

CORROSIÓN: INEXORABILIDAD VERSUS DURABILIDAD

Corrosion: inexorability versus durability

*Por/ by Isabel Díaz Tang**

En general, un material tenderá a corroerse espontáneamente en un determinado medio si los productos de corrosión son más estables que el material de partida, o si bajo las condiciones de exposición la corrosión resulta favorecida. En la práctica, lo que se busca es extender la vida útil de estructuras, equipos o dispositivos, es decir, mejorar su durabilidad.

Palabras claves: Corrosión, protección contra la corrosión, durabilidad.

In general, a material will tend to corrode in a specific environment when the corrosion products are more stable than the starting material or, when exposed to certain conditions, a corrosion process results favored. In general practice, the goal is to extend the service life of structures, equipment or devices, that is, to improve their durability.

Keywords: Corrosion, corrosion protection, durability.

Hay quienes sostienen que las predicciones sobre la inexorabilidad de la corrosión de los materiales metálicos son de muy antigua data; algunos incluso se atreven a sugerir que la frase bíblica “*Polvo eres y en polvo te convertirás*” (Génesis 3:19) fue no solo una sentencia punitiva dada a los primeros habitantes del planeta, sino que resultó siendo una suerte de premonición de lo que acontecería con cualquier metal que fuese obtenido a partir de minerales encontrados en la naturaleza. ¿Será verdad?

¿Por qué se corroen los metales?

Esa es, quizás, la pregunta que encabeza la lista de ‘preguntas frecuentes’ en materia de corrosión. Elaborar una respuesta que sea comprensible para cualquier persona no es tarea sencilla.

Entre químicos, podría bastar decir que si un material metálico entra en contacto con un medio y bajo determinadas condiciones puede o no producirse corrosión, dependiendo de la estabilidad relativa de reactivos y productos (bajo control termodinámico), o de si el proceso de corrosión resulta favo-

recido entre otras opciones (bajo control cinético).

Para no especialistas, proponer situaciones ‘prácticas’ puede resultar más ilustrativo. En el caso de los metales más conocidos, por ejemplo, la mayoría puede diferenciar entre los llamados metales ‘preciosos’ y los ‘comunes’. Los primeros – tales como oro, plata, platino, osmio, etc. (**Figura 1**) – se encuentran en la naturaleza como tales; esto significa que su estado más estable al contacto con el aire, la humedad, la luz y otras condiciones naturales, es el estado metálico. Por ello, si uno expone a las mismas condiciones un artículo fabricado con dichos metales puros (joyas, vajillas, monedas u otros) permanecerán incólumes.

Del otro lado están aquellos metales que se encuentran en forma oxidada en la naturaleza, habitualmente en forma de minerales. Para obtener estos metales a partir de los minerales es necesario invertir energía (por ejemplo, mediante procesamiento de minerales de hierro en altos hornos). Cuando dichos metales (o algunas de sus aleaciones) son luego conformados y procesados para fabricar herramientas, utensilios, o grandes estructuras, y son expuestos al ambiente, su tendencia natural será la de retornar a su estado más estable, que era la forma oxidada (**Figura 2**). En otras palabras, dichos metales, a los que se les considera ‘activos’, tenderán a corroerse espontáneamente.

Se han proporcionado explicaciones sencillas de por qué algunos metales se corroen y otros no cuando son ex-

*Isabel Díaz Tang es la directora del Instituto de Corrosión y Protección (<http://icp.pucp.edu.pe>) de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Es licenciada en Química y especialista en corrosión. (e-mail: idi@pucp.edu.pe)

Figura 1. Ejemplos de metales que resisten a la corrosión (a) Oro nativo parcialmente embebido en una ganga de cuarzo y, debajo, máscara inca de oro, (b) Osmio nativo (arriba) y punta de pluma fabricada en una aleación de osmio (debajo). (Fuentes: (a) © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons) y Bernard Gagnon, respectivamente; (b) hight3ch.com y Canadian Nuclear Association (CNA), respectivamente)

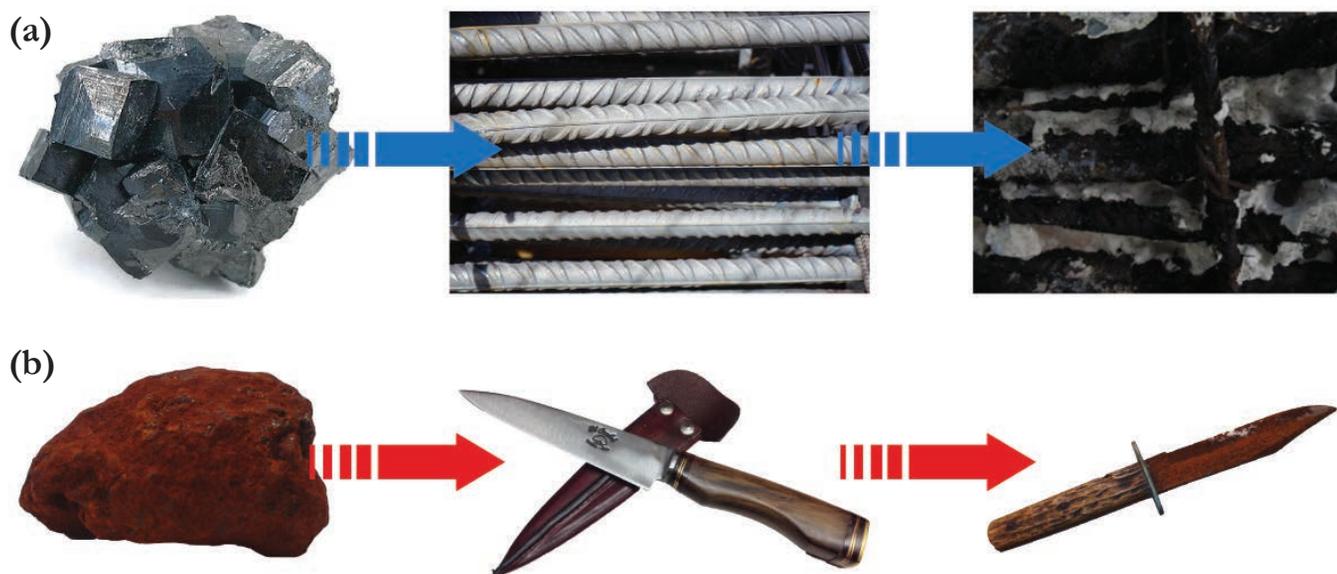
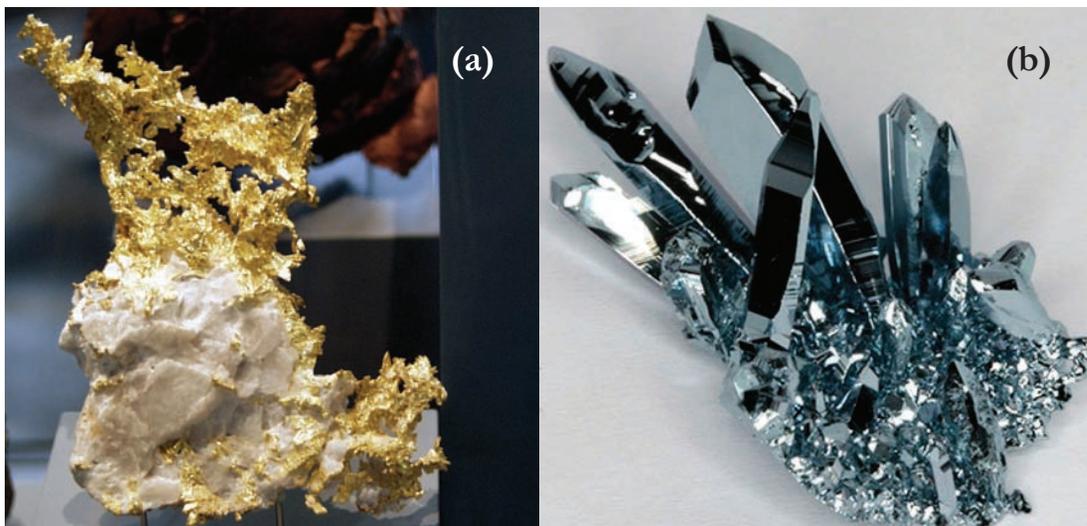


Figura 2. El ciclo de los metales activos (a) Magnetita → barras de acero para construcción → barras corroídas; (b) hematita → cuchillo de acero → cuchillo oxidado. (Fuentes: (a) Rob Lavinsky, www.iRocks.com (📧) – CC-BY-SA-3.0; Pixabay.com, archivo ICP-PUCP; (b) wikia.com (📧), CC-BY-SA-3.0; www.classicboat.co.uk (📧); stock7000)

puestos a la intemperie. Sin embargo, en un contexto más amplio, la realidad es que **cualquier material metálico es susceptible de corroerse**. Todo depende del medio con el cual esté en contacto y bajo qué condiciones.

¿Sólo se corroen los metales? Claro que no, desde hace algunas décadas se ha reconocido que otros materiales también pueden corroerse, si bien a través de distintos mecanismos: plásticos, vidrios, cerámicos, materiales compuestos, elastómeros, etc. Con frecuencia, cuando se trata de otros materiales, suelen utilizarse los términos 'deterioro', 'degradación' o 'descomposición' (**Figura 3**). Si se toma en cuenta una definición estandarizada de corrosión para el caso de materiales metálicos, se concluye que es igualmente aplicable a otros materiales:

"Interacción fisicoquímica entre un metal y su entorno, que produce modificaciones en las propiedades del metal y que puede conducir a una degradación significativa de la función del metal, del medio en contacto con él, o del sistema técnico del cual ambos forman parte"¹.

Nótese que el concepto moderno admite que la corrosión de un material no necesariamente implica su destrucción o un deterioro severo (aunque esa sea su faceta más conocida). Para describir con mayor precisión el tipo de 'cambio' que ha experimentado un metal u otro material debido a un proceso corrosivo han sido definidos términos tales como 'pasivación', 'opacamiento', 'descamación' y 'fragilización', entre otros. Algunos nombres pueden resultar menos alarmantes para no especialistas que escuchar hablar de 'corrosión', pero es el experto en corrosión, el patólogo de los materiales, quien determinará si se trata de un problema – y su severidad – o si se está frente a un caso de corrosión con el que se podría convivir.

Corrosión: ¿Prevención, protección o convivencia?

"Prevenir" sería una respuesta intuitiva: evitar que se produzca, que nada se corra. Pero la toma de decisiones en la práctica está influenciada por diversos factores, siendo el económico uno de los más importantes.

La utilización de materiales altamente resistentes a la corrosión en determinados medios agresivos sólo se justifica en algunos casos debido a sus altos costos. En general, se considera que debe evitarse la corrosión cuando sus consecuencias son graves para la salud (en instrumental quirúrgico e implantes y en el procesamiento de alimentos, por ejemplo), o pueden poner en riesgo la vida de personas (por explosiones, fugas de sustancias tóxicas, colapso de estructuras) o causar catástrofes ambientales, como en el caso de derrames

1. The International Organization for Standardization: "*Corrosion of metals and alloys - Basic terms and definitions. Standard ISO 8044:2015*". 2015. (📄)

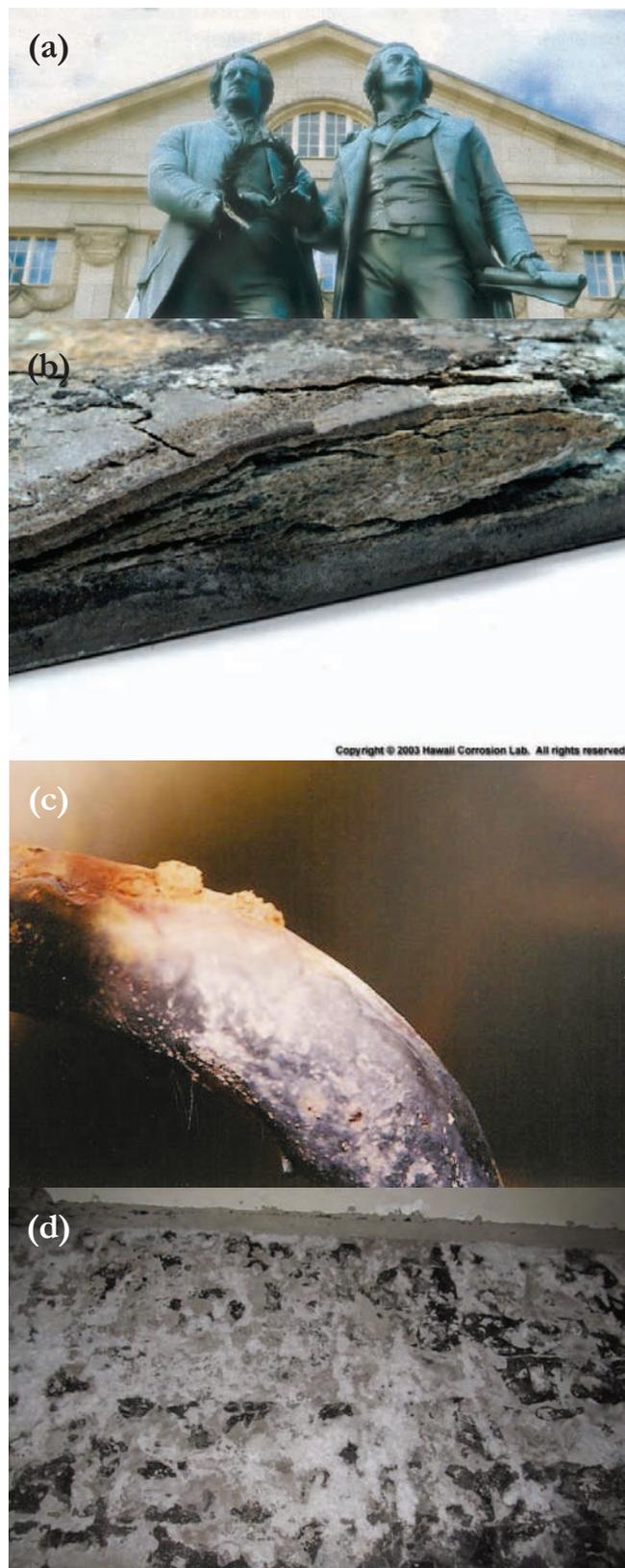


Figura 3. (a) Pasivación: Estatua doble de Goethe y Schiller fabricada en 1857 en Weimar, Alemania, que muestra el efecto protector de la formación de una capa de cobre oxidado sobre la aleación original, (b) Corrosión exfoliante (o en capas) en una aleación de aluminio. (c) Tubérculos (pústulas) debidos a la corrosión inducida microbiológicamente en una escalera de acero pintado sumergida en agua de regadío y (d) eflorescencias salinas sobre muro de concreto lixiviado por aguas blandas. (Fuentes: (a) archivo de la autora, año 1999, (b) Hawaii Corrosion lab, <http://hawaii corrosionlab.org/> (📄), reproducida con permiso, (c) y (d) archivo ICP-PUCP)

de petróleo. También se persigue evitar la corrosión en el caso de estructuras importantes.

Para estos fines se cuenta con diversas opciones, además de la selección de materiales costosos. Una de ellas apela a la termodinámica: llevar a una estructura a un estado en el cual sea termodinámicamente imposible que se corra. Este método de prevención de la corrosión, llamado 'protección catódica por corriente impresa', consiste en polarizar electroquímicamente una estructura (con ayuda de una fuente de corriente continua) hasta un valor de potencial al cual el estado metálico es el más estable. En otras palabras, se la convierte en el 'cátodo' de una pila de corrosión. Así están protegidas las tuberías de acero enterradas que transportan crudo en el Oleoducto Norperuano, por ejemplo. Otra opción se basa en evitar que se forme una pila de corrosión; esto puede conseguirse usando materiales eléctricamente aislantes entre los que serían el ánodo y el cátodo de la pila, o eliminado el medio acuoso, o los electrolitos disueltos en él.

Todo esto funciona muy bien en la teoría, pero en la práctica pueden producirse fallas inesperadas y, en algunos casos notables, dichos sucesos ocupan titulares en los medios de comunicación masiva. Un ejemplo muy conocido en el ámbito de corrosión fue el desprendimiento de parte del fuselaje (¡en pleno vuelo!) de la cabina de pasajeros de un avión que volaba sobre las islas Hawái en 1988, debido a corrosión-fatiga, la cual puede producir fracturas del material a tiempos difícilmente previsible (Figura 4).

Cuando se habla de 'protección contra la corrosión' o 'protección anticorrosiva' se asume que se trata de medidas

que van a permitir que el proceso de corrosión ocurra, pero a una menor velocidad. En otras palabras, lo que se busca es modificar la cinética del proceso. En este grupo de medidas se encuentran el uso de recubrimientos de pinturas, la adición de inhibidores de corrosión, la aplicación de tratamientos de conversión y de recubrimientos metálicos, principalmente. Lo usual es que estos métodos de protección sean aplicados sobre metales o aleaciones 'activos' (por ejemplo, materiales ferrosos), debido a sus propiedades mecánicas y menores costos. Al saber que dichos materiales tienden espontáneamente a corroerse cuando son expuestos al medio de interés, la finalidad es extender su vida útil en tanto la medida adoptada mantenga sus propiedades protectoras. En la mayoría de sectores industriales y de servicios, esa es la única expectativa y se elaboran programas de supervisión y mantenimiento para verificar que los dispositivos, estructuras e instalaciones protegidas todavía funcionen dentro de límites aceptables.

Aunque quizás la mayoría de personas no sea consciente de ello, en la vida diaria se aplican los mismos criterios. Se sabe que la pintura aplicada sobre los automóviles no es eterna, pero su protección es suficiente para el tiempo que se piensa conservar el auto; también sabemos que las rejas perimetrales deben ser repintadas periódicamente o que los muebles para casas de playa deben ser, preferentemente, de aluminio anodizado (antes que de acero pintado o cromado), o de plástico. Cada quien decide qué vida útil (o tiempo en servicio) resulta aceptable para determinados fines y realiza sus inversiones en concordancia con dichas expectativas.

Así llegamos al tercer escenario: "sé que se va a corroer, pero no hago nada porque no es tan importante". Para



Figura 4. Caso grave de corrosión-fatiga sufrida por los metales del fuselaje del vuelo Aloha Flight 243 en 1988. (Fuente: Blog "Una breve historia"; acceso: mayo 2016 http://www.unabrevehistoria.com/2008_09_01_archive.html (□)).

llegar a esa decisión debe haberse considerado cuáles serán los efectos de la corrosión en la estructura misma, en el medio en contacto con ella y las consecuencias de la pérdida de su funcionalidad. No se está haciendo referencia a actitudes de irresponsable indolencia, sino a resultados de evaluaciones de riesgos.

Considérese, por ejemplo, un tanque que va servir para almacenar residuos de aguas ácidas de un proceso industrial. Tras determinar que el tipo de corrosión que sufriría el tanque, si se fabricase de hierro fundido, es de tipo uniforme se calcula la velocidad de corrosión (expresada como pérdida anual de espesor de las paredes y base del tanque) y se diseña de manera que el tanque deba ser reemplazado, por ejemplo, cada 10 años. ¿Contaminación del medio? Iones ferrosos que se disolverán en aguas que ya estaban contaminadas. ¿Controles a realizar? Sólo verificar que la velocidad de pérdida de espesor del material se mantenga.

En aplicaciones domésticas los requisitos de estética podrían constituir una limitación para este tipo de razonamiento. No obstante, sería raro que en una ciudad cercana al mar y con una alta humedad relativa permanente no existan al menos algunos casos menores de corrosión que sean pasados por alto. En otras palabras, decidimos convivir con la corrosión.

Investigación en corrosión

Existe consenso internacional respecto a que un gran porcentaje de los costos de la corrosión podría ser ahorrado tan solo aplicando correctamente conocimientos ya existentes^{2,3}. Las investigaciones en el campo de la corrosión han cobrado un nuevo impulso desde fines del siglo XX debido, principalmente, al creciente desarrollo de nuevos materiales y a la necesidad de predecir el comportamiento que tendrán bajo condiciones de servicio a partir de modelos adecuados. Así, por ejemplo, en el año 2011 el 'Comité de Oportunidades de Investigación en Ciencia en Ingeniería de la Corrosión' de los Estados Unidos de Norteamérica identificó como uno de los grandes retos en corrosión para el siglo XXI el desarrollo de ensayos de corrosión acelerada bajo condiciones controladas que tengan correlación cuantitativa con el comportamiento observado en el largo plazo en las condiciones de servicio⁴. Se trata, efectivamente, de 'grandes retos', debido a su enorme complejidad. La Federación Europea de Corrosión (EFC) también ha constituido un grupo de trabajo en torno a

métodos fisicoquímicos de ensayos de corrosión, el cual tiene como uno de sus principales temas de interés la correlación de estos métodos a escala de laboratorio con ensayos de corrosión acelerada y comportamiento en campo⁵.

Poder predecir, por ejemplo, si un implante médico conllevará un rechazo por parte del organismo receptor, o su falla antes de la vida útil prevista, debido a la liberación de iones metálicos desde el dispositivo implantado, requiere estudios interdisciplinarios a varios niveles (**Figura 5**). En el Instituto de Corrosión y Protección de la PUCP están siendo desarrollados estudios en el primer nivel (simulaciones del comportamiento de aleaciones de titanio en soluciones fisiológicas), pero en el futuro será necesario ir aproximándose más al escenario 'real' (medios biofisiológicos, ensayos citotóxicológicos), para luego proponer y validar modelos. Mucho interés ha despertado este campo de investigación (biomateriales) en la comunidad internacional y, hasta ahora, se ha llegado a dos conclusiones que son de aceptación general: **Un implante debería ser evaluado antes** (*in vitro* y/o *in vivo* en animales) de ser colocado en un ser vivo, y **no existe un ensayo "universal" que permita evaluar todos los aspectos** implicados en la interacción entre un material y un tejido biológico.

De otro lado, en el año 2003 en los Estados Unidos de Norteamérica fueron identificados los retos que enfrentarán las ciencias químicas durante el siglo XXI con relación a ciencia y tecnología de materiales⁶: descubrimiento y desarrollo de nuevos materiales 'a medida', funcionalizados y de mínimo impacto ambiental y avances en las respectivas técnicas de síntesis. La necesidad de trabajar en cooperación con otras disciplinas ha sido enfatizada; si bien la obtención de un nuevo material con especiales atributos constituye un logro científico por sí mismo, la demostración de su aplicabilidad cumpliendo distintas funciones requiere el concurso de otros especialistas, entre ellos, los que estudian sus patologías (es decir, su comportamiento de corrosión).

La investigación aplicada en corrosión es más frecuente. Estudiar el desempeño y la eficiencia de medidas de protección contra la corrosión (recubrimientos, inhibidores, selladores, aleaciones de mayor resistencia a la corrosión, etc.) bajo nuevas condiciones o tras haber incorporado algunas mejoras, es una de las actividades con mayor demanda a nivel industrial. En dicho contexto, el tiempo es una de las principales limitaciones y, también por ello, el diseño de ensayos y el desarrollo de modelos predictivos, que permitan acortar la duración de los estudios y permitir una toma de decisiones en plazos más breves, generan gran expectativa.

2. "Was kostet die Korrosion?" (revisión y comentarios editoriales del 'Informe Hoar'). *Werkstoffe und Korrosion*, 1971, 22, 789-792.

3. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States". Supplement to Materials Performance, July 2002 (■).

4. Committee on Research Opportunities in Corrosion Science and Engineering - National Research Council. "Research Opportunities in Corrosion Science and Engineering". The National Academies Press: Washington, 2011. pp. 1-6, 26-28 (■).

5. European Federation of Corrosion: "Physico chemical methods of corrosion testing". Página web. (acceso: junio 2016) (■).

6. Committee on Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century - National Academy of Sciences: "Materials Science and Technology. Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century". The National Academies Press: Washington, 2003. pp. (■).

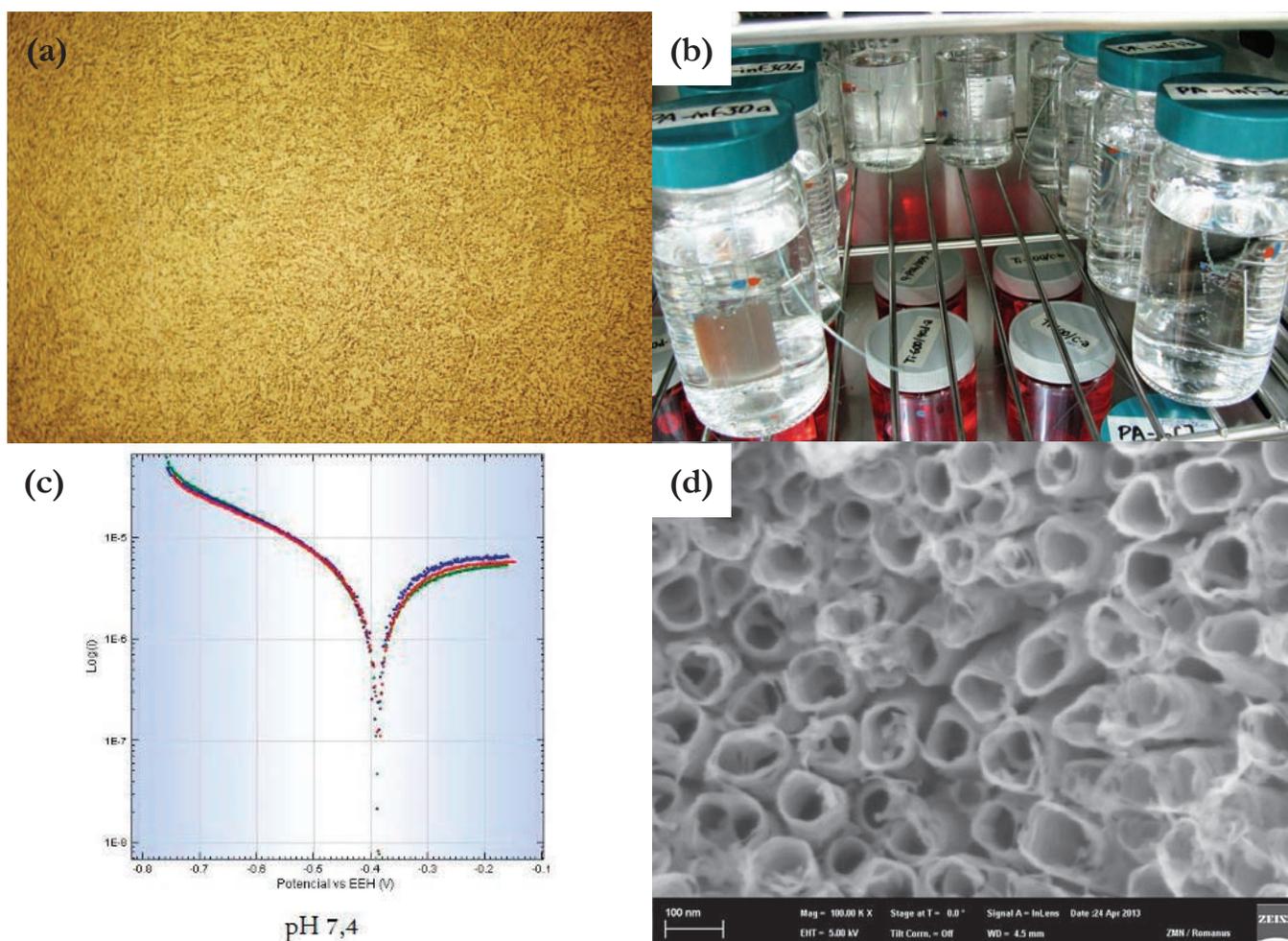


Figura 5. Las investigaciones en corrosión requieren la ejecución de distintos tipos de ensayos y de trabajo interdisciplinario. En esta figura se muestran imágenes de estudios del comportamiento de una aleación de titanio como biomaterial: **(a)** microestructura de la aleación; **(b)** ensayo de inmersión en solución fisiológica; **(c)** ensayos electroquímicos; **(d)** anodización de la aleación para obtener nanotubos. (Fuentes de imágenes: Proyectos DGI-PUCP 0171 y 2083, desarrollados en el ICP-PUCP).

El campo de la corrosión es esencialmente multidisciplinario. Para acceder a él, desde diversas profesiones, es necesario adquirir un lenguaje básico común, provisto por conocimientos de aspectos fundamentales relativos a estructuras y propiedades de materiales, reacciones químicas y electroquímicas, así como en tecnología de materiales. Sin embargo, dependiendo de los ámbitos de aplicación, el aprendizaje puede conllevar la incursión en otras disciplinas, tales como microbiología, medicina, estructuras de obras civiles,

aeronáutica, o arqueología, para poder comprender los distintos modos de interacción de los materiales involucrados con su entorno.

Los retos son permanentes y de distinta envergadura, desde unos cientos hasta los miles de millones de dólares, en la búsqueda de mejorar o extender la durabilidad, frente a un destino final inexorable.

Recibido: 28 de mayo de 2016

Aceptado en forma final: 18 de julio de 2016

BIBLIOGRAFÍA ESENCIAL

Richardson T.J.A. (Ed.): *"Shreir's Corrosion"*. Elsevier: Amsterdam, 2010 (□).

Roberge P.R.: *"Corrosion Engineering: Principles and Practice"*. McGraw-Hill: Nueva York, 2008 (□).

Kelly, R.G.; Scully, J.R.; Shoesmith, D.W. y Buchheit R.G.: *"Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering"*. Marcel Dekker: Nueva York, 2003 (□).