

Valuación de corrosión e incrustaciones en instalaciones hidráulicas de una planta de potabilización en el estado Bolívar, Venezuela

Víctor Mora Arellano¹ & Jorge Luis Cedeño^{2*}

En instalaciones hidráulicas se presenta corrosión en materiales metálicos (válvulas, bombas y tuberías), y en los elementos rígidos (concreto armado), al ser susceptibles al ataque destructivo considerado factor de importancia para la duración de la infraestructura. Dada esa situación, esta investigación tuvo como objetivo realizar una valuación de la corrosión e incrustaciones a las instalaciones hidráulicas de la planta de Potabilización "Angostura" Ciudad Bolívar, estado Bolívar. La investigación fue del tipo descriptiva y analítica, obteniéndose 16 fotos de los especímenes rígidos y metálicos con fallas de corrosión e incrustaciones, realizándose una descripción cualitativa. Los estados de corrosión e incrustaciones fueron determinados considerando los deterioros unitarios y probabilidades de operaciones de los especímenes metálicos y rígidos. La conclusión fue que los productos de corrosión observados en las superficies externas de los especímenes metálicos son causados por el medio atmosférico, agua (cruda, sedimentada y filtrada), reactivos químicos (sulfato de aluminio, cal hidratada y gas cloro) usados en el proceso. Los productos observados de reblandecimiento, desportillamiento y desintegración en especímenes de concreto armado son efectos multifactoriales de los procesos de: carbonatación, influencia del ión cloruro y oxidación biológica. El máximo deterioro unitario en los especímenes rígidos es 3,43 por ciento anual y en los especímenes metálicos es 3,26 por ciento anual. La probabilidad mayor de operación máxima para los elementos rígidos se ubica en 109,24 años y para los elementos metálicos se sitúa en 81,15 años.

Palabras claves: Planta de potabilización, corrosión, incrustación, probabilidad de operación.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es el de corrosión en los materiales metálicos (válvulas, bombas y tuberías), produciéndose perforaciones y obstrucciones de las líneas de agua. (Lane, 1995). También, las estructuras de concreto son susceptibles de sufrir agresiones por mecanismos fisicoquímicos (oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas), y biológicos donde la corrosión es el elemento de ataque destructivo, la cual se manifiesta bajo tres aspectos. 1) Sobre el acero, con disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica. 2) Sobre el concreto, debido a la generación de óxidos expansivos en la interfase acero

- concreto, provocando fisuras y desprendimientos. 3) Sobre la adherencia acero/concreto (CYTED, 1997).

En Venezuela, se han realizado investigaciones sobre el comportamiento de estructuras metálicas embebidas en concreto, corrosión en general y protección, diagnóstico, cuantificación y caracterización del fenómeno de erosión / corrosión en instalaciones de explotación, producción y refinación de petróleo y gas, química y petroquímica, alimentos, siderúrgica, papelería e industria eléctrica.

Por ejemplo, Linares & Sánchez (2003), describen la construcción, puesta en funcionamiento y operación de un equipo que permite controlar las variables operacionales que afectan el fenómeno de la carbonatación en especímenes rígidos (concreto armado). De Romero *et al.* (2005), obtuvieron resultados valiosos, tanto desde el punto de vista de corrosión como de costos, que permiten

¹ Escuela Ciencias de la Salud. UDO, estado Bolívar, Venezuela.

² Escuela Ingeniería y Ciencias Aplicadas. UDO, estado Anzoátegui, Venezuela. Dirección Postal 8001.

*Autor de correspondencia: corrosiviti@yahoo.com

posteriormente desarrollar un modelo matemático computarizado, donde se consideran las variables esenciales asociadas a los problemas y métodos de control de la corrosión, pero en la literatura consultada no se encontraron referencias que confirmaran la valuación sobre corrosión de los materiales metálicos y rígidos en las operaciones y procesos unitarios de las instalaciones hidráulicas.

En lo que respecta a las operaciones y procesos unitarios del tratamiento del agua cruda proveniente del río Orinoco, de planta “Angostura” ubicada en Ciudad Bolívar, se adapta el esquema de Kemmer & McCallion (1998), quienes incluyen: captación, tratamiento primario (coagulación y mezclado, floculación y sedimentación), tratamiento secundario (filtración), desinfección y bombeo a la red de distribución agua potable (Fig. 1).

Considerando que es importante realizar investigaciones sobre corrosión en instalaciones hidráulicas, a fin de disponer de datos e información que permita conocer las cualidades corrosivas e incrustantes causadas por el agua y agentes agresivos en especímenes rígidos y metálicos; determinándose

así las posibilidades de operación (vida útil + vida residual), mantenimiento y/o reemplazo final de los especímenes que justifiquen durabilidad, costos y calidad, el presente trabajo tiene como objetivo general realizar una valuación de la corrosión e incrustaciones a las instalaciones hidráulicas de la planta de Potabilización “Angostura”, para lo cual se han diseñado los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar análisis visual de las cualidades de los estados de corrosión e incrustaciones de los especímenes metálicos y rígidos que conforman las instalaciones hidráulicas.
2. Determinar cuantitativamente los estados de corrosión e incrustaciones, basados en los deterioros unitarios y probabilidades de operaciones de los especímenes metálicos y rígidos estudiados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue del tipo descriptiva y analítica al referir características fundamentales que permitieron poner de manifiesto los aspectos corrosivos e incrustantes de los especímenes en instalaciones hidráulicas. La muestra considerada

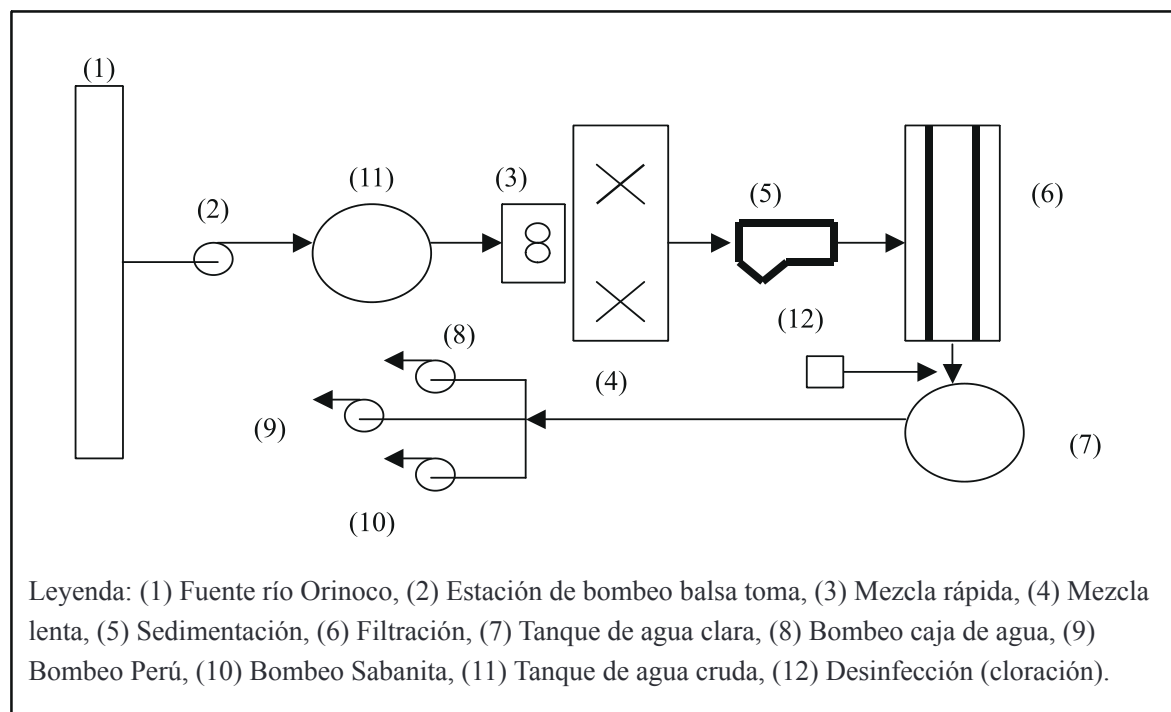


Fig. 1. Operaciones y procesos unitarios en planta de potabilización “Angostura” Ciudad Bolívar estado Bolívar.

como una parte del universo debía representar los fenómenos que ocurrían, con el fin de estudiarlos y evaluarlos. La investigación planteada, se desarrolló en la Planta “Angostura”, la cual forma parte del complejo hidráulico del Municipio Heres Ciudad Bolívar, y está ubicada en el sector denominado “Perro Seco” entre las coordenadas U.T.M.: Norte 900.000 Este: 438.750 Esc. 1:25.000 (MINFRA, 2000). Para la consecución de los objetivos específicos diseñados se siguió el siguiente procedimiento:

1. Visita de campo. Se realizaron tres reconocimientos a las áreas de estudio para visualizar las actividades en el lapso enero/febrero de 2004 en tiempo único (Hernández *et al.*, 1998).
2. Descripción cualitativa. Se tomaron 16 muestras fotográficas mediante cámara digital con la finalidad de obtener información mediante comparación visual de corrosión e incrustaciones presentes en especímenes rígidos y metálicos (válvulas, bombas y tuberías), con fallas materiales y estructurales en la secuencia de tratamiento del agua cruda proveniente del río Orinoco para las etapas de mezcla lenta, mezcla rápida y filtración, considerando los criterios descritos en la guía nalco para el análisis de fallas en los sistemas de enfriamiento por agua (Herro & Port, 1995).
3. Descripción cuantitativa. Según la cualidad de los estados de corrosión e incrustaciones en 16 especímenes metálicos y rígidos estudiados, se determina: Valuación final (F) en por ciento, considerando un valor de 100 por ciento como el estado inicial no degradado y 0 por ciento al estado final con degradación total, ecuación (1).

$$F = L + K (H - L) \quad (1)$$

donde:

F = valor combinado de la condición actual, por ciento

L = valor mínimo estructural o material, por ciento

H = valor máximo estructural o material, por ciento

K = constante de 1/10, adimensional

El deterioro unitario (U) en por ciento anual, mediante la ecuación (2):

$$U = (100 - F)/A \quad (2)$$

donde:

U = promedio de deterioro unitario para el espécimen en servicio, por ciento anual

A = tiempo de servicio en la fecha de inspección, años

R = probabilidad de operación total de los especímenes

en años, se determina con la ecuación (3):

$$R = F/U \quad (3)$$

Los valores H y L en por ciento obtenidos experimentalmente para las etapas del deterioro de cada uno de las estructuras rígidas y metálicas en todas las etapas del deterioro nos determinan el valor F en por ciento. El promedio de los porcentajes de valuación F en por ciento para cada tipo de estructura junto con el promedio de la edad en servicio de los especímenes suministran la base para estimar las probabilidades de deterioros U en por ciento anual y operaciones totales R en años (The Armco International Corporation, 1958).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cualidades de los estados de corrosión e incrustación de los especímenes metálicos y rígidos que conforman las instalaciones hidráulicas.

Red de conducción.

En la Fig. 2, se ilustra espécimen metálico localizado en el tramo 2 – 11, estación de bombeo balsa toma – tanque de agua cruda, ver figura 1, con un ambiente de operación interno de flujo de agua cruda del río Orinoco sin tratamiento y ambiente externo de contacto a la atmósfera y suelo. Tiempo de servicio 50 años y muestra de acero al carbono, 24” de diámetro exterior. La observación visual ilustra un metal muy corroído, desgastado, carcomido profundamente con óxido de color café.



Fig. 2. Vista transversal de colector seccionado estación de bombeo balsa toma-tanque de agua cruda en planta de tratamiento “Angostura” ubicada en Ciudad Bolívar.

Fosa de concreto.

En la Fig. 3, se ilustra un espécimen compuesto rígido y metálico, localizado en el tramo 11 – 3, tanque de agua cruda – mezcla rápida, ver Fig. 1. Con un ambiente de operación interno de agua cruda sobrante y de escorrentía y ambiente externo subterráneo. Tiempo de operación 20 años. El concreto armado presenta tramo sin grietas, reblandecimiento y desintegración, se observó una biomasa de limo verdoso – pardo debido al desarrollo de algas. El metal presenta alineación recta, con formas perfectas sin pandeo y sin puntos de oxidación recubierto con pintura epóxica.



Fig. 3. Vista parcial de fosa y sistema de drenaje anexos al sistema de dosificación de la fase I, en la planta de potabilización "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.



Fig. 4. Vista parcial de tanquilla de remoción rápida fuertemente corroída, perteneciente a la fase II de la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.

Mezcla rápida.

En la Fig. 4, se presenta un espécimen metálico, localizado en el sector 3 de la operación y proceso de mezclado rápido, con un ambiente de operación interno compuesto de agua cruda y los productos químicos sulfato de aluminio y cal hidratada usados en el tratamiento, con ambiente externo atmosférico. Tiempo de servicio 20 años. Se observa corrosión en la estructura metálica por químicos usados en el proceso. El óxido de coloración roja con estratificación formada en los especímenes se relaciona con altas concentraciones de cloruros y sulfatos presentes, de acuerdo a lo descrito por Herro & Port (1995).

Sedimentación.

En la Fig. 5, se ilustran los canales rectangulares con material compuesto rígido y metálico, localizados en el sector 5 a la salida de fosa de sedimentación, operando interna y externamente con agua sedimentada que comunica a la galería de filtros de la fase II y 20 años de operación. En la superficie interior del canal se presenta reblandecimiento y en la superficie exterior se observa limo de color verdoso (algas), la placa lateral de acero anclada con sujetadores atornillados, muestra contornos irregulares ondulatorios formados por áreas de pérdida de metal, con anillo de herrumbre precipitado anaranjado color café asociado al proceso de oxido reducción del ión hierro, el cual es variable de acuerdo a las condiciones del flujo de agua.



Fig. 5. Vista parcial del canal de salida de fosa de sedimentación parte externa, muy corroída y perteneciente a la fase II de la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.

Filtración.

En las Fig. 6 y 7, se muestra sistema de llenado y salida de agua, de características metálicas con tubería de 14" y rígida (fosa de filtrado), ubicadas en el sector 6 de la Fig. 1. Los ambientes de operación interna para el sistema de llenado, usan agua sedimentada, y externamente la red está embutida en concreto armado. El sistema de salida de agua es semejante al sistema de llenado usando agua filtrada, los canales internos están en contacto atmosférico y agua de filtración, todos los sistemas tienen 50 años de operación. Se observó desportillado de la estructura rígida debido a los mecanismos de corrosión en la química del concreto (Lea, 1971).

En el sistema de llenado se evidencia alta oxidación exterior e incrustación interior de herrumbre color café, así como la tubería de salida rectangular con avanzado ataque corrosivo en forma estratificada.



Fig. 6. Vista parcial de la galería de filtros de la fase I con presencia de degradación metálica en sistema de llenado planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.



Fig. 7. Vista parcial de uno de los accesos de drenaje de la galería de filtros de la fase I fuertemente corroida en la planta "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.

El sistema de lavado de filtro conformado por derivaciones de 3", válvula de compuerta con sistema de gato hidráulico incorporado presenta fallas mecánicas debidas a la erosión por el flujo turbulento de alta velocidad acompañada de la tendencia inestable del agua, ver Fig. 8.

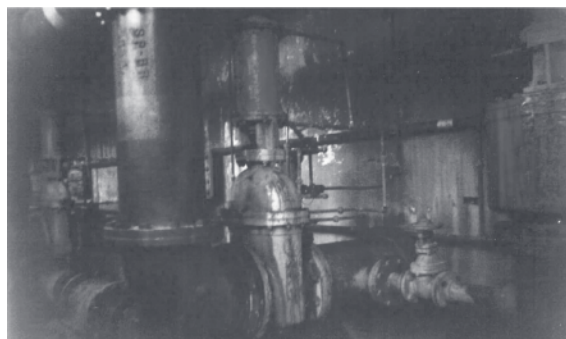


Fig. 8. Vista parcial del sistema de lavado de uno de los filtros de la fase I con daño mecánico producto de erosión y corrosión en la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.

Bombeo.

Sistema ubicado en el tramo 7 a 10 tanque de agua clara - bombeo de los sectores Caja de Agua, Perú y Sabanita, ver Fig. 1. El conjunto integrado por válvulas y sistema de rotación electromecánico, presenta un ambiente interno de agua filtrada más cloración y exteriormente tiene contacto atmosférico, para 50 años de operación. El desgaste externo observado puede explicarse por la acción de los compuestos químicos (cloruros, sulfatos, y otras sustancias agresivas) presentes en el agua, más la acción del oxígeno atmosférico para el proceso de corrosión.

En la Fig. 9, se muestran los equipos que presentan depósitos de aceites de uso industrial, los cuales tienen efecto aglutinante al acumularse reteniendo sustancias potencialmente corrosivas, con la producción de ácidos orgánicos.

Misceláneos.

En esta sección se describen equipos correspondientes a operación del tratamiento de agua, que han sido removidos para su reemplazo definitivo en el sistema.

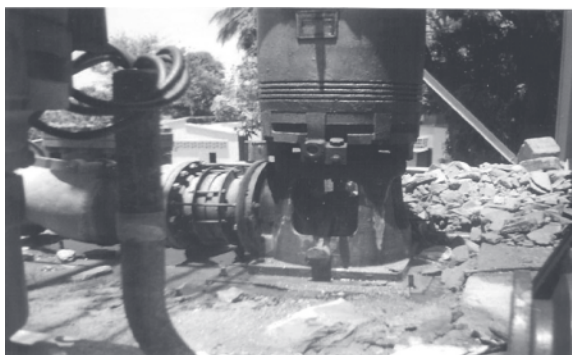


Fig. 9. Vista parcial de un equipo de bombeo de agua potable con presencia de productos de corrosión en la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar

La red, correspondiente a los especímenes metálicos localizados en el sector 6 filtración, ver Fig. 1, adjunta a la galería de filtros, posee una operación de flujo de agua no definida y de exposición ambiental atmosférica, con tiempo de servicio de 50 años, la muestra de alimentación presenta productos de corrosión con herrumbre color café, metal corroído, muy oxidado y desgastado evidente de degradación interna causada por reactivos químicos disueltos y otros elementos agresivos presentes en el agua.

El espécimen incrustado señalado en la Fig. 10, corresponde a un cuerpo de cabezales de bomba con depósitos productos de corrosión en forma de cúmulos. Presenta un ambiente de operación con agua filtrada más cloración en operación vertical sumergida de bombeo sin exposición a la luz solar y sin conexión externa al ambiente. Tiempo de servicio 50 años, en el espécimen la formación de los tubérculos mineralizados es debido a la exposición de aguas con alcalinidad elevada en bicarbonatos, o por la acción de altas concentraciones de sulfatos, cloruros y aniones agresivos, reduciéndose la concentración de oxígeno dando lugar a tubérculos con composición química variada de acuerdo a lo reportado por Herro & Port. (1995).

Incrustación tubular.

El espécimen mostrado en la Fig. 11, corresponde a la incrustación de productos de corrosión en el material de un tubo de 90° con diámetro 12". El ambiente de operación interna es la conducción de agua filtrada más cloración y de operación externa en

contacto a la atmósfera. Tiempo de servicio 50 años. La acción combinada de pH, temperatura del agua, carbonato y otros reactivos químicos han dado lugar a la formación de cúmulos que pueden retardar de alguna forma el proceso de corrosión que se localiza debajo de los depósitos formados; el crecimiento de los tubérculos, puede ser estimulado por la acción de flujos hidráulicos bajos con periodos de inactividad.



Fig. 10. Vista parcial de un cuerpo de cabezales de bomba incrustada en forma de cúmulos en la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar.



Fig. 11. Vista parcial de un codo de 90° con diámetro exterior de 12 pulgadas, fuertemente incrustado con carbonato de calcio, en la planta de tratamiento "Angostura" ubicada en Ciudad Bolívar

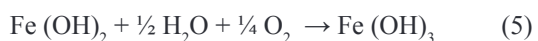
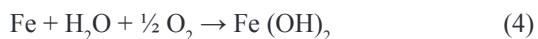
Baranda de protección.

En este sistema de defensa (baranda metálica), ubicado alrededor de la fosa de sedimentación, posee un ambiente de operación exterior de contacto al oxígeno atmosférico, y una vida de servicio de 20 años. En la superficie se observó babaza gelatinosa asociada a una red de hebras entre mezcladas con material biológico.

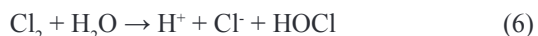
Corrosión.

De manera general, la corrosión observada en los especímenes metálicos correspondiente a las Fig. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, presentan corrosión visible en el metal con mancha de herrumbre $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ café, lo cual es multifactorial y puede explicarse por:

I. Acción del oxígeno disuelto en agua (medio alcalino y neutro), con el siguiente mecanismo de reacción, donde el hidróxido ferroso pasa a hidróxido férrico mediante las reacciones (4) y (5):



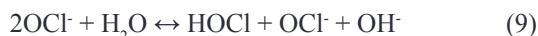
II. Acción del gas cloro disuelto en agua, el cual se hidroliza rápidamente conforme a la reacción química (6) (Kiely, 1999).



El ácido hipocloroso (HOCl) es el compuesto activo formado en esta reacción que tiende a disociarse de acuerdo a la reacción (7).



dependiendo del pH y de la concentración, el cloro en agua existe como gas cloro libre, ácido hipocloroso o ión hipoclorito, este último forma sales dependiendo del pH, por ejemplo, el hipoclorito de calcio que se ioniza en agua de acuerdo a las reacciones (8) y (9)



III. Condición ácida del medio acuoso. Las picaduras observadas en los especímenes metálicos señalados por la acción de los factores químicos, son influenciados además por otros parámetros tales como: tipo de metal, temperatura, turbulencia del agua, ensuciamiento de la superficie, formación de productos de la corrosión, tratamiento químico, y desde luego el tipo de ácido (oxidante o no oxidante, fuerte o débil) que pueden alterar marcadamente la corrosión asociados con las condiciones ácidas que se desarrollan en el metal (Herro & Port, 1995).

Incrustación.

Los especímenes de las Fig. 6, 10 y 11, con evidencias de incrustación, presentan tubérculos mineralizados debido a la exposición de aguas con alcalinidad elevada en bicarbonatos, los cuales estimulan la formación de cúmulos, o por la acción de altas concentraciones de sulfatos, cloruros y aniones agresivos, reduciéndose la concentración de oxígeno con tubérculos de composición química variada. Herro y Port. (1995), se refiere a:

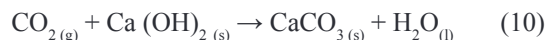
1. Costra exterior: con la siguiente composición química: $(\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 + \gamma\text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Hemática) $\sim \text{Fe}(\text{OH})_3$ (hidróxido férrico) rojiza, café, anaranjada.
2. Cáscara interior: definida como: $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (ferrita ferrosa hidrosa) $\sim$ Magnetita. Negra.
3. Núcleo: $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (óxido ferroso hidróxido) $\sim \text{Fe}(\text{OH})_2$ (hidróxido ferroso) negro blanco verdoso si no hay oxígeno.
4. Cavidad llena de fluido: $(\text{Fe}^{++}, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{--})$.
5. Piso corroído. Estas características estructurales internas se inician por la costra exterior y finalizan en el piso corroído.

Influencia biológica.

Los especímenes de las Fig. 3 y 5 y otros presentes en el sistema con evidencias de corrosión, están sujetos al crecimiento de biomasa (algas y bacterias asociadas) de color limo verdoso – pardo en la superficiales de la estructura del concreto, apreciándose la descomposición de materia orgánica y de una babaza gelatinosa estructurada en una red de hebras secretadas de polímeros extracelulares, mezcladas con bacterias, hongos, agua, gases y materiales extraños dando lugar al proceso conocido como corrosión biológica pasiva (Zelver *et al.*, 1981), que puede ser reconocida mediante el examen de las morfologías del desgaste, composición y distribución de los productos de corrosión y los análisis biológicos.

Carbonatación.

La acción del CO_2 , como uno de los agentes que afecta la durabilidad del concreto reacciona en medio hidratado de acuerdo a la reacción (10).



provocando cambios de pH alrededor del acero,

permitiendo que la capa de óxido protectora pierda su estabilidad termodinámica, originándose la corrosión del acero conocida como reacción de carbonatación y que tiene como consecuencia una disminución de la basicidad del concreto, detectable mediante el ensayo de la fenolftaleína (superficie alcalina, color rojo – púrpura o zona carbonatada, incoloro) y que puede despasivar las armaduras de acero embebidas en correspondencia a lo citado por Sánchez (2004) y Kobayashi & Uno (1989).

Ión cloruro.

La durabilidad del concreto afectado por la acción del ión cloruro en estado libre, ligado y total siendo el más peligroso el ión que se encuentra en estado libre disuelto en agua provocando la despasivación de la armadura e iniciando la corrosión. En el presente trabajo, se señalan los especímenes rígidos (concreto armado) Fig. 3, 5, 6, 7 y 9 atacados por factores desencadenantes de la corrosión de la armadura en contacto con el concreto, además, existe la posibilidad de presentar corrosión inducida por

cloruro, reacción de carbonatación y combinación de carbonatación más ión cloruro.

Estados de corrosión e incrustaciones basados en valuaciones estructurales, materiales y finales, deterioros unitarios y probabilidades de operaciones de los especímenes metálicos y rígidos estudiados.

En la Tabla I, se presentan los valores máximos y mínimos para la condición estructural (solicitaciones de cargas estáticas o dinámicas) y material (condición física) de los especímenes metálicos y rígidos en función de las cualidades de degradación, los cuales son usados con la ecuación 1, para determinar los valores promedios finales de los especímenes metálicos y rígidos presentados en Tabla II, los promedios 54 y 68,6 por ciento, de valuaciones finales para los especímenes rígidos (concreto armado) son mayores que los promedios 34,83 y 61,87 por ciento, registrados para los especímenes metálicos en las etapas de tratamiento de agua cruda, sedimentada respectivamente. Lo cual se explica por la acción de los agentes atmosféricos, elementos solubles y pH del agua (Mora *et al.*, 2005).

Tabla I. Valuación cuantitativa estructural y material de los especímenes metálicos y rígidos de las instalaciones hidráulicas de planta “Angostura” Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

Etapas de tratamiento	Fases	Figuras	Estructural (por ciento)		Material (por ciento)	
			metálico	rígido	metálico	rígido
Cruda	I	2	90	-	10	-
	I	3	90	90	75	50
	II	4	10	-	10	-
Sedimentada	II	*	90	50	75	50
	II	*	-	90	-	50
	II	5	90	90	10	75
	II	*	90	50	75	75
	I	*	90	90	75	90
	I	6	90	30	10	50
Filtrada	I	7	90	50	10	75
	I	8	90	-	75	-
	II	9	90	10	75	10
	I	*	90	-	10	-
	I	10	90	-	75	-
	II	*	90	-	50	-
	II	11	90	-	75	-

(*): especímenes adicionales metálicos y rígidos considerados en la valuación cuantitativa. (I, II): fases de tiempo de servicio en la fecha de inspección de 50 y 20 años, respectivamente.(-): espécimen metálico o rígido sin valoración estructural o material.

Tabla II. Promedios de valuaciones estructurales, materiales y finales de los especímenes metálicos y rígidos de las instalaciones hidráulicas de planta “Angostura” Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

Etapas de tratamiento	Valuación (por ciento)					
	Estructural		Material		Final	
	Metálico	Rígido	Metálico	Rígido	Metálico	Rígido
Cruda	63,33	90	31,66	50	34,83	54
Sedimentada	90	74	58,75	68	61,87	68,6
Filtrada	90	30	47,5	45	51,57	31,5

En la Tabla III, se muestran los promedios de deterioros unitarios para los especímenes metálicos y rígidos obtenidos con la aplicación de la ecuación 2, los resultados están basados en los valores de las valuaciones finales (ver Tabla II), y los correspondientes tiempos de servicios 50 ó 20 años en el momento de la inspección. Para la fase I construcción inicial de planta la degradación anual de 1,30; 0,76 por ciento anual es mayor en los especímenes metálicos en comparación con la degradación anual 0,92; 0,63 y 1,37 por ciento anual, determinada en los especímenes rígidos.

En la fase II ampliación de planta la degradación anual 3,26; 1,91 y 2,41 por ciento anual de los especímenes metálicos es mayor a la observada 2,30; 1,57 por ciento anual, para los

especímenes rígidos. Para ambos casos fases I y II, en los especímenes rígidos (concreto armado) en la etapa de tratamiento de agua filtrada los valores de deterioro unitario 1,37 y 3,43 por ciento anual son mayores con respecto a 0,97 y 2,41 por ciento anual de los especímenes metálicos.

En la Tabla IV, se muestran los promedios de las probabilidades de operación (vida útil más vida residual), obtenidos a partir de los datos reportados en Tablas II y III, mediante la aplicación de la ecuación 3, para los especímenes metálicos y rígidos de la planta de potabilización “Angostura” en las diferentes etapas de tratamiento. En la fase I, la probabilidad de operación 58,70 y 109,24 años para los especímenes rígidos es mayor a la probabilidad 26,73 y 81,15 años de los especímenes metálicos. De igual manera en

Tabla III. Promedios deterioros unitarios de los especímenes metálicos y rígidos de las instalaciones hidráulicas de planta “Angostura” Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

Etapas de tratamiento	Deterioro unitario (por ciento anual)			
	Fase I construcción original planta		Fase II ampliación de planta	
	Metálico	Rígido	Metálico	Rígido
Cruda	1,30	0,92	3,26	2,30
Sedimentada	0,76	0,63	1,91	1,57
Filtrada	0,97	1,37	2,41	3,43

Tabla IV. Promedios probabilidades de operación de los especímenes metálicos y rígidos de las instalaciones hidráulicas de planta “Angostura” Ciudad Bolívar, estado Bolívar.

Etapas de tratamiento	Probabilidad de operación (vida útil + vida residual) (años)			
	Fase I Construcción original planta		Fase II Ampliación planta	
	Metálico	Rígido	Metálico	Rígido
Cruda	26,73	58,70	10,69	23,48
Sedimentada	81,15	109,24	32,46	43,69
Filtrada	53,63	22,99	21,45	9,20

fase II, la probabilidad 23,48 y 43,69 años para los elementos rígidos supera a las probabilidades 10,69 y 32,46 años de los especímenes metálicos en agua cruda y sedimentada, respectivamente. En agua filtrada, fases I y II, las probabilidades de operación 53,63 y 21,45 años de los especímenes metálicos son mayores a las probabilidades determinadas 22,99 y 9,20 años para los especímenes rígidos.

Los resultados anteriores pueden interpretarse en términos de funcionalidad relacionando la capacidad de carga y durabilidad material de la estructura hidráulica de la planta “Angostura”, factores externos ambientales (hidrometeorológicos, y agentes agresivos de degradación) provocando el decremento gradual de la funcionalidad de la estructura con respecto al tiempo, lo cual está en correspondencia a lo señalado por Sarja & Vesikari (1996).

La probabilidad de operación en años para la planta “Angostura” puede considerarse como el periodo en el que los elementos rígidos y metálicos de la estructura conservan los requisitos del proyecto inicial sobre los aspectos de: seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. Dado que en el lapso de operación desde 1954 al 2005 a la planta de tratamiento “Angostura” ha sido necesario realizarle reparaciones, remodelaciones o renovaciones parciales para que la estructura retornara parcialmente a su estado de servicio, segura, funcional y estéticamente minimizando en lo posible los efectos del avance de degradación hasta el límite de posible colapso, en concordancia con el concepto expresado por CYTED (1997).

Considerando lo señalado por CEB. (1992), sobre Estados Límites de Servicios (ELS) y Estado Límite Ultimo (ELU) como valores de frontera de la vida residual de la estructura, probablemente para el año 2116, es decir, dentro de 109,24 años, las condiciones de operación de las estructuras hidráulicas de planta “Angostura” alcanzarían un estado de degradación inaceptable, por lo que la estructura pasaría del estado límite último al colapso. Debido a la no-existencia de registros históricos sobre fallas previas de operación en la planta Angostura y a la ausencia de estudios experimentales de laboratorio realizados para los parámetros de durabilidad con relación al tiempo de vida útil que comprende T1 + T2; donde:

(T1): Iniciación de la corrosión. Comprende la concentración de cloruros en la superficie; coeficiente de difusión efectiva en la mezcla de diseño del concreto y concentración crítica de cloruros a la profundidad del acero de refuerzo.

(T2): Propagación de la corrosión. Comprende la penetración de la corrosión; diámetro de la barra de refuerzo y longitud del área corroída; humedad relativa y temperatura del ambiente, velocidad de la corrosión, porosidad del concreto, cantidad disponible de oxígeno disuelto a la profundidad de la barra de acero y relación entre superficie del ánodo y del cátodo.

Los resultados reportados en el presente trabajo no deben ser considerados 100% conservadores dado que los mismos se pueden interpretar como una tendencia probabilística, deben ser verificados y comparados con resultados experimentales. Por ejemplo, ensayos de ultrasonido y/o los cupones de corrosión, o lo descrito por Tuutti (1982).

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a las valuaciones de corrosión en especímenes metálicos (válvulas, bombas y tuberías), en la instalación hidráulica de la planta de tratamiento “Angostura”, se concluye que los productos de corrosión (herrumbre color café) observados en las superficies externas son causados por el medio atmosférico, agua (cruda, sedimentada y filtrada), reactivos químicos (sulfato de aluminio, cal hidratada y gas cloro) usados en el proceso.
2. Los productos observados de reblandecimiento, desportillamiento y desintegración en especímenes de concreto armado en la instalación hidráulica de la planta de tratamiento “Angostura”, son efectos multifactoriales de los procesos de: carbonatación, influencia del ión cloruro y oxidación biológica (algas, bacterias y otros).
3. La tuberculación en especímenes metálicos fuera de operación se evidenció por incrustación de materiales diversos que entran en reacciones químicas complejas produciéndose corrosión metálica acompañada por capas de costras exteriores, tienen origen en: carbonatos, silicatos, partículas asentadas, restos de material inorgánico y otros precipitados sobre el material.
4. El máximo deterioro unitario (por ciento anual) determinado en las instalaciones hidráulicas de

la planta “Angostura” para las diferentes etapas de tratamiento (cruda, sedimentada y filtrada), correspondió para los especímenes rígidos.

5. La probabilidad de operación (vida útil + vida residual) máxima para los elementos rígidos en las instalaciones hidráulicas de la planta de tratamiento “Angostura” en las diferentes etapas de tratamiento (cruda, sedimentada y filtrada), se ubica en 109,24 años y la probabilidad máxima de operación para los elementos metálicos en etapas similares de tratamiento se sitúa en 81,15 años.

Evaluation of corrosion and incrustations in the hydraulic installations of a water treatment plant in Bolivar State, Venezuela

SUMMARY

Corrosion in metallic materials (valves, pumps and pipes) and rigid elements (reinforced concrete) are seen as being susceptible to destructive attack and as an important factor during the life of the infrastructure. Given this situation, the object was to carry out an evaluation of corrosion and encrustation of the hydraulic facilities of the water treatment plant ‘Angostura’ in Bolivar City, Bolivar State. The investigation was of the descriptive and analytic type: 16 photographs of metal and rigid elements with corrosion and encrustation flaws were obtained for carrying out a qualitative description. Conditions in corrosions and incrustations were estimated considering the deterioration both in unitary segments of the hydraulic system and the probability of operation in metallic and rigid components. The conclusion was that the observed results were caused by atmospheric elements, water (hard, settled and leaked), and by chemical reactions (aluminum sulfate, hydrated lime, and chlorine gas) used in the process. The results of softening, chipping and disintegration in the reinforced concrete are the multifactorial results of the processes of carbonation, influences of the chloride ion, and biological oxidization. The maximum unitary deterioration in rigid specimens was 3.4% per year and in the metallic specimens 3.26%. The greater probability of operation for the rigid elements was placed at 109.24 years and for the metallic elements at 81.15 years.

Key words: water treatment plant, corrosion, encrustation, probability of operation.

REFERENCIAS

- CEB (Eurointernational Committee for Concrete) (1992). *Durable concrete structures, design guide*. Thomas Thelford Services Ltd, London, UK.
- CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). (1997). *Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales*. pp. 154-163. En: *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Maracaibo, Venezuela.
- De Romero M., Aponte B., Arias S., De García F., De Rincón O. & Larreal O. (2005). Diseño de un modelo matemático computarizado de costos por corrosión, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. **28**: 28-41.
- Hernández R., Fernández C. & Baptista P. (1998). *Metodología de la Investigación*. 2ª edición. McGraw Hill Interamericana de México S.A, Ciudad de México, México.
- Herro H. & Port R. (1995). *Guía Nalco para el análisis de fallas en los sistemas de enfriamiento por agua*. McGraw Hill Interamericana de México S.A, Ciudad de México, México.
- Kemmer F. & McCallion J. (1998). *Manual del agua su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. McGraw Hill Interamericana de México S.A, Ciudad de México, México.
- Kiely G. (1999). Introducción a la Química y Microbiología en Ingeniería Ambiental. pp. 75 – 197. En: *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión*. McGraw Hill Interamericana de España, S.A.U. Madrid, España.
- Kobayashi K. & Uno Y. (1989). Influence of alkali on carbonation of concrete: Part I. Preliminary tests with mortar specimens, *Cement and Concrete Research*. **19**: 821-826.
- Lane R. (1995). Agua Potable. pp. 43-68. En: *Control de Incrustación y Corrosión en Instalaciones Hidráulicas de Edificios*. McGraw Hill Interamericana de México S.A. de C.V. Ciudad de México, México.

- Lea F. (1971). *The chemistry of concrete*. Chemical Publishing Company, New York, USA.
- Lináres D. & Sánchez M. (2003). Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. **26**: 34-44.
- MINFRA (Ministerio de Infraestructura) (2000). *Levantamiento aerofotogramétrico Ciudad Bolívar-Soledad Esc. 1:25.000 Vuelo*, Caracas, Venezuela.
- Mora V., Cedeño J. & García A. (2005). Calidad y corrosión en aguas de las plantas de tratamiento Angostura y Guri del estado Bolívar, Venezuela, *Bol. Malariol. Sal. Amb.* **45**: 11-21.
- Sánchez, M. J. (2004). *Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento*. Tesis Doctoral. Ingeniería de la Construcción. Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Sarja A. & Vesikari E. (1996). *Durability design of concrete structures*. E & FN SPON, London, UK
- The Armco International Corporation. (1958). *Manual de drenaje y productos de construcción*. R.R. Donnelly & Sons Company, Chicago, USA.
- Tuutti K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- Zelver N., Characklis W. & Roe F. (1981). Annual Meeting of the Cooling Tower Institute Paper N ° TP239A, CTI (Cooling Tower Institute), Houston, USA.

Recibido el 18/12/2005

Aceptado el 06/03/2006