

CORROSIÓN METÁLICA. CASOS ESPECÍFICOS

METAL CORROSION. SPECIFIC CASES

Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

E. mail: raarivas@hotmail.com

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería-Universidad de San Carlos de Guatemala,
Ciudad Universitaria, zona 12, 01012, Ciudad de Guatemala, Centro América.

Recibido 17/08/2020; Aceptado: 02/12/2020

Resumen: Debido a la degradación de los materiales de la maquinaria y equipo, así como de la infraestructura en general, en cuyo diseño, construcción y utilización se ven permanentemente inmersos los Ingenieros, se investigan diversos tipos de corrosión, en casos reales.

La selección de los casos que afectan directamente a la referida infraestructura se realizó a través de resultados de actividades de inspección de fallas en estructuras de vivienda, investigación aplicada, deterioro de sistemas específicos de conducción y almacenamiento de fluidos, entre otros, con apoyo de la aplicación de metalografía y de ensayos no destructivos.

En función de lo anterior, se hace un análisis científico técnico de varios casos de corrosión, a través de sus características metalúrgicas y se señalan algunas formas de prevención, ya que este fenómeno contribuye al deterioro de los sistemas metálicos, empobreciendo el concepto de la sostenibilidad ambiental y aumentando el costo operativo de la infraestructura.

Palabras clave: Corrosión, potencial electroquímico, medio ambiente, pares galvánicos, electrólisis.

Abstract: Due to the degradation of machinery and equipment materials, as well as the infrastructure in general, in whose design, construction and use engineers are permanently immersed, various types of corrosion are investigated, in real cases.

The selection of cases directly affecting the aforementioned infrastructure was carried out through results of failure inspection activities in housing structures, applied research, deterioration of specific fluid conduction and storage systems, among others, supported by the application of metallography and non-destructive testing,

Based on the above, a technical scientific analysis of various corrosion cases is made, through their metallurgical characteristics and some forms of prevention are noted, since this phenomenon contributes to the deterioration of metal systems, impoverishing the concept of environmental sustainability and increasing the operational cost of the infrastructure.

Keywords: Corrosion, electrochemical potential, environment, galvanic pairs, electrolysis.

1. Introducción

Debido a los efectos del medio ambiente o a la interacción con otros sistemas, en una gran cantidad de casos, la mayoría de los materiales metálicos sufren de una degradación o deterioro producidos por una reacción electroquímica conocida como **corrosión**.

Estos metales, en contacto con los medios citados, forman un sistema termodinámicamente inestable tendiendo a retornar a su estado original en forma de óxidos, lo cual afecta directamente a los procesos ingenieriles. Por otro lado, los metales nobles en condiciones de alta pureza no se ven afectados por el fenómeno, debido a sus condiciones de equilibrio con la naturaleza.

La corrosión, en cualquiera de sus manifestaciones, como las que se analizan más adelante, perjudica directamente a las acciones de preservación y sostenibilidad del medio ambiente contribuyendo al deterioro de la infraestructura metálica en general.

Con base en lo anterior, se hace referencia a las investigaciones sobre algunos casos específicos de dicho fenómeno.

Agradecimiento

A las empresas SIE Ltda. – Ensayos no destructivos –, e INDESA – Ingeniería, Investigación y Desarrollo –, por su aporte de la información específica en cuanto al fenómeno de la corrosión.

2. Marco Teórico

Chalmers B. (1968), indica que: la separación de metal de la superficie de un sólido a temperaturas inferiores a la del sólido, tiene lugar por un proceso de disolución en el que iones del metal pasan a la fase adyacente, que debe ser un líquido. La fuerza impulsora de una reacción de disolución puede ser química, en cuyo caso disminuye la energía del sistema por disolución de parte del sólido, o electrolítica si el trabajo necesario para aumentar la energía libre se suministra por medio de una corriente eléctrica aplicada exteriormente. Debe notarse que, aunque el mecanismo real de separación del metal sea electrolítico, que es un caso frecuente, la fuerza impulsora es química si la reacción progresa sin la presencia de un suministro externo de energía (p. 282).

Galvele y Duffó (2007), indican que el estudio de la corrosión consiste en la investigación del deterioro de los materiales por el medio en el que son usados. Sin recurrir a medios muy agresivos, sino considerando solamente la atmósfera, se encuentra que la mayoría de los metales en contacto con el medio ambiente forman un sistema termodinámicamente inestable. Con la única excepción de unos pocos metales, llamados nobles (oro, platino, etc.), todos los demás metales en contacto con el aire reaccionan y, si se les da suficiente tiempo, se transforman en óxidos u otros compuestos (p. 14).

Kowaka M. (1990), indica que la corrosión metálica es debida a una reacción electroquímica. Los metales y aleaciones pueden tener una buena resistencia a la corrosión, dependiendo de las condiciones del medio en que se encuentran, pero están sujetos al ataque corrosivo si se les cambia de medio. En consecuencia, ningún material metálico es totalmente inmune al fenómeno. De igual manera, realiza la división de los tipos de corrosión en dos grandes grupos que dependen del medio en que se desarrolla: húmedos y secos, y establece la división de ambos tipos de corrosión en función de su morfología (p. 1-4; 9-13).

Cortez K. (2014), realizó ensayos de prevención de la corrosión en los laboratorios de metalurgia de la EIM de la FIUSAC, con recubrimientos electrolíticos de cobre en probetas de acero al bajo carbono, haciendo análisis metalográficos de los mismos con resultados positivos. Los procedimientos y resultados se citan al final del presente trabajo.

Aguilar R. (2019), hace un análisis generalizado de las características fundamentales del fenómeno de la corrosión, reforzado con ejemplos prácticos tipificados de ocurrencia y prevención en el medio nacional, con la recomendación de metodologías de prevención.

El presente artículo se fundamenta en la investigación de casos reales de ocurrencia y prevención del fenómeno de la corrosión.

3. Desarrollo del Estudio

3.1 Metodología

Para la consecución de información de eventos representativos de los diversos tipos conocidos de corrosión, se realizó un análisis exhaustivo de casos específicos encontrados por el suscrito durante la práctica profesional, mediante diagnósticos de fallas, montaje, mantenimiento y operación de varias plantas, con apoyo de la práctica metalográfica y aplicación de Ensayos No Destructivos (END). Por otro lado, se hizo uso del método experimental por medio de ensayos empíricos de laboratorio. Posteriormente se procedió al análisis de cada caso en particular, identificándolo por su morfología, recomendándose al final algunas metodologías de prevención.

4. Resultados y Discusión

4.1 Corrosión química por el medio ambiente

Se visitaron varias construcciones dañadas por el efecto de la corrosión a la orilla del mar, encontrándose efectos de corrosión uniforme generalizada, en las barras de refuerzo para construcción, como puede apreciarse en la Fig. 1.

La corrosión generalizada en los aceros muestra la tendencia total de este metal a expandirse superficialmente. Debido a que los óxidos producidos aumentan su volumen, la expansión ejerce presión sobre los elementos de hormigón armado, el cual se fractura debido a la presión interna, mientras las varillas de acero, que quedan expuestas a la intemperie se degradan por la corrosión. El fenómeno se debe a la permeabilidad del concreto que permite la penetración de humedad salina, induciendo la corrosión.



Figura 1. Corrosión y fractura en estructuras de concreto, en la playa “El Paredón Buena Vista”, Sipacate, Escuintla. Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Corrosión y fractura en estructuras de concreto, igual al caso anterior. En el mismo lugar. Fuente: elaboración propia.

En las figuras 1 y 2, pueden apreciarse fracturas y desprendimiento del concreto producidas por los efectos de la expansión debida a los productos de la corrosión en columnas y vigas de concreto en residencias cercanas a la orilla del mar.

4.2 Corrosión química directa

Para visualizar metalográficamente el efecto directo de la corrosión por ácidos, se procedió a sumergir una probeta de acero A1020 en un recipiente con ácido nítrico al 30% de concentración, durante 24 horas, en el laboratorio de metalografía, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la USAC, habiéndose obtenido como resultado corrosión uniforme o generalizada y corrosión por picaduras. La figura 3 muestra los resultados del ensayo.

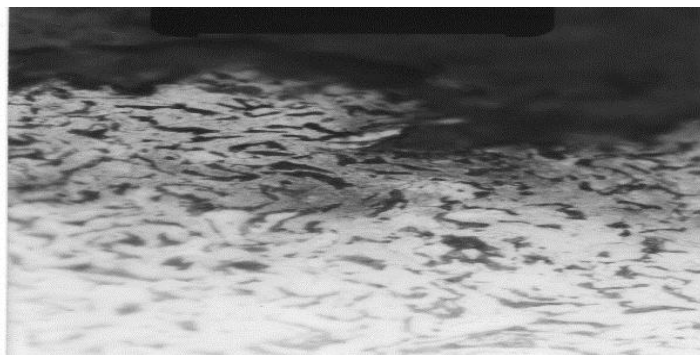


Figura 3. Metalografía mostrando el efecto de la corrosión uniforme y corrosión por picaduras producida por el ataque de ácido nítrico, sobre un acero de bajo carbono. 300X. Fuente: laboratorio EIM. FIUSAC.

4.3 Corrosión galvánica

Un par galvánico se forma cuando entran en contacto dos elementos de diferentes potenciales electroquímicos y a estos también se les llama celdas galvánicas, las cuales pueden clasificarse en tres grupos diferentes, a saber: (1) celdas de composición, formadas por dos materiales diferentes, (2) celdas de esfuerzo, cuando las fronteras de grano de un metal o aleación han sido corroídas y se forma el par con el propio grano y (3) Celdas de concentración en las cuales se acentúa la corrosión en donde la concentración del electrolito es más baja. (Van Vlack, 1985).

En los metales de dos o más fases, cada fase con sus propiedades individuales posee su propio potencial electroquímico, por lo que en la mayoría de las aleaciones de dos fases, en presencia de un electrolito, pueden establecerse las celdas galvánicas.

Se analizaron los efectos del contacto con el suelo de una tubería de acero al carbono, para conducción de agua. La degradación se aprecia en la figura 4.



Figura 4. Corrosión combinada, uniforme y por picaduras, en una tubería de acero al carbono para conducción de agua en contacto con el suelo húmedo. Fuente: Archivos SIE-INDESA, 2019.

Puede notarse la presencia de la corrosión generalizada y por picaduras en la tubería, inducida por la humedad del suelo actuando como electrolito. Las fases presentes de las estructuras metalográficas del acero, en este caso ferrita y cementita, al conformar pares galvánicos, inducen la corrosión. La parte de atrás de la tubería se encontró rotalmente libre de efectos corrosivos.

Casos como el presente, suelen presentarse también internamente en tuberías de acero al carbono empleadas para transporte de hidrocarburos, en donde la corrosión generalizada se intensifica más.

4.4 Corrosión intergranular

En los aceros inoxidable, principalmente los austeníticos, se presenta un tipo de corrosión conocido como intergranular, el cual se produce en los bordes de grano, y puede avanzar en otros sentidos dando origen a la corrosión transgranular o intragranular. El fenómeno se presenta en su mayoría durante los procesos de soldadura debido a los efectos de las altas temperaturas, o temperaturas sin control. En la soldadura de este tipo de aceros debido a la falta de control de las temperaturas de operación, se produce un fenómeno perjudicial conocido como sensibilización (actualmente se acepta el término sensitización, adaptado del inglés sensitized), que en realidad no tiene que ver con la soldabilidad de los materiales, sino que depende del desconocimiento del operario de las variables ingenieriles que entran en el proceso.

El fenómeno se presenta cuando, durante la soldadura, se producen temperaturas muy altas en la zona afectada por el calor, debido al aporte calórico; esto provoca que se formen carburos de cromo que migran hacia los bordes de grano, dejando a las estructuras austeníticas, cercanas a dichos bordes, empobrecidas en el cromo necesario para resistir la corrosión, muy susceptibles a dicho fenómeno. La corrosión, en las zonas adyacentes a los límites de grano, en donde se depositan los carburos de cromo (Cr_{23}C_3), se produce fácilmente debido a descarburación. De igual forma, el fenómeno se produce si se calienta el material austenítico entre 600 y 800 °C.

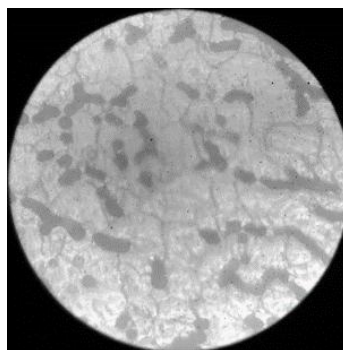


Figura 5. Corrosión en acero A304 sensibilizado y atacado con ácido oxálico al 10%. 100X.
Fuente: Celada E. 2015.

En la figura 5, puede apreciarse el fenómeno mediante la observación de la micrografía correspondiente a una probeta de acero AISI 304, recocida durante una hora a 650 °C dentro del horno y, posteriormente atacada con ácido oxálico durante 3.5 minutos.

4.5 Efecto de la temperatura sobre la corrosión

El efecto general del aumento de temperatura es el incremento de la velocidad del proceso de corrosión. Esto se debe a que la velocidad de los procesos químicos, tales como la disolución, es más rápida a temperaturas elevadas. También las solubilidades aumentan con la temperatura. Hay casos en que un aumento de temperatura altera totalmente todo el proceso.

En la figura 6, se aprecia el efecto de corrosión por placas, o exfoliada, producido en un crisol de acero al carbono, para galvanización de chapas (láminas), por inmersión continua en caliente. Este proceso se desarrolla regularmente arriba de los 450°C, temperatura de operación del baño de zinc. El sistema en conjunto alcanza temperaturas superiores.

Debe tenerse en cuenta que para que el fenómeno suceda debe existir un medio corrosivo. En este caso, vapores del flux empleado durante el proceso.



Figura 6. Corrosión por placas o exfoliada, producida por efecto de un agente corrosivo a altas temperaturas, arriba de 500°C (parte externa del crisol). Fuente: Archivos SIE - INDESA, 2019.

4.6 Corrosión bajo tensión

Conocida también como corrosión fisurante, se presenta cuando un metal está sometido simultáneamente a la acción de un medio corrosivo y de tensiones mecánicas de tracción, como el caso de tanques sometidos a presión interna. Se forman fisuras que pueden ser transgranulares o intergranulares y que se van propagando hacia el interior del metal, hasta que las tensiones se relajan o el metal se fractura.

En la fig. 6, correspondiente a inspección con tintas penetrantes, en un tanque de acero austenítico, se nota una falla consistente en una fisura continua en la zona afectada por el calor, HAZ.

Se aprecia claramente el efecto corrosivo produciendo la fisuración en la zona afectada por el calor (ZAC), (o HAZ por sus siglas en inglés), y la fisuración transgranular en la chapa austenítica.

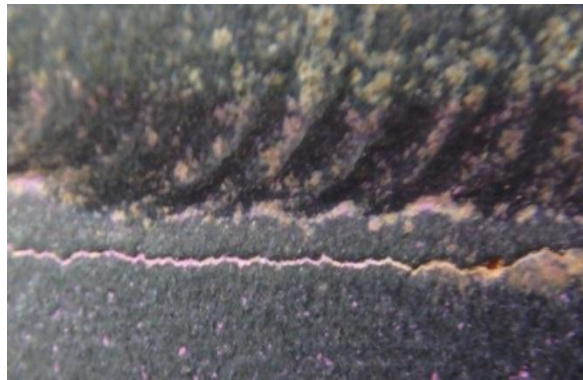


Figura 7. Corrosión transgranular bajo tensión en un tanque de acero austenítico, para almacenamiento de derivados de petróleo. Fuente: archivos SIE-INDESA, 2019.

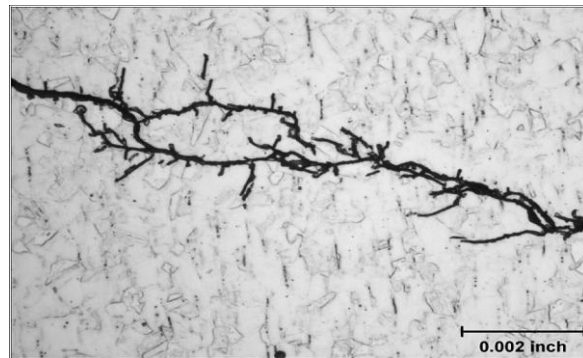


Figura 8. Metalografía de la misma falla sobre la matriz austenítica. Fuente: archivos SIE-INDESA, 2019.

5. Procesos de prevención de la corrosión

Varios son los métodos de prevención y disminución de los efectos de la corrosión en los diferentes sistemas expuestos a la misma, que van desde la utilización de pinturas especiales, hasta el empleo de protecciones catódicas.

A continuación se citan varios casos reales de protección, haciéndose énfasis en uno de los casos, quizá el de mayor confiabilidad, como lo constituyen las superficies protectoras.

5.1 Superficies protectoras

El empleo de las superficies protectoras es, quizá, el método más antiguo, principalmente el uso de las pinturas especiales para tal fin. El objetivo es producir el aislamiento del material del electrolito.

En el caso de la utilización de pinturas, debe ponerse especial atención a las características del comportamiento de las mismas durante el servicio. La adherencia y el comportamiento mecánico son los factores que más influyen en la obtención de buenos resultados. Las altas temperaturas o el desgaste por abrasión imponen limitaciones a estos procedimientos.

El mejor papel, en el caso de los recubrimientos de superficie, lo juegan los recubrimientos metálicos. El zinc, el estaño, el cobre, el níquel y la plata son los metales más utilizados como protección; pueden ser utilizados en formas de pinturas, por deposiciones electrolíticas o por inmersión en caliente. Como ejemplo puede citarse el proceso de inmersión en caliente en baños de cinc, manuales y automáticos, utilizados ampliamente en la industria nacional para la producción de chapas galvanizadas para techos de viviendas (laminas galvanizadas), en la industria de la construcción. También los materiales cerámicos inertes pueden ser utilizados como recubrimientos protectores. Por ejemplo, los verdaderos esmaltes son recubrimientos de óxido aplicados como vidrio pulverizado y fundidos para dar una capa de superficie vítrea.

La *pasivación*, que es un fenómeno de autoprotección de algunos metales contra la corrosión, consiste en la formación de un recubrimiento protector al formarse una capa de óxido superficial que no permite el avance de la corrosión. El caso del aluminio y del acero inoxidable constituye un buen ejemplo de este fenómeno. Se establece en la superficie del metal una capa protectora monomolecular rica en oxígeno.

Cortez A. Kelly. 2014, desarrolló un procedimiento experimental, dentro del proyecto de investigaciones metalúrgicas de la EIM, diseñando un equipo piloto para ensayo de recubrimientos metálicos electrolíticos, empleando probetas de acero como cátodo y cobre como recubrimiento, procedente de un ánodo del mismo metal construido para el efecto, llegando a la conclusión que la calidad de dichos recubrimientos empleados como protectores depende, entre otros factores que podrían ser considerados como secundarios, esencialmente de la pureza del recubrimiento utilizado como ánodo, de la concentración del electrolito empleado, y del tiempo y la intensidad de corriente de la electrolisis inducida. La figura 9 indica, de izquierda a derecha, la secuencia de calidad obtenida en varias probetas con la variación de los parámetros indicados.



Fig. 9. Recubrimiento electrolítico de cobre, sobre barras de acero al carbono. Fuente: Cortez K. 2014.

A continuación se muestran las micrografías de los recubrimientos de las probetas P3, P4 y P5, con las siguientes características:

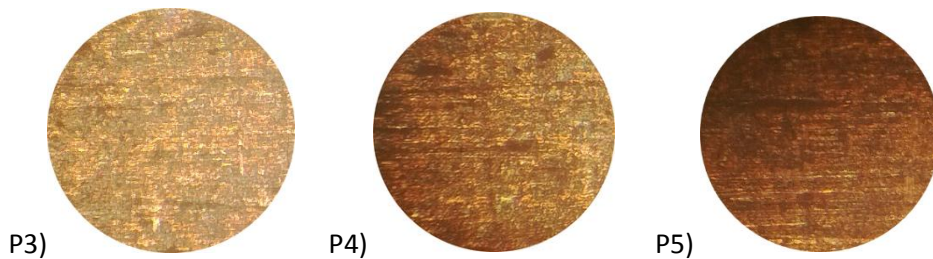


Fig. 10. Micrografías de las probetas p3, p4 y p5. Mejoramiento de la electrodeposición en función del tiempo de exposición a la electrólisis. 5X. Fuente: Cortez K. 2014.

En las micrografías puede notarse la diferencia de la calidad del recubrimiento en función del tiempo:

P-3) tiempo de exposición [3 min] la intensidad del color del cobre es baja, sin embargo, se puede observar que es uniforme.

P-4) Se puede observar que no existen rayas ni manchas sobre la superficie. Mayor intensidad del color del cobre, tiempo de exposición [6 min].

P-5) Presenta fuerte adherencia y un color rojizo, esto se debe al tiempo de exposición [12 min] y buen acabado superficial de la pieza.

5.2 Otros procesos de prevención

- a) El empleo de pinturas impermeables es de gran ayuda en el caso de las construcciones en las cercanías del mar, o de ambientes salinos. Este tipo de pinturas es fácil de conseguir en el mercado local, y pueden ser las mismas empleadas como impermeabilizantes para terrazas en general. Requieren de mantenimiento continuo.
- b) De igual manera se puede retrasar el efecto de la corrosión en las tuberías para conducción de líquidos, como en el caso 4.3, fig. 4, empleando pinturas especiales y evitando el contacto directo de las tuberías con el suelo, mediante el empleo de alzas.
- c) El recubrimiento metálico por medio de procesos como galvanización por inmersión en caliente o electrólisis, con metales de diferente potencial electroquímico es muy empleado y se aprecia claramente en el ejemplo de las figuras 9 y 10.
- d) La protección galvánica se emplea muy comúnmente en el caso de tuberías y de navíos. Es importante la inspección permanente de este tipo de protecciones, ya que sufren desgaste y degradación en función del tiempo y del ambiente a que se exponen.
- e) En el caso de la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, fig. 4, el problema se enfrenta evitando el efecto de la sensibilización durante el proceso, que consiste en evitar las altas temperaturas, impidiendo así la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, lo cual empobrece la cantidad de cromo en el resto de los granos y debilita la resistencia a la corrosión por ataque intergranular.

6. Conclusiones

1. De los aspectos analizados, se observa que el fenómeno de la corrosión es un proceso de degradación metálica irreversible, cuyos efectos son escasamente reparables a costos muy altos, por lo que su prevención o retardamiento constituye el único camino de contrarrestarlo.
2. La forma o tipo de corrosión depende de los materiales afectos, del medio ambiente en que se encuentran y del tipo de interacción entre ambos.
3. Cuando intervienen procesos intermedios entre los materiales y medio ambiente, como en el caso de la soldadura o los tratamientos térmicos, debe tenerse conocimiento total de las variables involucradas para evitar, en la mejor forma posible, los efectos del fenómeno.

7. Recomendaciones

A los investigadores en el tema de la corrosión :

Apoyándose en los resultados de las investigaciones citadas y en los problemas expuestos en las referencias, continuar con las investigaciones del fenómeno basándose en casos reales.

A los sectores involucrados (usuarios, industria y profesionales de la ingeniería):

Realizar los estudios e investigaciones correspondientes, en casos reales que involucran a cada sector o a su interacción, para contribuir al control adecuado de efectos específicos de la corrosión, bajo el concepto de **sostenibilidad y desarrollo**.

8. Referencias Bibliográficas

Aguilar Rivas Roberto. Fundamentos básicos de corrosión y aceros inoxidables. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. EIM-FIUSAC. 2019. Guatemala. 52p.

API Recommended Practice 571. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. 2011.

API Recommended Practice 574, Inspection Practices for Piping System Components. 2009.

Celada Estuardo. Ensayos de Soldadura al arco con electrodo revestido de acero inoxidable austenítico AISI 304. Tesis de Maestría. EIM-FIUSAC. 2015. Guatemala.

Cortez Kelly. Diseño de un módulo de electrodeposición metálica por medios electrolíticos. Trabajo de graduación. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. EIM-FIUSAC. 2014. Guatemala.

Chalmers Bruce. Metalurgia Física. Editorial Aguilar. 1968. Madrid, España. P. 282-293.

Galvele J. R. y Duffó G. S. Degradación de materiales—Corrosión. Instituto Sábato, UNSAM—CNEA. 2007. Argentina. P. 14-40.

Kowaka Masamichi “Metal Corrosion Damage and Protection Technology”. Allerton Press, Inc., 1990. P. 1-40.

SIE LTDA. — INDESA. Archivos de resultados de análisis de fallas con aplicación de END y Metalografía. 2019. Guatemala.

Van Vlack L.R. Materiales para Ingeniería. C.E.C.S.A. 1985. México. pp. 460-490.