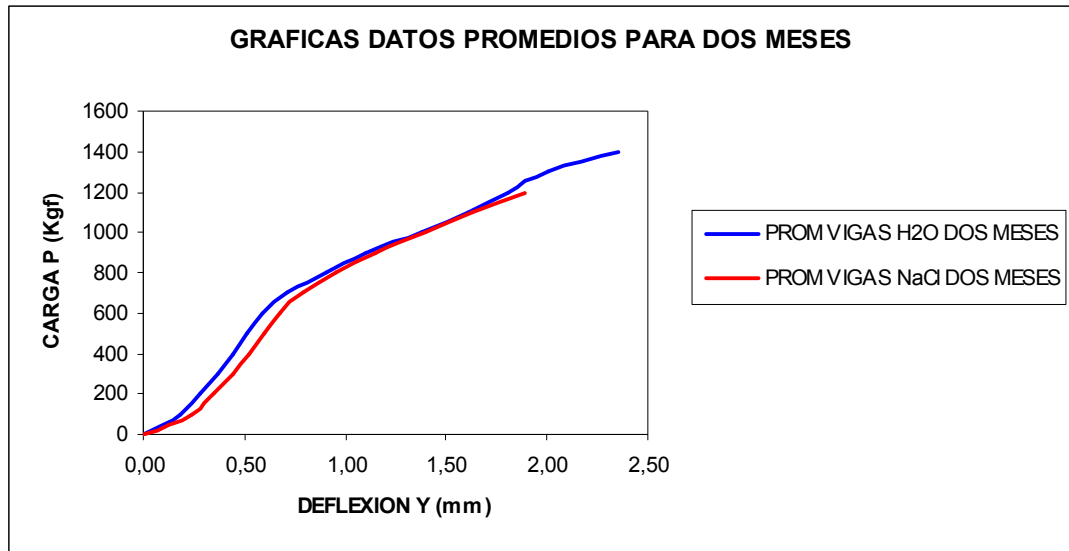
Tabla 12. Valores promedios vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante cuatro meses.

PROMEDIO SUMERGIDAS EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,09
200	0,18
300	0,26
400	0,36
500	0,52
600	0,63
700	0,73
800	0,84

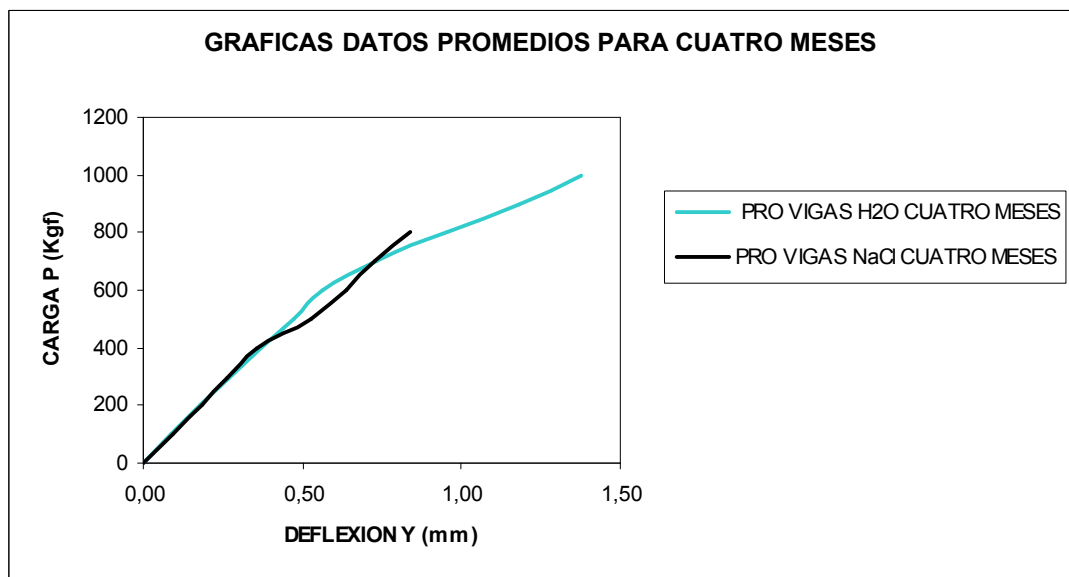


Gráfica 9. Gráficas carga - deflexión vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico durante cuatro meses.

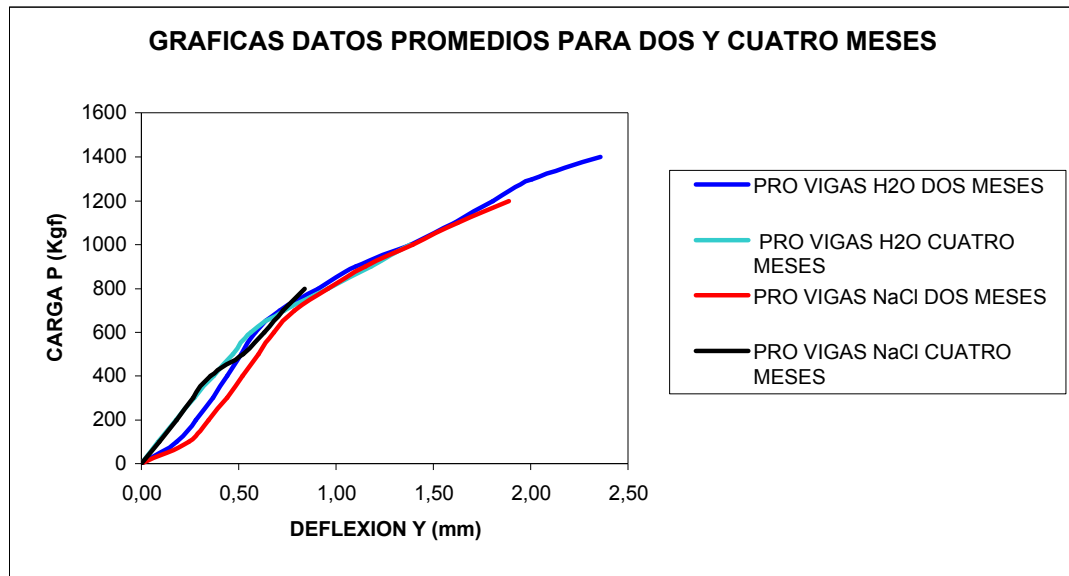
Graficas comparativas para los períodos de tiempo analizados



Gráfica 10. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante dos meses.



Gráfica 11. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante cuatro meses.



Gráfica 12. Gráficas comparativas carga - deflexión vigas sumergidas durante dos y cuatro meses.

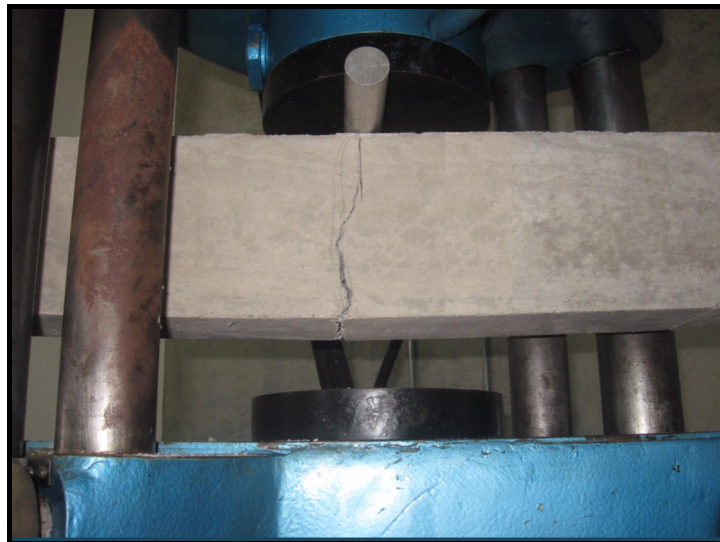
En la gráfica anterior se puede observar claramente la incidencia que produce el efecto de los iones cloruro en la resistencia a flexión de las vigas de concreto reforzado. Las vigas sumergidas en agua potable para los dos períodos de falla soportaron mayor carga comparadas con los elementos contaminados.

El tiempo de corrosión incidió en la disminución de la resistencia a flexión para las vigas sumergidas en cloruro de sodio analítico, presentándose menores valores de carga soportada para los elementos sumergidos durante cuatro meses. En las vigas que permanecieron en agua potable durante cuatro meses se observó una disminución de la resistencia al compararla con las sumergidas en el período de dos meses, esto puede atribuirse a que en algunas zonas de los elementos se presentaron valores de potencial negativos, debido a la exposición permanente en agua de la parte de refuerzo que sobresalía del concreto.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DEL MODO DE FALLA DE LAS VIGAS DE CONCRETO

Las vigas sumergidas en agua potable presentaron una forma de falla característica en estos casos. La falla comienza por la fibra inferior que soporta mayor esfuerzo a tracción por la flexión, al incrementarse continuamente la carga aparece una grieta prolongada que se desarrolla verticalmente y penetra en la zona de compresión hasta producir la falla de rotura. (Fotografías 26 y 27).



Fotografía 26. Tendencia de la falla vigas testigos.



Fotografía 27. Varilla de refuerzo viga testigo.

Las vigas contaminadas presentaron dos grietas inclinadas, a lado y lado de su centro de luz, lo que puede ser atribuido a la corrosión del refuerzo en las zonas dónde se inicia la fisuración. La fisura se desarrolla de manera inclinada, muy diferente a la forma de falla del caso de vigas sin corrosión. (Fotografías 28 y 29).



Fotografía 28. Tendencia de la falla vigas contaminadas.



Fotografía 29. Varilla de refuerzo viga contaminada.

Se pudo comprobar mediante los ensayos y por observación el daño que genera la corrosión en los elementos de concreto reforzado. Para esta investigación son los iones cloruro los causantes de dicho deterioro, reflejado esto en su respectiva forma y desarrollo de la falla. Para entender mejor este proceso a continuación se muestran los valores obtenidos de la capacidad de carga por corrosión CC_{CORR} de las vigas estudiadas.

Valor de CC_{CORR} para los elementos sumergidos durante dos meses:

$P_{NC} =$	1400	kg
$P_C =$	1200	kg
$L =$	110	cm
$M_{NC} =$	38500	kg*cm
$M_C =$	33000	kg*cm
$CC_{CORR} =$	0,857	VIGAS DOS MESES

Valor de CC_{CORR} para los elementos sumergidos durante cuatro meses:

$P_{NC} =$	1000	kg
$P_C =$	800	kg
$L =$	110	cm
$M_{NC} =$	27500	kg*cm
$M_C =$	22000	kg*cm
$CC_{CORR} =$	0,800	VIGAS CUATRO MESES

Donde los valores de la capacidad de carga, momento flexionante M_C y carga axial en compresión P_C pertenecen a las vigas corroídas y momento flexionante M_{NC} y carga axial en compresión P_{NC} son los valores correspondientes a los elementos no corroídos.

La capacidad de carga por corrosión CC_{CORR} de las vigas disminuyó al aumentar el tiempo de exposición con cloruros, esta variación podría ser mayor si se aumentara el tiempo de contaminación.

3.2 ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA DEL ACERO

Vigas sumergidas durante un periodo de dos meses

Vigas H ₂ O	Refuerzo	Minicial (gr)	Mfinal (gr)
01	01	595	595
04	04	590	590
07	07	590	590
09	09	595	595
11	11	590	590

Vigas NaCl	Refuerzo	Minicial (gr)	Mfinal (gr)
02	02	590	585
03	03	590	585
05	05	590	590
06	06	590	590
08	08	590	590

La sensibilidad de la balanza es de 5 gramos. Las varillas de refuerzo de las vigas 02 y 03 perdieron 5 gramos de masa cada una, debido a la acción generada por los iones cloruro. La masa total de los productos de corrosión fue de 15 gramos, esto indica que las varillas en contacto con la solución contaminante llegaron a perder 5 gramos extras, distribuidos entre ellas.

Vigas sumergidas durante un periodo de cuatro meses

Vigas H ₂ O	Refuerzo	Minicial (gr)	Mfinal (gr)
12	12	590	590
14	14	590	590
18	18	590	590
19	19	590	590
20	20	590	590

Vigas NaCl	Refuerzo	Minicial (gr)	Mfinal (gr)
10	10	590	585
13	13	590	585
15	15	590	585
16	16	595	590
17	17	590	585

Las varillas de refuerzo de las vigas 10, 13, 15, 16 y 17 perdieron 5 gramos de masa cada una, ocasionado por los iones cloruro. La masa total de los productos de corrosión fue de 35 gramos, esto indica que las varillas en contacto con la solución contaminante llegaron a perder 10 gramos extras, distribuidos entre ellas.

4. CONCLUSIONES

- La investigación realizada en este proyecto ha servido para entender mejor el fenómeno de corrosión que afecta gravemente a nuestras estructuras de concreto reforzado, tanto el proceso de deterioro como algunas formas de prevención del mismo.
- En el ensayo a flexión se observaron las primeras fisuras de las vigas en la fibra inferior con mayor esfuerzo a tracción. Estas fisuras se ancharon y se proyectaron por el elemento convirtiéndose en grietas que ocasionaron posteriormente el fallo de los especímenes. La tendencia de la forma de falla en las vigas testigos se reflejó mediante una grieta sobresaliente y aproximadamente vertical ubicada en el centro de luz, mientras que en los elementos contaminados se presentaron dos grietas inclinadas, a lado y lado de su centro.
- La resistencia a flexión de las vigas en contacto con cloruros disminuyó aproximadamente un 14 % para el período de dos meses y un 20 % para el período de cuatro meses de contaminación, comparando esta con la resistencia obtenida de las vigas testigos sumergidas en agua potable.
- Es notable la incidencia que produce el efecto de los iones cloruro al entrar en contacto con la varilla de refuerzo, los cuales atacan la capa pasiva de óxido y generan productos de corrosión, disminuyendo la adherencia entre el acero y el concreto, ocasionando una gran pérdida en el aporte del refuerzo a tensión, y por ende la disminución en la resistencia a flexión de los elementos.

5. RECOMENDACIONES

- Es necesario seguir realizando más investigaciones en este campo, aportando mayor cantidad de datos y aumentando el número de variables, por ejemplo experimentar con mas elementos de diferentes dimensiones y cantidades de acero de refuerzo, así como variar la temperatura y humedad, tratando cada vez mas de modelar el ambiente agresivo al que se exponen nuestras estructuras de concreto reforzado.
- El tiempo de contaminación es un factor de gran importancia, muchas estructuras aun se encuentran en su vida residual y están próximas a la falla, debido a que han estado mucho tiempo en contacto con iones cloruro, por ello recomiendo que los próximos estudios consideren tiempos de contaminación mayores a cuatro meses, para analizar y poder observar con mayores ventajas el proceso de corrosión que va directamente relacionado con el tiempo de exposición.
- Recordar la importancia que tiene la fabricación de los elementos, pues de esto depende toda la investigación posterior. Sería conveniente realizar una sola fundición para la cantidad de elementos en estudio, aunque se que para ello se requiere de un gran apoyo tanto económico como humano, por ello sugiero que estos experimentos sean elaborados por mínimo dos investigadores y espero puedan contar con todo la colaboración de la Escuela de Ingeniería Civil en pro del progreso y la investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◆ [1] VÁSQUEZ QUINTERO CUSTODIO, LUÍS ORLANDO AGUIRRE R., JAIME GARCÍA. Estudio sobre la corrosión y el control de la corrosión por protección catódica en el refuerzo del concreto atacado por cloruros. Universidad Industrial de Santander 1992.
- ◆ [2] VÁSQUEZ QUINTERO CUSTODIO, LUÍS ORLANDO AGUIRRE R., ORLANDO PLATA H. Estudio a nivel de laboratorio del efecto inhibitor del nitrito de calcio en la corrosión de estructuras de concreto armado expuestas a medios conteniendo cloruros. Universidad Industrial de Santander 1994.
- ◆ [3] SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT) INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Cambios en la rigidez y resistencia a la flexión de vigas de concreto dañadas por corrosión del refuerzo. Publicación técnica No 204. Sanfandila, Qro, 2002.
- ◆ [4] MANUAL DE INSPECCIÓN, EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura), del Subprograma XV “Corrosión: Impacto Ambiental sobre Materiales” del Programa CYTED. Río de Janeiro, Abril de 1997.
- ◆ [5] MERRIT, FREDERICK. Manual del Ingeniero Civil. Segunda Edición. Editorial Mc. Graw Hill. México 1993.

- ◆ [6] DURABILIDAD DEL CONCRETO. Asociación Venezolana de productores de cemento Caracas 1974.
- ◆ [7] JORGE I. SEGURA FRANCO. Estructuras de concreto I. Universidad Nacional de Colombia. Sexta edición, 2006.
- ◆ [8] NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR – 98.
- ◆ [9] SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT) INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación técnica No 182. Sanfandila, Qro, 2001.

ANEXOS

VALORES OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE FLEXIÓN PARA CADA UNA DE LAS VIGAS

Vigas sumergidas durante un periodo de dos meses

VIGA 01 SUMERGIDA EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,22
200	0,31
300	0,39
400	0,44
500	0,49
600	0,57
700	0,78
800	1,1
900	1,25
1000	1,45
1100	1,58
1200	1,76
1300	1,92
1400	2,43

VIGA 04 SUMERGIDA EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,12
200	0,26
300	0,37
400	0,47
500	0,58
600	0,64
700	0,76
800	0,98
900	1,27
1000	1,47
1100	1,71
1200	1,92
1300	2,16
1400	2,45

VIGA 07 SUMERGIDA EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,11
200	0,18
300	0,25
400	0,32
500	0,39
600	0,48
700	0,66
800	0,97
900	1,28
1000	1,48
1100	1,65
1200	1,78
1300	1,94
1400	2,1

VIGA 09 SUMERGIDA EN H ₂ O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,25
200	0,33
300	0,41
400	0,47
500	0,54
600	0,58
700	0,63
800	0,68
900	0,78
1000	0,98
1100	1,22
1200	1,45
1300	1,72
1400	2,25

VIGA 11 SUMERGIDA EN H₂O	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,21
200	0,33
300	0,42
400	0,51
500	0,58
600	0,65
700	0,72
800	0,81
900	0,93
1000	1,54
1100	1,88
1200	2,12
1300	2,3
1400	2,57

VIGA 02 SUMERGIDA EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,32
200	0,45
300	0,56
400	0,64
500	0,71
600	0,78
700	0,85
800	0,92
900	1,05
1000	1,22
1100	1,43
1200	1,75

VIGA 03 SUMERGIDA EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,25
200	0,34
300	0,44
400	0,52
500	0,62
600	0,7
700	0,81
800	1,08
900	1,27
1000	1,48
1100	1,72
1200	1,92

VIGA 05 SUMERGIDA EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,18
200	0,28
300	0,36
400	0,44
500	0,52
600	0,6
700	0,78
800	1,05
900	1,28
1000	1,45
1100	1,63
1200	1,85

VIGA 06 SUMERGIDA EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,22
200	0,29
300	0,36
400	0,42
500	0,48
600	0,54
700	0,61
800	0,69
900	0,92
1000	1,18
1100	1,48
1200	1,78

VIGA 08 SUMERGIDA EN NaCl	
P (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,25
200	0,36
300	0,48
400	0,58
500	0,68
600	0,78
700	0,89
800	1,06
900	1,23
1000	1,65
1100	1,88
1200	2,15

Vigas sumergidas durante un periodo de cuatro meses

VIGA 12 SUMERGIDA EN H₂O	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,05
200	0,14
300	0,22
400	0,29
500	0,37
600	0,47
700	0,72
800	0,93
900	1,2
1000	1,41

VIGA 14 SUMERGIDA EN H₂O	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,18
300	0,28
400	0,39
500	0,52
600	0,65
700	0,92
800	1,08
900	1,25
1000	1,42

VIGA 18 SUMERGIDA EN H₂O	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,08
200	0,15
300	0,22
400	0,31
500	0,39
600	0,48
700	0,61
800	0,85
900	1,1
1000	1,31

VIGA 19 SUMERGIDA EN H₂O	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,22
300	0,33
400	0,45
500	0,55
600	0,62
700	0,72
800	0,95
900	1,15
1000	1,35

VIGA 20 SUMERGIDA EN H₂O	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,2
300	0,31
400	0,41
500	0,52
600	0,6
700	0,71
800	0,98
900	1,22
1000	1,41

VIGA 10 SUMERGIDA EN NaCl	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,08
200	0,15
300	0,22
400	0,28
500	0,41
600	0,52
700	0,62
800	0,75

VIGA 13 SUMERGIDA EN NaCl	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,21
300	0,3
400	0,42
500	0,63
600	0,76
700	0,87
800	0,98

VIGA 15 SUMERGIDA EN NaCl	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,21
300	0,3
400	0,39
500	0,52
600	0,59
700	0,67
800	0,78

VIGA 16 SUMERGIDA EN NaCl	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,08
200	0,16
300	0,23
400	0,32
500	0,48
600	0,58
700	0,68
800	0,77

VIGA 17 SUMERGIDA EN NaCl	
F (carga kgf)	Y (mm)
0	0
100	0,1
200	0,18
300	0,27
400	0,37
500	0,58
600	0,72
700	0,81
800	0,92

