

CORROSIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES METÁLICAS

C. I. Elsner

CIDEPINT - Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIC-CONICET).
Av. 52 e/121 y 122, B1900AYB La Plata. Tel: (0221)483-1141/4, Fax: (0221)427-1537.
E-mail: direccion@cidepint.gov.ar, anelpire@cidepint.gov.ar

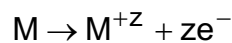
Palabras clave: corrosión atmosférica, estructuras metálicas, anticorrosión

RESUMEN

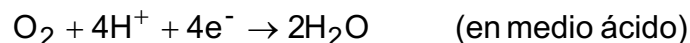
La cinética de deterioro sufrida por una estructura metálica expuesta a la atmósfera es un proceso muy complejo que depende no sólo de la naturaleza del metal y del medio sino que también se ve afectado por variables de diseño y por la adecuada implementación de métodos de protección. Es por ello que en el texto que sigue se desarrollarán conceptos básicos de corrosión atmosférica seguidos por consideraciones inherentes a la influencia de variables de diseño sobre el comportamiento global de la estructura expuesta a una ambiente agresivo. Finalmente, se presentarán casos concretos tendientes a ejemplificar la casuística de falla de distintas estructuras en servicio.

CONCEPTOS GENERALES SOBRE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La palabra *corrosión* alude al deterioro de los materiales debido a su interacción con el medio ambiente. En el caso particular de los metales, la forma más común de corrosión es aquella que se desarrolla en medios húmedos (atmósfera, suelos, ambiente marino). El proceso es básicamente de naturaleza *electroquímica*, es decir, con transferencia de carga eléctrica e involucra no sólo la disolución del metal



sino una o más reacciones complementarias de reducción, como por ejemplo la del agua, oxígeno u otras especies presentes



Cuando un metal se corroe en una dada condición de servicio puede dar lugar a la formación de diversos productos de corrosión: solubles, por ejemplo compuestos que involucren la presencia de iones metálicos (Fe^{+2}) en su composición o insolubles, como en el caso de óxidos e hidróxidos, que se depositarán sobre la superficie.

Todo esto es importante en el estudio de la corrosión pues condiciona el comportamiento del metal o aleación frente a dicho proceso. Si los productos son solubles, es de esperar que haya ataque corrosivo; en cambio, si son insolubles, estos pueden entorpecer la corrosión y además proteger el metal o aleación pasivándolo.

El comportamiento general del sistema resulta de la combinación de factores que dependen tanto de la naturaleza del metal, su historia térmica, la presencia de impurezas, de tensiones a las que es sometido antes y durante su vida en servicio, como también de la composición química del medio corrosivo. En este sentido, cuando una estructura está expuesta a la atmósfera su comportamiento es fuertemente influenciado por la no uniforme accesibilidad del oxígeno a distintas zonas de la misma, la humedad ambiente y los contaminantes atmosféricos (SO_2 , NaCl , NO_x). Todos estos factores, sumados al efecto de la radiación solar, determinan el llamado “*Macroclima*” de una zona determinada. Sin embargo, cada estructura responderá en forma particular según el clima específico que se forme a su alrededor, es decir, su “*Microclima*”. Entre los parámetros que definen este último pueden mencionarse: a) la formación de rocío, o en general, el tiempo de humectación de la superficie; b) el calentamiento de los objetos por la radiación global, especialmente infrarroja y c) la contaminación con iones de naturaleza ácida (SO_3^{-2} , NO_2^{-1} , Cl^-) en la película acuosa depositada sobre el objeto.

En la generalidad de los casos, a temperatura ambiente y en una atmósfera seca la corrosión puede ser ignorada a efectos prácticos, en cambio, adquiere particular relevancia en superficies humedecidas. Esto es debido a que por ser un mecanismo electroquímico debe contar con la presencia de un electrolito que, en este caso, puede estar constituido por una película húmeda extremadamente delgada o bien una película acuosa, cuando el metal aparece mojado. Es por ello que las precipitaciones (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperatura (rocío) son, sin duda los principales promotores de la corrosión atmosférica.

Entre los principales factores externos que determinan la intensidad del deterioro causado por la corrosión están: 1) el tiempo de residencia de la película de electrolito sobre la superficie del metal; 2) la composición química de la atmósfera (contaminación del aire con gases, vapores ácidos y aerosoles del mar) y c) la temperatura ambiente. La difusión de oxígeno a través de la película acuosa suele ser el factor controlante de la velocidad de corrosión (**Figura 1**). Esta velocidad se incrementa al adelgazar el espesor de la película depositada sobre el metal, alcanzando su valor máximo para un espesor intermedio y por debajo del cual la velocidad disminuye no sólo por la alta resistencia óhmica que presenta una película sumamente delgada sino, además, por estar obstaculizadas en su seno las reacciones de ionización y disolución del metal.

Los principales contaminantes atmosféricos que afectan el proceso de corrosión son NaCl y SO_2 . El NaCl se incorpora al ambiente desde el mar, siendo sus efectos más notorios cerca de la orilla donde el aire transporta grandes

cantidades de sal y se produce una continua pulverización de agua. El SO_2 se encuentra en atmósferas impurificadas por humos industriales y en contacto con el agua que cae da lugar a la llamada lluvia ácida. Ambas sustancias estimulan grandemente la corrosión de la superficie metálica humedecida ya que aumentan la actividad de la película acuosa.

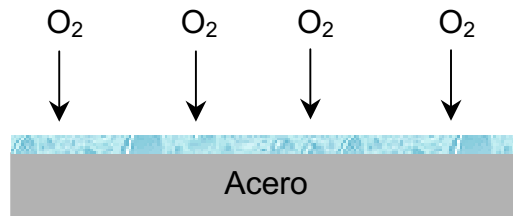


Figura 1 – Esquema básico para que se desarrolle el proceso de corrosión

En la **Figura 2** se presenta un esquema simplificado del proceso de corrosión del acero en ambientes contaminados con SO_2 . Este último se combina con la capa de herrumbre depositada sobre la superficie del metal y da lugar a la formación de sulfato ferroso que, en presencia de oxígeno y agua, forma más herrumbre y ácido sulfúrico que a su vez reacciona con el acero para dar nuevamente sulfato ferroso. Tomando en cuenta que el ácido sulfúrico se regenera con el consumo de agua, la corrosión del metal dependerá del período de humectación superficial. Por otro lado, en atmósferas con alta humedad, la velocidad de corrosión es directamente proporcional al nivel de contaminación de la aquélla.

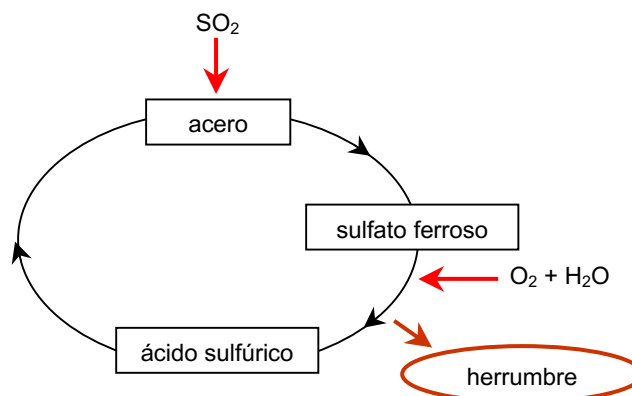


Figura 2- Proceso cíclico de formación de herrumbre en atmósferas contaminadas con SO_2

En el caso de los ambientes marinos, el aumento de la velocidad de corrosión es debido, fundamentalmente, al efecto del NaCl sobre la conductividad de la película de líquido y su acción destructora sobre la película de productos de corrosión formada sobre el sustrato. Sin embargo, la presencia de MgCl_2 (componente minoritario en el agua de mar) tiene también su aporte ya que acidifica el líquido y, por su acción delicuescente, aumenta el tiempo de humectación.

Entre las variables que afectan la salinidad atmosférica pueden mencionarse: régimen de vientos dominantes (dirección y velocidad), distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, etc.

Por todo lo expuesto resulta evidente que el comportamiento del acero frente a la corrosión depende de la ubicación geográfica de la exposición, de su temperatura y humedad relativa y del contenido de poluentes. Un ejemplo de ello es presentado en la **Tabla I**.

Tabla I - Velocidad de corrosión del acero al carbono en distintos puntos geográficos

Atmósfera	Velocidad de corrosión $\mu\text{m.año}^{-1}$
Polar	1
Rural árida	5
Rural marina	13
Industrial	14 – 51
Urbana	19 – 23
Rural	20 – 28
Semi-industrial	28 – 48
Industrial marina	94
Marina	132 – 686
Marina – sobre la playa	1070

CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS

El material estructural más utilizado es el acero con bajo o medio contenido de carbono, por lo tanto, todas las consideraciones generales realizadas precedentemente deberán ser tenidas en cuenta al momento de evaluar su comportamiento frente a la corrosión en determinadas condiciones de servicio. Sin embargo, resulta de particular importancia analizar aspectos relativos a la influencia de factores de diseño en el comportamiento general de la estructura.

El análisis de la geometría resultante del ensamblado de piezas metálicas en una estructura resulta de vital importancia al momento de tratar de minimizar o evitar situaciones que empeoren los efectos de la corrosión. Es decir, deben evitarse zonas que favorezcan el estancamiento de líquidos o sólidos y la formación de rendijas, que incentivarían el desarrollo de corrosión localizada. En la **Figura 3** se presentan ejemplos característicos de este tipo de defecto de diseño. Para eludir estancamientos, los componentes estructurales deben ser diseñados sin salientes, los perfiles en L ubicarse con su ángulo abierto hacia abajo y prevenirse las juntas o costuras expuestas. Por otra parte, el deficiente diseño de sellos y empaquetaduras puede dar lugar a la formación de rendijas y al consecuente desarrollo de corrosión localizada del tipo “crevice”.

Otro factor que reviste particular importancia cuando estas condiciones no fueron tenidas en cuenta al momento del diseño es contar con vías de acceso que

permitan realizar el mantenimiento preventivo de la estructura. Por ejemplo, en una cavidad poco accesible, la presencia de aire húmedo en un ambiente posiblemente frío conducirá a la condensación de agua sobre la superficie y dará lugar a la aparición de imprevistas fallas por corrosión.

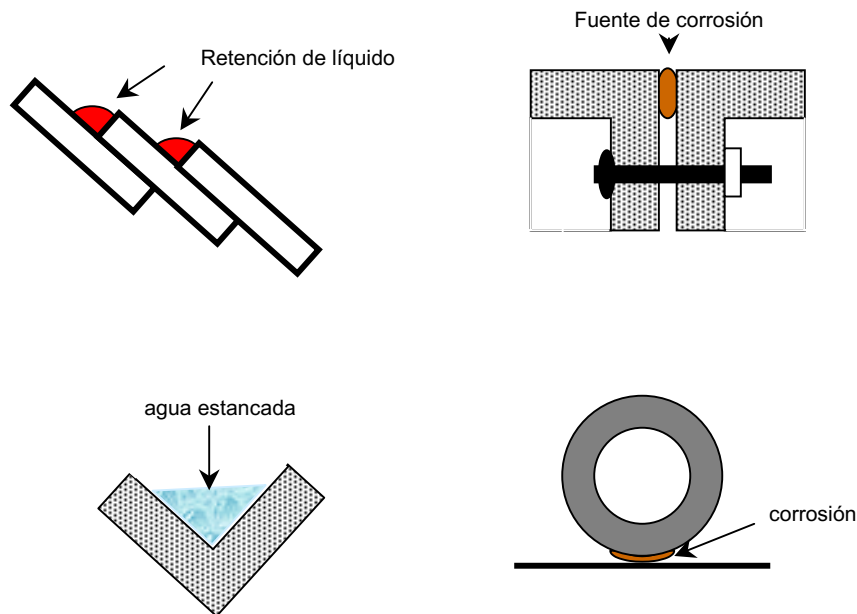


Figura 3 – Efecto del mal diseño sobre el desarrollo de corrosión localizada

La ubicación geográfica de la estructura, relativa a los vientos y a las partículas transportadas por él pueden coadyuvar a un mayor deterioro del sistema. La importancia de la polución y su efecto sinérgico sobre la corrosión se ilustra en la **Figura 4**, donde se muestran posibles deficiencias de un proyecto referidas a la topografía del lugar de emplazamiento. Por ejemplo, a) si la estructura debe ser ubicada en un terreno montañoso, tanto la dirección de los vientos como la influencia de las precipitaciones debe considerarse; en el caso esquematizado en la figura, la posición más adecuada es la indicada con la letra C; b) en ambientes marinos, la dirección de los vientos predominantes debe ser tenida en cuenta a fin de minimizar la contaminación con Cl^- , en este caso, la posición más adecuada es la B y c) en zonas industriales, debe evitarse el contacto de la estructura con los gases de las chimeneas a fin de minimizar los eventuales efectos de la lluvia ácida.

Por otra parte, siempre que el acero sea utilizado en la industria de la construcción existe la posibilidad de generación de pares galvánicos. En este caso, la probabilidad de existencia de problemas de corrosión se determinará a partir de la posición de ambos materiales en la tabla galvánica en agua de mar. En estos casos, las características del ambiente son de fundamental importancia, cuanto más severo es el medio corrosivo mayor efecto tendrá la cupla galvánica formada. Por lo tanto, situaciones de este tipo no previstas al momento del diseño deben ser de permanente evaluación ya que afectarían fuertemente el comportamiento del material.

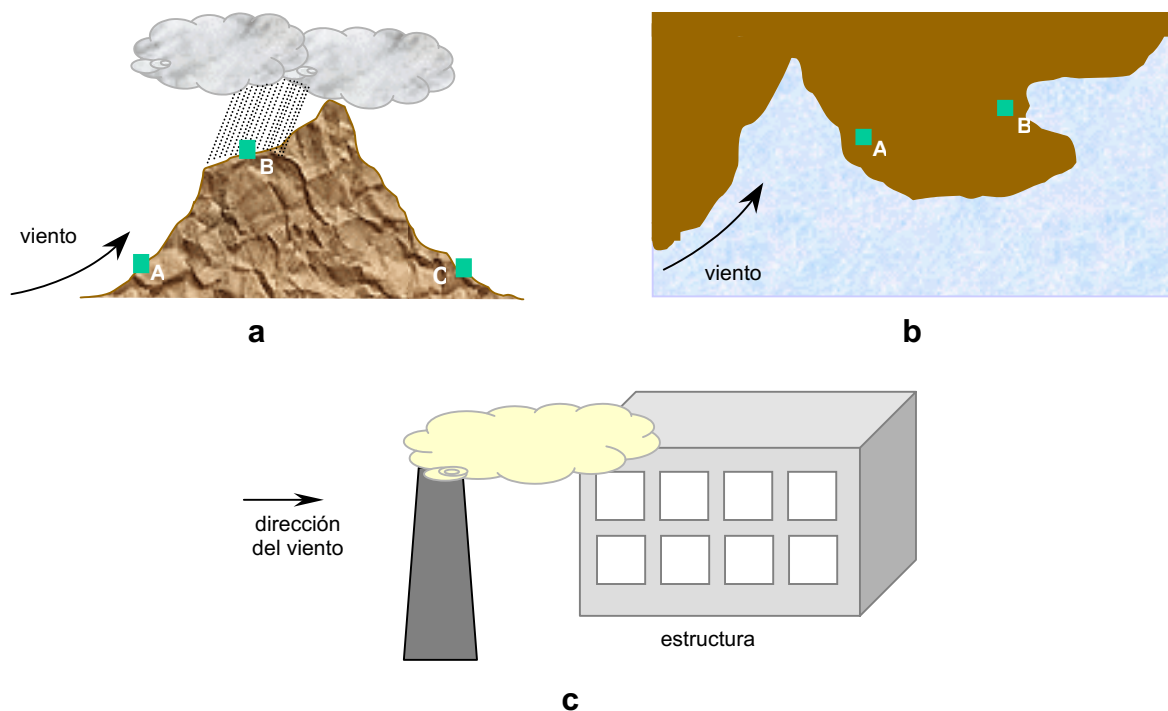


Figura 4 - Ubicación geográfica como consideración de diseño

Si bien es cierto que en estructuras construidas con aceros de baja resistencia generalmente no se presentan problemas de corrosión bajo tensión, la situación cambia al considerar el uso de aceros templados ya que en estos casos la combinación de un medio agresivo y la aplicación de tensiones de tracción sobre la estructura pueden aumentar la probabilidad de corrosión bajo tensión o fragilización por hidrógeno, especialmente en medios marinos. La situación se agrava si es necesario realizar soldaduras como, por ejemplo, en el caso de estructuras de puentes. Consideraciones similares deben realizarse con aceros pos-tensados empotrados en el hormigón.

PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS

La prevención de la corrosión debe ser tenida en cuenta desde las instancias iniciales de diseño con el propósito de incrementar la vida útil en servicio, minimizar los trabajos de mantenimiento y evitar deterioros y fallas tempranas ocasionadas por aspectos no contemplados oportunamente.

Los principales métodos de protección aplicables a estructuras expuestas a la atmósfera se basan en la generación de una barrera física entre el metal y el ambiente agresivo. Los **recubrimientos protectores** comúnmente utilizados como protección anticorrosiva de estructuras metálicas expuestas a la atmósfera son de tres tipos: orgánicos, inorgánicos y metálicos. La selección del más adecuado debe ser hecha en función de la severidad del medio corrosivo, la durabilidad deseada y la probabilidad de realizar trabajos de mantenimiento.

El primer grupo está constituido fundamentalmente por las pinturas y es, tal vez, el método de protección más frecuentemente empleado. Su adecuada selección y aplicación serán parámetros determinantes de su desempeño en servicio.

Los recubrimientos inorgánicos se ubican entre los orgánicos y los metálicos y están representados fundamentalmente por las pinturas ricas en cinc. Su performance protectora está directamente relacionada con la resistencia a la corrosión del cinc en un ambiente determinado. Debido a la ausencia de compuestos orgánicos en su formulación, son los recubrimientos que presentan mayor resistencia a los disolventes.

Finalmente, los recubrimientos metálicos más utilizados son los de base cinc. Según el porte del componente a proteger, la cubierta galvánica puede ser aplicada por inmersión en caliente, proyección o bien por electrodeposición. Su vida útil en servicio es función del espesor del recubrimiento y de la composición del medio corrosivo al cual está expuesto. Por lo tanto, el espesor de película requerido deberá ser determinado no sólo en función de la agresividad del medio sino también en base a la expectativa de vida útil de la estructura. Otro tipo de recubrimiento metálico que suele utilizarse en casos muy particulares es a base de cadmio. Si bien estas cubiertas poseen alta resistencia a la corrosión en ambiente marinos, la toxicidad de los baños a emplear para su fabricación hace que su uso se restrinja a la protección de pequeños componentes expuestos a medios fuertemente agresivos.

Otra forma de combatir la corrosión atmosférica es el uso de los llamados **aceros patinables**. En este tipo de material, el acero contiene pequeñas cantidades de níquel, cromo y cobre. La función de estos últimos es modificar las propiedades de la película de productos de corrosión, confiriéndole mayor poder protector. Debido a ello actúan como barrera al ingreso de agua y humedad y, en condiciones adecuadas, se los puede considerar como "autoprottegidos". Aunque este comportamiento puede resultar muy valioso, debe reconocerse que sólo será observado bajo circunstancias muy particulares ya que el desarrollo de la pátina requiere de constantes ciclos de mojado/secado. Su performance es óptima en ambientes industriales poluidos pero es menos satisfactoria en ambientes marinos. Por ello, este tipo de material es absolutamente desaconsejado para ambientes en los que estas específicas condiciones de exposición no son encontradas. En este contexto es de vital importancia remarcar que cuando se utilizan aceros patinables las reglas del "buen diseño" deben ser rigurosamente cumplidas ya que en caso contrario los resultados pueden llegar a ser catastróficos. Cualquier error de diseño o fabricación que incorpore, por ejemplo, una rendija conducirá a una temprana falla de la estructura por corrosión localizada.

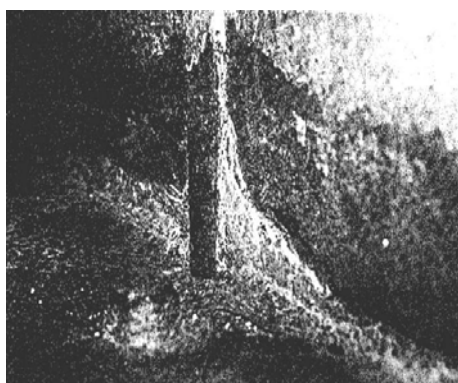
Por otra parte, cuando se debe combatir la corrosión de una estructura en zonas de difícil acceso es común el uso de **aceros aleados de alta resistencia**, como son los aceros inoxidable. Sin embargo, su aplicación es poco aconsejada en ambientes marinos. Por otra parte, su alto costo hace que su empleo se vea limitado a casos críticos como, por ejemplo, en partes estructurales de difícil o nulo acceso para operaciones de mantenimiento. En estos casos, el acero inoxidable es una alternativa altamente ventajosa.

FALLAS ESTRUCTURALES POR CORROSIÓN

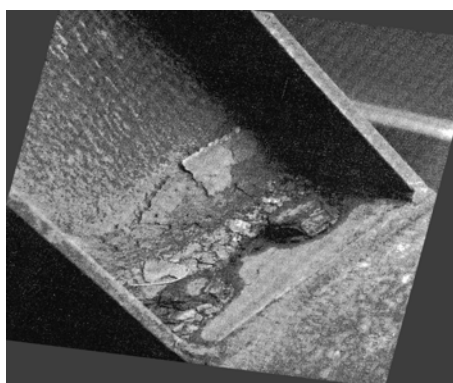
Con el propósito de ilustrar los principios generales discutidos precedentemente y determinar las medidas preventivas o de protección que deberían haberse tomado para evitarlos, en esta sección se presentarán algunos ejemplos de falla y problemas ocurridos en estructuras metálicas.

En general, las fallas por corrosión de estructuras de acero convencional protegidas por alguno de los métodos mencionados precedentemente son poco frecuentes, salvo en casos donde el nivel de humedad haya sido muy elevado o la contaminación con cloruros muy importante.

En cambio, el uso de aceros patinables ha causado considerables problemas, particularmente en casos donde no han sido tenidas en cuenta sus limitaciones al momento de hacer la selección del material. Un ejemplo de ello puede observarse en la **Figura 5**, donde se presentan detalles de piezas estructurales pertenecientes a un estadio deportivo ubicado a 300m del mar. En dicha estructura, tanto las zonas expuestas a la atmósfera como las áreas ubicadas debajo de las gradas fueron construidas con aceros patinables. Como consecuencia de ello, a un relativamente corto tiempo de servicio un importante deterioro por corrosión localizada fue detectado en zonas de la estructura emplazadas debajo de las gradas. La **Figura 5-a** muestra el ataque sufrido en una zona de la estructura en la cual la circulación de aire era muy pobre y no se producían los ciclos de mojado/secado necesarios para el adecuado desarrollo de la pátina protectora, en tanto que en la **Figura 5-b** se presenta el detalle de un elemento estructural en el cual no fueron tenidos en cuenta los efectos de la formación de rendijas y el estancamiento de agua. Este ejemplo sirve para resaltar los factores relevantes que no pueden ser desestimados por el proyectista al seleccionar un acero patinable como material estructural. Es decir, la pátina sólo puede desarrollarse adecuadamente durante su exposición atmosférica y el ambiente marino no es el más adecuado para generar la formación y crecimiento de una cubierta protectora. Esta bien establecido que el comportamiento óptimo de estos materiales se observa en ambiente industriales con alto contenido de sulfuro.



a



b

Figura 5.-Detalles de las zonas de falla por corrosión en el material estructural

Relevamientos recientes del estado de algunos puentes de hierro construidos en la provincia de Buenos Aires entre 1870 y 1950 permitirán analizar las posibles patologías que pueden presentar estas estructuras. En la **Figura 6** se presenta la estructura colapsada de un puente de hierro forjado construido en 1905, ubicado sobre el río Samborombón en la ruta 59 a 15km de la Estación Gándara en el Partido de Chascomús. Si bien la atmósfera a la cual estaba expuesta la estructura resultaba poco agresiva, el origen del desastre fue el fallo por corrosión de un tensor de la estructura resistente del puente. La pieza mencionada era, originariamente, una barra cuadrada de acero de 26mm de lado, con un ojal en el extremo de encastre al soporte de la viga. La **Figura 7** pone en evidencia el alto grado de deterioro por corrosión sufrido por ésta en la zona del ojal. Dada su ubicación en la estructura (**Figura 8**) y la geometría de la zona de anclaje, la degradación pudo ser motivada por la formación de rendijas que facilitaron la acumulación de tierra y agua y el desarrollo de un proceso de corrosión por aireación diferencial.



Figura 6 – Estructura colapsada del puente emplazado sobre el río Samborombón



Figura 7 – Estado de la pieza que dio origen a la falla de la estructura

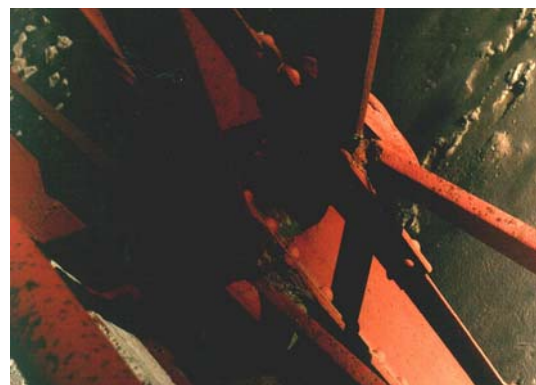


Figura 8 – Emplazamiento de la pieza en la estructura

Otro caso digno de mención, aunque totalmente opuesto al anterior, lo constituye el puente La Postrera, construido en 1874 sobre el curso del río Salado. Es el puente más importante del Plan de Construcción de Puentes implementado

durante el gobierno de Emilio Costa. Tiene 170m de desarrollo y 11m de ancho. Fue construido en hierro forjado de acuerdo a un sistema modular prefabricado con estribos metálicos construidos en Gales bajo proyecto y supervisión del Ing. L. Huergo; previo a su utilización fue protegido con una pintura de minio al aceite. Si bien en el marco del mencionado Plan fueron construidos alrededor de 60 puentes, sólo quedan en pie una docena de ellos de los cuales sólo La Postrera está, además, en uso.

Datos históricos indican que en 1895 tuvo una reparación importante, especialmente en los taludes de tierra y, más recientemente, debido al avance de la corrosión, se reforzó la vinculación de los pilotes con tabiques de hormigón. El estado actual de la estructura se muestra en la **Figura 9**. Un relevamiento realizado en el año 2001 permitió determinar que la mayor amenaza que sufre la estructura es debida al efecto conjunto del desarrollo de corrosión en el sistema de arrostre de los pilotes y a la ausencia de control de carga, ya que no existe restricción alguna. Por otra parte, la permeabilidad de la calzada es otro problemas a resolver en su conservación y puesta en valor.



Figura 9 – Vista actual del puente La Postrera sobre el río Salado

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- ASM Handbook, Vol 13-*Corrosion*. 9th edition. ASM International, (1992).
- Fontana, M.G., *Corrosion Engineering*. Mc Graw Hill, (1980).
- Trethewey, H.R. and Chamberlain, J., *Corrosion for Science and Engineering*. Longman, (1995).
- Shrier, L.L., Jarman, R.A. and Burstein, G.T., *Corrosion*, Vol. 1 y 2. Butterworth-Heinemann, (1977).
- Jones, D.A., *Principles and Prevention of Corrosion*. Macmillan Publishing Company, (1992).
- Pourbaix, M., *Lecciones de Corrosión Electroquímica*. Instituto Español de Corrosión y Protección, (1979).