

IDENTIFICATION AND ASSESSMENT OF THE RISK OF CORROSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN INDUSTRIAL PLANTS SUBJECTED TO AN ACIDIC ENVIRONMENT

Guerrero Martinez, Joaquin¹; Montoya Villa, Humberto¹; Rodríguez Lopez, Fernando²;
De la Cruz Romero, Marco Antonio²

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, ² Universidad Politécnica de Madrid

The absence of protocols for the identification and assessment of risks related to the corrosion of reinforced concrete structures strongly influence decision making for maintenance or demolition of these structures which affect the useful life of the infrastructure subject to an acid environment.

This research focuses on identifying and building physical factors that affect the corrosion process and evaluation of the structures of the materials that make up the structures and establish metrics, response and control of the levels of risk to the infrastructure is subjected. This research is conducted in industrial plants with processes linked to acidic environments and is sponsored by the CONACYT, the Autonomous University of Coahuila through the department of construction projects and the chair of projects of the UPM to form protocols and criteria to assist in the integration of a framework for making decisions about the provision of use of the structure.

Keywords: *Risk identification; Risk assessment; Corrosion in structures*

IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO EN PLANTAS INDUSTRIALES SOMETIDAS A UN AMBIENTE ÁCIDO

La ausencia de protocolos de identificación y evaluación de los riesgos relacionados a la corrosión de las estructuras de concreto armado impacta fuertemente en la toma de decisiones para el mantenimiento o demolición de estas estructuras que afectan la vida útil de la infraestructura sometidas a un ambiente ácido.

Esta investigación se centra en la identificación de los factores físicos y de construcción que impactan en el proceso de corrosión de las estructuras y evaluación de los materiales que conforman las estructuras y establecer criterios de medición, de respuesta y control de los niveles de riesgo a que está sometida la infraestructura. Esta investigación se desarrolla en las plantas industriales con procesos vinculados a ambientes ácidos y con el patrocinio del CONACYT, la Universidad Autónoma de Coahuila a través de la cátedra de proyectos de construcción y la cátedra de proyectos de la Universidad Politécnica de Madrid para conformar protocolos y criterios que ayuden a la integración de un marco de referencia en la toma de decisiones sobre la disposición de uso de la estructura.

Palabras clave: *Identificación de riesgos; Evaluación del riesgo; Corrosión de estructuras;*

Correspondencia: Calle 21 Número 351. Fraccionamiento Los Álamos Gómez Palacio. Durango, México. CP. 35020

1. Introducción

La corrosión del acero en el concreto es un problema a nivel mundial que causa miles de dólares de pérdidas en reparación para mantener la funcionalidad de la infraestructura. El riesgo potencial de la corrosión en las estructuras es muy impredecible, por lo que su monitoreo, predicción, prevención y rehabilitación del daño del acero por corrosión en estructuras de concreto ha sido una importante área de interés en la investigación (Song & Shayan, 1998). El presente documento propone una metodología que permita identificar, medir, analizar y evaluar los riesgos, sus factores físicos y constructivos relacionados a la corrosión en las estructuras de concreto armado, para corregir, prevenir y controlar posibles daños.

La corrosión es una reacción termodinámicamente espontánea e inevitable de los metales, la cual es adversa en el proceso de producción de los mismos. La mayoría de los metales, especialmente los aceros, son altamente susceptibles al fenómeno de la corrosión y su grado de afectación depende de las propiedades de la aleación de acero y del medio ambiente al que está sometido. La corrosión en los aceros es inevitable y solo puede ser retardada por medio de medidas especiales como la prevención por métodos protectores. (Song & Shayan, 1998).

El acero de refuerzo en el concreto armado fue considerado por muchos años como un material que no podía ser corroído debido a la alta alcalinidad de la mezcla en el concreto y una capa protectora ante agentes corrosivos del medio ambiente. Sin embargo, con el paso del tiempo, esta consideración ha sido descartada debido a que se han encontrado miles de estructuras de concreto prematuramente dañadas por corrosión en el acero de refuerzo.

La ausencia de protocolos para la identificación y evaluación de estructuras de concreto armado sometidas a ambientes ácidos y corrosivos en las plantas industriales de proceso en la región norte de México, permite justificar la realización de un marco de referencia, que permita al profesional vinculado a la construcción de estos elementos, poder identificar, medir, analizar, mitigar, responder y controlar los riesgos en estas estructuras.

La corrosión en el concreto armado es un problema que no solo afecta la integridad estructural, sino también, compromete la resistencia de los elementos, esto debido a que la permeabilidad favorece la generación de la corrosión, reducción de los espesores de las armaduras y fallas por agrietamiento. El carecer de un protocolo estándar para determinar el grado de riesgo estructural y de seguridad alcanzado en estos casos, dificulta la toma de decisiones y la elaboración de un diagnóstico en profundidad de la estructura.

En condiciones normales, el concreto (de recubrimiento) provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad ($\text{pH} > 12,5$) hace que el acero se encuentre en un estado denominado pasivo, siendo su velocidad de corrosión despreciable. No obstante, la presencia de agentes agresivos (cloruros, sulfatos y dióxido de carbono (CO_2)) en la superficie de las armaduras causan la pérdida de pasividad del acero y crea condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras. (Vico, Morris & Vázquez, 2002).

Para categorizar el grado de riesgo que sufre una estructura de concreto armado afectada por la corrosión del acero de refuerzo y establecer la agresividad de este ataque, es necesario identificar los factores desencadenantes en las fases de construcción y operación (calidad, supervisión y control).

2. Objetivo

Desarrollar un protocolo que tenga como base un marco de referencia técnico para identificar y evaluar el riesgo que causan los efectos de la corrosión en estructuras de

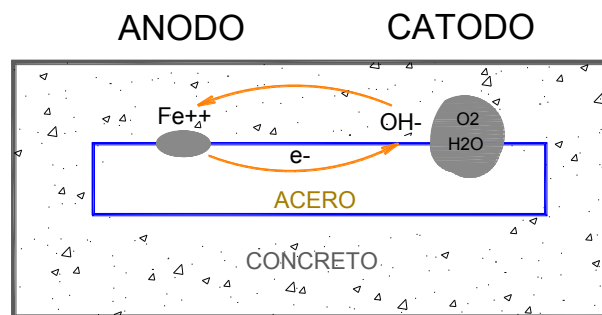
concreto armado en plantas industriales de la región norte de México, considerando metodologías de identificación, medición, análisis, evaluación, respuesta, control y logística del riesgo. Aplicando los criterios de modo de falla y efecto o FMEA (Failure of Mode and Effect Analysis) usado en la industria automotriz, se categoriza el riesgo mediante un índice denominado Número de Prioridad de Riesgo (RPN Risk Priority Number), aplicado a las partes críticas de un producto o proceso, ponderando los niveles de riesgo como muy alto, alto medio, moderado y bajo.

3. Metodología

3.1. Proceso de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto, es un fenómeno electroquímico que requiere un flujo eléctrico y algunas reacciones químicas para su desarrollo. Los tres elementos principales del proceso son el ánodo, el cátodo y la solución electrolítica presentes en la estructura, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Corrosión en estructuras de concreto armado



El ánodo y el cátodo pueden estar presentes en la misma barra de acero de refuerzo o en barras adyacentes del armado. El ánodo es la localización donde la corrosión toma lugar y el elemento metálico, en éste caso el hierro, sufre una reacción de oxidación o reacción anódica debido a la pérdida de electrones, creando iones de hierro (Fe^{++}). El cátodo es la localización donde el hierro no es consumido debido a que el oxígeno, en presencia de agua, acepta electrones (reducción) formando iones hidroxilos (OH^-).

La solución electrolítica es el medio que facilita el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo, en consecuencia, en el caso del concreto, al ser expuesto a altos ciclos de humedad se crea una conductividad suficiente para que funcione como un electrolito.

La iniciación y continuación del proceso de corrosión son controladas por el medio ambiente del concreto de recubrimiento del acero de refuerzo. El concreto es alcalino debido a la presencia de $Ca(OH)_2$, KOH y $NaOH$ con un rango de alcalinidad de 12 a 13. Debido a la alta alcalinidad del agua intersticial en el concreto, el acero de refuerzo es pasivo debido a la capa de óxido (Fe_2O_3) formada por la oxidación de hidróxido de Hierro ($Fe(OH)_2$) en presencia de oxígeno y agua, reduciendo la velocidad de la corrosión. Para que la corrosión ocurra, la capa pasiva del acero de refuerzo necesita ser destruida, lo cual ocurre cuando se combina la presencia de oxígeno, agua y agentes agresivos como los cloruros, aumentando la conductividad y disminuyendo la resistividad del concreto.

Básicamente son dos las causas principales que pueden dar lugar a la destrucción de la película pasiva del acero e iniciar la corrosión de las estructuras. Estas son la presencia de iones cloruro y la carbonatación.

3.2. Variables que Influyen en la Corrosión

La corrosión es un fenómeno complejo donde interactúan diferentes variables interdependientes que contribuyen de manera sistémica al proceso. Para evaluar los riesgos de la corrosión en las estructuras de concreto armado, se debe iniciar con la identificación de los factores que se pueden presentar en las fases de diseño, proceso constructivo, operación y mantenimiento de la estructura.

La corrosión puede ser desencadenada por iones cloruro presentes en la superficie del acero con una concentración crítica de 0,4 % (en peso) respecto al contenido de cemento en el concreto. Siendo éstos los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas al ambiente ácido y en estructuras construidas con materiales contaminados, los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros y en el segundo se incorporan al concreto como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.).

La corrosión iniciada por carbonatación, es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del concreto. Como resultado, el pH del concreto carbonatado se reduce a valores menores que 9. Una vez que la carbonatación alcanza el acero de refuerzo, comienza la disolución de la película pasiva que protege el acero.

La permeabilidad es el factor que principalmente determina la porosidad del concreto y la distribución de los tamaños de poro. Los poros facilitan el ingreso de elementos como Cl, CO_2 , O_2 , H_2O y algunos otros agentes agresivos del medio ambiente que favorecen el inicio y progreso de la corrosión. La permeabilidad del concreto está estrechamente relacionada a la relación agua cemento (A/C), por lo tanto, la permeabilidad del concreto se incrementa con el aumento de la relación A/C, especialmente cuando $A/C > 0,55$ (Guirguis, Cao & Bawja, 1994). En algunos casos la permeabilidad puede variar hasta dos veces cuando la relación A/C se incrementa de 0,4 a 0,7 (Cook 1951). Aditivos minerales mejoran la resistencia del concreto al agua ácida, agua con sulfatos y agua de mar, principalmente debido a la reacción puzolánica que causa el refinamiento de los poros reduciendo la permeabilidad del concreto.

El proceso de hidratación del cemento también contribuye a la porosidad y la permeabilidad del concreto, en algunos casos, por ejemplo, la porosidad cambia de 29% a los 40 días de curado a 25,8% a los 296 días. (Burchler, Elsener & Bohni, 1996).

La humedad del concreto favorece la penetración y disolución de los agentes agresivos y proporciona el vehículo para que la corrosión avance. Por otro lado, el recubrimiento del concreto sobre la armadura provee una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el medio ambiente exterior. Su eficiencia depende fundamentalmente de dos factores: el espesor del recubrimiento (ER), el cual se recomienda para ambiente ácido un mínimo de 5 cm, además de un diseño de la mezcla con una baja relación agua-cemento (A/C) lo que genera un ambiente propicio para un concreto de buena calidad en éste ambiente.

La presencia de humedad contribuye de manera importante al progreso de la corrosión incrementando la reacción anódica (oxidación) y disminuyendo la reacción catódica (reducción). Tuutti (1982) encontró que para la corrosión por cloruros inducidos presentó un máximo nivel de corrosión a una humedad relativa del 95% y para la carbonatación inducida una humedad relativa de 85%.

La absorción de agua en el concreto desde el ambiente exterior puede incrementar rápidamente la velocidad de corrosión en el acero hasta generar fracturas y laminación.

La tendencia de cualquier metal para reaccionar en un ambiente se indica por el potencial eléctrico que se desarrolla en contacto con el medio ambiente. En estructuras de concreto armado, éste actúa como un electrolito y el acero de refuerzo desarrolla un potencial dependiendo del entorno del concreto, que puede variar de un lugar a otro.

El proceso de corrosión del acero del concreto puede ser monitoreado con la medición del potencial eléctrico mediante el procedimiento conforme a ASTM C876 Método de Prueba Estándar para Medición del Potencial de Celda Media del Acero de Refuerzo en el Concreto. El principio de esta técnica es esencialmente la medición del potencial de corrosión de las barras de refuerzo con respecto a un electrodo de referencia estándar, tales como electrodo de calomelanos saturado (SCE), electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE) o electrodo de plata/cloruro de plata. Según la norma ASTM C876, la probabilidad de corrosión del acero se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Condición de la corrosión de acuerdo al potencial eléctrico (ASTMC876-91 1999)

Valores de Potencial Eléctrico ASTM C876		Condición de la Corrosión
(mV vs SCE)	(mV vs CSE)	
< - 476	< -500	Corrosión Severa
< -276	< -350	Alta (< 90% de Riesgo de Corrosión)
-126 a -275	-350 a -200	Riesgo Intermedio de Corrosión
> -125	> -200	Bajo (10% de Riesgo de Corrosión)

Nota: Esta técnica es cualitativa, informa sobre el riesgo de corrosión, pero no su actividad real.

La resistividad eléctrica del concreto (Ohm.cm) es un parámetro importante para determinar la intensidad del proceso de corrosión inicial. El concreto con una alta resistividad eléctrica, ocasionará un proceso de corrosión lento en comparación con los concretos de baja resistividad en la que la corriente puede pasar fácilmente entre las zonas del ánodo al cátodo. La resistividad es fuertemente dependiente de la calidad del concreto y de las condiciones de exposición, tales como la humedad relativa y la temperatura, las cuales afectan el grado de saturación de los poros del concreto y por lo tanto los valores de resistividad.

La resistividad eléctrica del concreto se utiliza de manera indirecta para evaluar la difusividad de iones cloruro, el grado de saturación del concreto y su agresividad (Berke, Hicks & Chaker, 1992) (Andrade et al. 2000). Este parámetro también puede proporcionar información útil sobre el comportamiento de la corrosión de barras de refuerzo en el concreto. La medición de la resistividad es una medida adicional útil para ayudar en la identificación de áreas problemáticas o confirmar las preocupaciones sobre la mala calidad del concreto. La Tabla 2 indica los criterios para medir la severidad de la corrosión en el acero considerando la resistividad en el concreto. La resistividad del concreto influye en la eficacia y durabilidad de la protección catódica (CP) de las estructuras (Hunkeler 1992). Del mismo modo es importante para la eliminación de la electroquímica de cloruros y la realcalinización (Polder & Hondel, 1992).

Tabla 2. Grado de corrosión por resistividad eléctrica (ρ)

Resistividad (Ohm.cm)	Riesgo de Corrosión
>20 000	Despreciable
10 000 a 20 000	Bajo
5 000 a 10 000	Alta
Menos de 5 000	Muy Alto

Fuente: Brown (1992). Durability of Building Materials

La densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), es otro parámetro que permite una evaluación precisa del estado de las estructuras de concreto armado. Por medio de la técnica de medición de resistencia de polarización lineal (LPR) el acero de refuerzo es perturbado por una pequeña cantidad de su potencial de equilibrio. Esto se puede lograr cambiando el potencial del acero de refuerzo en una cantidad fija, ΔE , y observar la caída de corriente, ΔI , después de un tiempo establecido. La resistencia de polarización, R_p , del acero se calcula entonces a partir de la ecuación: $R_p = \Delta E / \Delta I$ del cual la corriente de corrosión es $I_{corr} = B / R_p$, donde B es la constante de Stern-Geary con valores de 25 mV para el acero activo y 50 mV para el acero pasivo (Gowers et al. 1994).

Los siguientes criterios generales para la corrosión que se han desarrollado a partir de investigaciones de campo y de laboratorio (Andrade, Alonso & González, 1990) se dan en la Tabla 3 y 4. Estas mediciones se ven afectadas por la temperatura y la humedad, por lo que las condiciones en el momento de la medición afectan a la interpretación de los límites definidos en la tabla. Las mediciones deben ser consideradas con una precisión de un factor de dos. Se ha trabajado en la correlación de I_{corr} con la pérdida de sección del acero de refuerzo y el tiempo de servicio.

Tabla 3. Corrosión del refuerzo por densidad de corriente para estructuras en operación

Corriente de Corrosión (I_{corr})	Corrosión en Refuerzo
$I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasiva
$I_{corr} 0,1 - 0,5 \mu A/cm^2$	Baja a Moderada
$I_{corr} 0,5 - 1,0 \mu A/cm^2$	Moderada a Alta
$I_{corr} > 1,0 \mu A/cm^2$	Alta

Tabla 4. Corrosión del refuerzo por densidad de corriente para estructuras nuevas

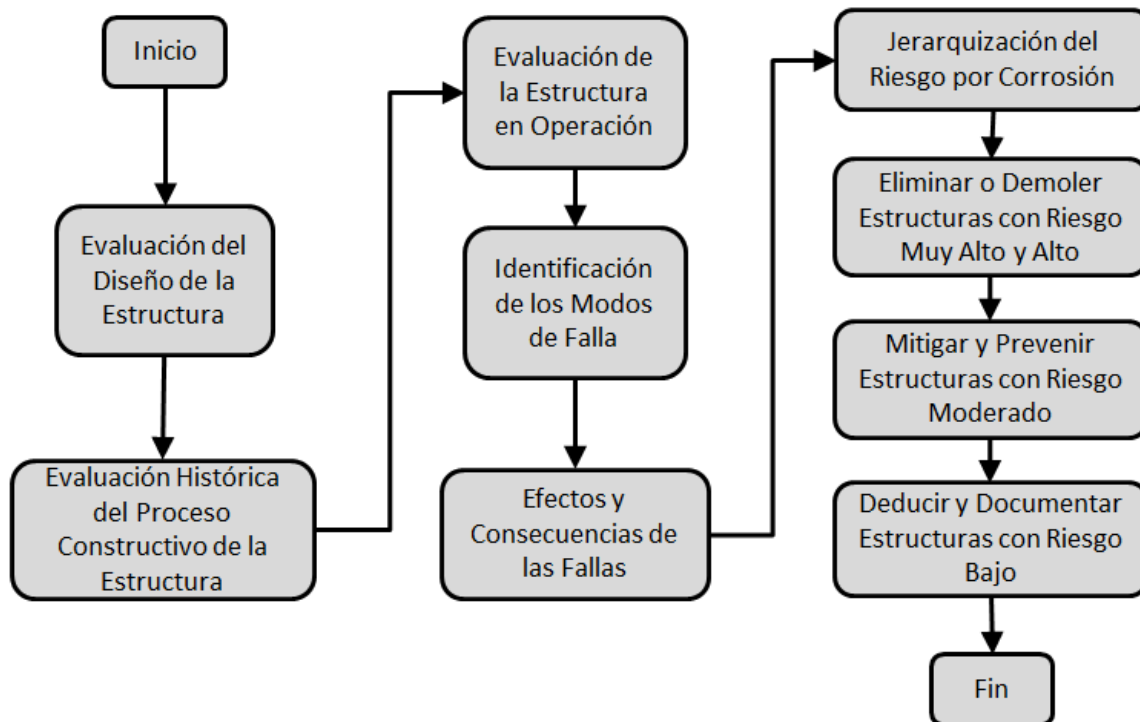
Corriente de Corrosión (I_{corr})	Corrosión en Refuerzo
$I_{corr} < 0,2 \mu A/cm^2$	Corrosión No Esperada
$I_{corr} 0,2 - 1 \mu A/cm^2$	Corrosión en 10-15 años
$I_{corr} 1 - 10 \mu A/cm^2$	Corrosión en 2-10 años
$I_{corr} > 10 \mu A/cm^2$	Corrosión en 2 años o menos

3.3 Análisis FMEA para la Identificación y Evaluación del Riesgo de Corrosión

Un análisis de modo de falla y efecto (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis) es un grupo sistémico de actividades con la intención de identificar y evaluar la falla potencial de un producto o proceso, identificar acciones que pueden eliminar o reducir la potencial falla y documentar el proceso (McDermott, Mikulak & Beauregard, 1996). El diagrama en la Figura

2 muestra el proceso general para desarrollar un análisis FMEA aplicado a la evaluación del riesgo de la corrosión en estructuras de concreto.

Figura 2. Diagrama de evaluación de modo de falla y efecto por corrosión



4. Resultados

Los resultados en esta etapa de la investigación están centrados en la propuesta para la identificación y evaluación del riesgo por corrosión de las estructuras de concreto armado.

4.1. Evaluación del Diseño de la Estructura

Esta etapa considera la revisión y análisis de planos, especificaciones, memorias de cálculo, etc., para encontrar posibles fallas en el diseño de la estructura que puedan desencadenar o favorecer un proceso corrosivo en algún elemento estructural. Entre algunas de las variables que se deben considerar están el tipo de cemento y agregados, relaciones agua cemento (A/C), porosidad y permeabilidad del concreto, espesor de la capa de concreto de recubrimiento, revisión de estructuras con esfuerzo alto y concentración permitida de cloruros. Cabe mencionar que es en esta etapa inicial donde el personal que participa en el proceso debe asimilar la metodología y entender la funcionalidad de la estructura para poder emitir algún juicio en las etapas sucesivas.

4.2. Revisión Histórica del Proceso Constructivo

Esta etapa considera la revisión y análisis de bitácoras, procedimientos constructivos, controles e informes de supervisión, para encontrar posibles fallas durante el proceso constructivo de la estructura y puedan contribuir a la identificación y evaluación de la corrosión, así como permitir la categorización del riesgo y la toma de decisiones.

4.3. Análisis de la Estructura en Operación

En esta etapa se analizan las condiciones físicas en que opera la estructura para determinar el grado de riesgo de corrosión. Entre los factores a analizar están, la coloración, la exposición a atmósferas con alto contenido de humedad, cloruros, dióxido de carbono y ácidos, fisuras, agrietamiento y laminación del concreto, exposición del acero de refuerzo al medio ambiente, tipos de cargas en la estructura, recubrimientos anticorrosivos, acumulaciones y filtraciones de agua.

4.4. Identificación de los Modos de Falla

Un modo de falla podemos definirlo como la forma en que la estructura o parte de esta pierde la capacidad de desempeñar su función, o en otras palabras, la forma en que falla (Flexión, Corte y Torsión). Para el análisis del riesgo de la corrosión en estructuras de concreto se proponen 8 modos de falla importantes los cuales se enlistan en la Tabla 5.

Tabla 5. Modos de falla por corrosión en estructuras de concreto

1.	Alta permeabilidad del concreto
2.	Pérdida de alcalinidad del concreto
3.	Pérdida de pasividad del acero de refuerzo. Ph < 9
4.	Pérdida de adherencia del concreto de recubrimiento en el acero
5.	Agrietamiento y laminación del concreto de recubrimiento
6.	Aumento de la permeabilidad en el concreto
7.	Pérdida del tamaño de sección del acero de refuerzo
8.	Aumento del esfuerzo de tensión en elementos estructurales

Fuente: Cátedra de proyectos de construcción (2014)

4.5. Efectos y Consecuencias de las Fallas

Los efectos de las fallas son considerados como la forma en que estas se manifiestan en la estructura y sus componentes. Las consecuencias son referidas a los impactos técnicos, de construcción y económicos de interés de las partes vinculadas al proceso. La Tabla 6 muestra los efectos de las fallas indicadas en la Tabla 5.

Tabla 6: Efectos de las fallas por corrosión en estructuras de concreto

	Modos de Falla	Efecto
1	Alta permeabilidad del concreto	Penetración de agentes que favorecen la corrosión como Cl, CO ₂ , O ₂ , H ₂ O. Aumento de la conductividad y disminución de la resistividad.
2	Pérdida de alcalinidad del concreto	Pérdida de pasividad en el acero de refuerzo debido al rompimiento de la capa de Fe ₂ O ₃ .
3	Pérdida de pasividad del acero de refuerzo. Ph < 9	Pérdida de adherencia del concreto de recubrimiento en acero.
4	Pérdida de adherencia del concreto de recubrimiento en acero	Desprendimiento del acero de refuerzo del concreto e iniciación de la corrosión por reacción anódica (oxidación).
5	Agrietamiento y laminación del concreto de recubrimiento	Aumento de la Penetración y Concentración de Cloruros y CO ₂ .

6	Aumento de la permeabilidad en el concreto	Aumento de la Penetración y Concentración de Cloruros y CO ₂
7	Pérdida del Tamaño de Sección del Acero de Refuerzo	Aumento del Esfuerzo de Tensión en el Acero
8	Aumento del Esfuerzo de Tensión en Elementos Estructurales	Aumento del Esfuerzo de Tensión en el Acero

Fuente: Cátedra de proyectos de construcción (2014)

4.6. Jerarquización del Riesgo de la Corrosión

Un análisis de modo de falla y efecto (FMEA) permite categorizar mediante un índice de grado de riesgo o RPN (Risk Priority Number) las partes críticas de un producto o proceso, ponderando los niveles de riesgo como muy alto, alto, moderado y bajo. Para determinar este índice, es necesario considerar tres aspectos del elemento o etapa del proceso: la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad. La severidad, es el grado de deterioro o falla que presenta la parte evaluada; la ocurrencia consiste en la frecuencia con que se presenta y la detectabilidad es la facilidad de identificar mediante algún método de medición el defecto o problema (AIAG 1990). Cada aspecto debe ser ponderado con un valor de 1 al 10, considerando que un valor de 10 equivale a un riesgo muy alto. Para determinar el índice de riesgo o RPN es necesario evaluar la ecuación:

$$RPN = S \times O \times D. \quad (1)$$

En la ecuación 1, la severidad de la corrosión (S) en estructuras de concreto se debe determinar con criterios estandarizados de ponderación, proponiendo valores del 1 al 10 mostrados en la Tabla 7. Antes de asignar un nivel de severidad de la tabla 7, se propone definir un rango del nivel de severidad de manera preliminar usando las tablas 8, 9, 10 y 11 las cuales son complemento de las tablas 1, 2, 3 y 4 respectivamente, donde se agregan los rangos de severidad en la columna denominada "Ponderación FMEA". La medición de los parámetros de resistividad, potencial eléctrico o corriente de corrosión contribuyen a evaluar de manera más objetiva la condición, el avance y el riesgo de corrosión en la estructura.

Tabla 7. Criterios de severidad de las fallas por corrosión en estructuras de concreto

Efecto	Nivel de Severidad	Criterio
Ninguno	1	Sin efecto de corrosión en la estructura
Despreciable	2	Efecto despreciable de corrosión en la estructura
Mínimo	3	Efecto mínimo de corrosión pero sin afectar el desempeño de la estructura.
Menor	4	Efecto menor en el desempeño de la estructura.
Moderado	5	Efecto moderado en el desempeño de la estructura.
Significativo	6	El desempeño de la estructura se ve afectado, pero es operable. Falla parcial en alguna parte de la estructura.
Mayor	7	El desempeño de la estructura se ve seriamente afectado pero es operable y necesita reparación y mantenimiento.
Extremo	8	Estructura inoperable pero sin riesgos de colapso. El 100% de las partes afectadas deben ser reparadas, incrementando costos por mantenimiento.
Serio	9	Efecto de peligro potencial con alto riesgo de colapso.

Peligro	10	Efecto de peligro potencial. Seguridad relacionada: Falla repentina.
---------	----	--

Tabla 8. Ponderación del riesgo de corrosión en base a la resistividad (ρ)

Resistividad (Ohm.cm)	Riesgo de Corrosión	Ponderación FMEA
> 20 000	Despreciable	1 al 3
10 000 a 20 000	Bajo	4 al 6
5 000 a 10 000	Alta	7 al 9
Menos de 5 000	Muy Alto	10

Tabla 9. Ponderación de la condición de la corrosión en base al potencial eléctrico (V)

Valores de Potencial Eléctrico ASTM C876		Condición de la Corrosión	Ponderación FMEA
(mV vs SCE)	(mV vs CSE)		
< - 476	< -500	Corrosión Severa	10
< - 276	< -350	Alta (< 90% de Riesgo de Corrosión)	7 al 9
-126 a - 275	-350 a -200	Riesgo Intermedio de Corrosión	4 al 6
> - 125	> -200	Bajo (10% de Riesgo de Corrosión)	1 al 3

Tabla 10. Ponderación de la condición de la corrosión en acero de refuerzo en base a la corriente para estructuras en operación (I_{corr})

Corriente de Corrosión (I_{corr})	Corrosión en Refuerzo	Ponderación FMEA
$I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasiva	1 al 3
$I_{corr} 0,1 - 0,5 \mu A/cm^2$	Baja a Moderada	4 al 6
$I_{corr} 0,5 - 1,0 \mu A/cm^2$	Moderada a Alta	7 al 9
$I_{corr} > 1,0 \mu A/cm^2$	Alta	10

Tabla 11. Ponderación de la condición de la corrosión en acero de refuerzo en base a la corriente para estructuras nuevas (I_{corr})

Corriente de Corrosión (I_{corr})	Corrosión en Refuerzo	Ponderación FMEA
$I_{corr} < 0,2 \mu A/cm^2$	Corrosión No Esperada	1 al 3
$I_{corr} 0,2 - 1 \mu A/cm^2$	Corrosión en 10-15 años	4 al 6
$I_{corr} 1 - 10 \mu A/cm^2$	Corrosión en 2-10 años	7 al 9
$I_{corr} > 10 \mu A/cm^2$	Corrosión en 2 años o menos	10

La ponderación de la severidad se podrá determinar por cualquiera de los criterios indicados en las Tablas 8, 9, 10 y 11, considerando de mayor importancia el que proporciona el estado cuantitativo de la corrosión del acero de refuerzo.

La ocurrencia (O) es otro de los factores de la ecuación 1 que consiste en evaluar la estructura estableciendo la probabilidad de que se presente la falla por corrosión. Los valores de ponderación serán determinados de acuerdo a los criterios mostrados en la Tabla

12 y considerando la información del diseño, el proceso constructivo y la operación de la estructura revisados previamente por el equipo multidisciplinario.

Tabla 12. Ocurrencia de la falla en la estructura

Ocurrencia	Rango	Criterios
Muy Remota	1	Falla improbable por corrosión. No existen otras fallas asociadas con este tipo de defecto.
Remota	2	Fallas aisladas por corrosión asociadas con este tipo de defecto.
Baja	3	Baja probabilidad de que se presenten fallas por corrosión por éste defecto.
Moderada	4, 5, 6	Se han presentado fallas por corrosión ocasionales asociadas con éste defecto.
Alta	7, 8	Se han presentado fallas por corrosión frecuentemente asociadas con éste defecto.
Muy Alta	9, 10	La falla por corrosión es casi inevitable asociada a éste defecto.

El tercer factor involucrado en el cálculo del RPN es la detectabilidad (D), la cual consiste en evaluar la facilidad de identificar mediante algún método de medición la falla relacionada a la corrosión que se presenta en la estructura. La Tabla 13 muestra el criterio de ponderación donde el '1' indicará alta probabilidad de que la falla se pueda detectar y el '10' indica que es improbable detectarla.

Para seleccionar el valor de ponderación mostrado en la Tabla 13 es necesario considerar aspectos como la disponibilidad de equipo, personal, procedimientos y controles adecuados para la inspección de las variables involucradas en el modo de falla.

Tabla 13. Detectabilidad de la falla en la estructura

Probabilidad	Rango	Criterio	Probabilidad de detección de la falla
Alta	1	El defecto en la estructura es una característica funcionalmente obvia.	99.99%
Medianamente Alta	2-5	Es muy probable detectar la falla. El defecto es una característica obvia.	99%-85%
Baja	6-8	El defecto es una característica fácilmente identificable.	80%-60%
Muy Baja	9	No es fácil detectar la falla por métodos usuales o pruebas manuales. El defecto es una característica oculta o intermitente.	50%
Improbable	10	El elemento estructural no se puede inspeccionar fácilmente.	Menor a 50%

Una vez determinadas las ponderaciones de la severidad, ocurrencia y detectabilidad, se calcula el Índice de Prioridad de Riesgo (RPN) de acuerdo a la ecuación $RPN = S \times O \times D$, y se categoriza el riesgo de acuerdo a los criterios de la Tabla 14.

Tabla 14. Criterios para evaluar nivel de riesgo y toma de decisiones

Grado de Riesgo	Rango (RPN)	Decisión
Riesgo Muy Alto	500 - 1 000	Eliminar o Demoler
Riesgo Alto	201-500	Eliminar o Demoler
Riesgo Moderado	101-200	Mitigar y Prevenir
Riesgo Bajo	0-100	Deducir y Documentar

4.7. Eliminar, Mitigar, Prevenir y Documentar los Riesgos por Corrosión

El beneficio más importante del análisis FMEA es el aprovechamiento de los niveles de riesgo para tomar la decisión más correcta entre eliminar, mitigar y prevenir, o deducir y documentar la corrosión en estructuras de concreto armado. Una vez evaluado el riesgo, es necesario documentar las acciones correctivas o preventivas incluyendo fechas compromiso de implementación y responsables de la ejecución de la acción recomendada.

5. Conclusiones

Existen metodologías que permiten evaluar el grado de corrosión en otras áreas de la ingeniería como la automotriz, así mismo, organismos internacionales (FERMA, PMI, CIRIA) que establecen criterios de identificación de riesgos en diversas áreas de la ingeniería. El problema que nos presenta la identificación y la evaluación de los riesgos de la corrosión en las estructuras de concreto se centra en la práctica deficiente en la construcción de las estructuras de concreto al no cumplir con las especificaciones de calidad de los materiales, las relaciones agua-cemento, las propiedades de porosidad y permeabilidad del concreto y el espesor de recubrimiento que vienen indicadas por las especificaciones en cada proyecto, generando la corrosión en las estructuras y manifestándose esta con efectos de coloración, fisuras, agrietamiento, desprendimiento de materiales, disminución de la sección de acero y el aumento de los esfuerzos de tensión. Ante este escenario se propone considerar la aplicación de un FMEA que tenga como base los criterios de falla y efecto para la identificación y evaluación del riesgo de la corrosión en estructuras de concreto.

6. Referencias

- AIAG, (1998), Chrysler, Ford & General Motors, Quality System Requirements, QS-9000, third edition (Southfield, MI: AIAG, 1998).
- Andrade, C., & Alonso, C., & Goñi, S. in: Dhir, R. K., Roderick J. M. (Eds.) (2000). *Proceedings of Conference Concrete 2000, Scotland, UK, 1993, p. 1639.*
- Andrade, C., & Alonso M.C., & González, J. A. (1990). *An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete, ASTM STP 1065, N.S.Berke et al. editors. ASTM, Philadelphia 1990. 29-37.*
- ASTM C876-91(1999) Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.
- Berke, N. S., Hicks, M. in: V. Chaker (Ed.), (1992). *Corrosion forms and control for infrastructure, V. Chaker editor, ASTM STP 1137, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1992 p. 207.*
- Browne, R.D. (1992) *Durability of Building Materials, 1 (1982) 113.*
- Burchler, D., & Elsener, B., & Bohni, H. (1996). *Electrical resistivity and dielectric properties of hardened cement paste and mortar, in: C.I. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg. (ed.), Corrosion of Reinforcement In Concrete Construction, pp. 283 (The Royal Society of Chemistry. Thomas Gram House, Science Park, Cambridge).*
- Cook, M. K. (1951), *Permeability test of lean mass concrete, Proc. ASTM. Vol. 51, pp.1.156*

- Gowers, K.R., Millard S.G., Gill, J.S. & R.P. Gill. (1994) *Brit Corr J* 29 (1994) 25
- Guirguis, S., & Cao H. T., & Bawja D. (1994), *Minimising corrosion of steel reinforcement-implementation of research into practice*, in: *3rd. International Conference- "Durability of Concrete"*, pp. 263 (France, SP-145-14).
- Hunkeler, F. (1992). *The essentials for reinforced concrete monitoring, particular emphasis on cathodic protection onset and future responses. Conference on structural improvement through corrosion protection of reinforced concrete, Institute of Corrosion, 2-3 June, London, 1992.*
- McDermott, R.E., Mikulak R.J. & Beauregard, M.R. (1996) *The Basics of FMEA* (New York: Quality Resources).
- Polder, R. B., & Hondel, A. J. V. (1992). *Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete; state of the art, laboratory and field experience. In: D Ho, F. Collins editors. Proc. RILEM, International conference on rehabilitation of concrete structures, Melbourne, 1992:135-148.*
- Song, G., & Shayan, A. (1998). *Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction.*
- Tuutti, K. (1982), *Corrosion of Steel In Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, report F04, 468.*
- Vico, A., Morris, W., & Vázquez, M. (2002), *Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón.*