



# Tribocorrosión: historia, propiedades, aplicaciones y modelamiento

---

## Tribocorrosion: history, properties, applications, and modeling

Darío Yesid Peña-Ballesteros <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Corrosión- GIC, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: [dypena@uis.edu.co](mailto:dypena@uis.edu.co)

Publicado en línea: 19 noviembre, 2020.

### Resumen

La tribocorrosión es el área de conocimiento encargada de estudiar la unión de los fenómenos tribológicos y la corrosión. En esta nota editorial se presenta, a groso modo, aspectos a destacar de la tribocorrosión, se señala la relevancia práctica de este campo de investigación para la ciencia de materiales y la ingeniería mecánica. Se relaciona la historia de tribocorrosión, diversas variables a considerar, algunos campos de aplicación identificados y se discute sobre los múltiples desafíos que se presentan en el modelamiento de los sistemas de tribocorrosión.

**Palabras clave:** tribocorrosión; tribología; corrosión; confiabilidad; materiales.

### Abstract

Tribocorrosion is the area of knowledge in charge of studying the union of tribological phenomena and corrosion. This editorial note presents aspects to be highlighted of tribocorrosion, the practical relevance of this field of research for materials science and mechanical engineering is pointed out. The history of tribocorrosion is related, various variables to consider, some fields of application identified, and the multiple challenges that arise in the modeling of tribocorrosion systems are discussed.

**Keywords:** tribocorrosion; tribology; corrosion; reliability; materials.

### 1. Introducción

La tribología es un área de la ingeniería mecánica que estudia los mecanismos de fricción, lubricación y desgaste de las superficies que están en movimiento relativo [1]. Por otro lado, la corrosión es la ciencia que evalúa la degradación irreversible de los materiales que ocurre debido a la interacción con el entorno [2],[3]. De esta manera, el área de investigación que combina la tribología y la corrosión se le denomina tribocorrosión y se puede definir como un fenómeno de degradación de las superficies de los materiales sometidos a la acción conjunta de los mecanismos de fricción, lubricación y

desgaste, al igual que el ataque de corrosión causado por el medio ambiente [4],[5],[6]. La norma ASTM G 40 define la tribocorrosión como un proceso sinérgico que implica la acción simultánea de contacto entre superficies en movimiento relativo con las reacciones químicas en el ambiente, donde cada proceso se ve afectado por la acción del otro [7]. El conocimiento del comportamiento tribológico en ausencia de medio corrosivo no es suficiente para predecir el comportamiento tribocorrosivo, de la misma manera que no lo es la comprensión del comportamiento corrosivo en ausencia de los mecanismos de desgaste, lubricación y fricción [8].

En esta nota editorial se presenta a los lectores la historia, propiedades, modelamiento y aplicaciones de la tribocorrosión. En la sección 2 se listan algunos sectores de la industria donde está presente. En la sección 3 se pone en contexto la historia de esta área del conocimiento de la ingeniería. Seguidamente, en la sección 4 se presentan sus propiedades. Finalmente, en la sección 5 se discute sobre el modelamiento de los sistemas de tribocorrosión.

## 2. Aplicación

La tribocorrosión está presente en varios sectores de la industria, como se muestra en la Figura 1, estos pueden ser: procesamiento de materiales, transporte, exploración de petróleo y gas, minería, nuclear, implantes médicos y dentales, dispositivos quirúrgicos, aeroespacial, entre otros [9], [10], [11].

La industria aeroespacial se enfrenta a problemas de tribocorrosión en motores a reacción, sistemas hidráulicos, entre otros. En esta industria, la seguridad y la fiabilidad son los principales problemas. Preocupaciones similares se encuentran en la industria química, petrolera y en la tecnología marina, donde la corrosión por erosión afecta el rendimiento y la seguridad de los equipos de manejo de fluidos, como tuberías, válvulas y bombas. En la industria electrónica la tribocorrosión afecta la confiabilidad y la vida útil de los microsistemas, relojes mecánicos o unidades de disco duro [12].

Por otro lado, los equipos de minería están sujetos a un intenso desgaste mecánico y de corrosión. Esta industria lleva mucho tiempo involucrada en el estudio de la tribocorrosión. En la industria mecánica, los procesos como el corte, el rectificado y el pulido se ven afectados por la tribocorrosión debido a que la velocidad de mecanizado y el desgaste de la herramienta varían con las propiedades químicas de los fluidos de corte.

Asimismo, los automóviles contienen muchas partes móviles que pueden estar sujetas a problemas de tribocorrosión, por ejemplo, válvulas, cilindros, frenos, entre otros. Las pérdidas de energía debido a la fricción, así como la durabilidad y fiabilidad, son factores críticos en este sector.

De la misma forma, en la industria de alimentos, el procesamiento, los equipos como extrusoras, mezcladoras, bombas y tuberías que contienen mezclas corrosivas de productos sólidos y líquidos están expuestos a daños por tribocorrosión. En esta industria la prioridad es evitar la contaminación de los alimentos procesados por productos generados en la tribocorrosión como iones de metales pesados. Finalmente, en el campo biomédico, la tribocorrosión de los implantes sometidos a movimientos de fricción pueden producir partículas sólidas de desgaste que causan inflamación del tejido y eventualmente rechazo del implante. Los ejemplos anteriormente mencionados dan muestra de la importancia de la tribocorrosión en una amplia variedad de industrias y que potencialmente pueden generar serias implicaciones para el bienestar y la salud humana [13].

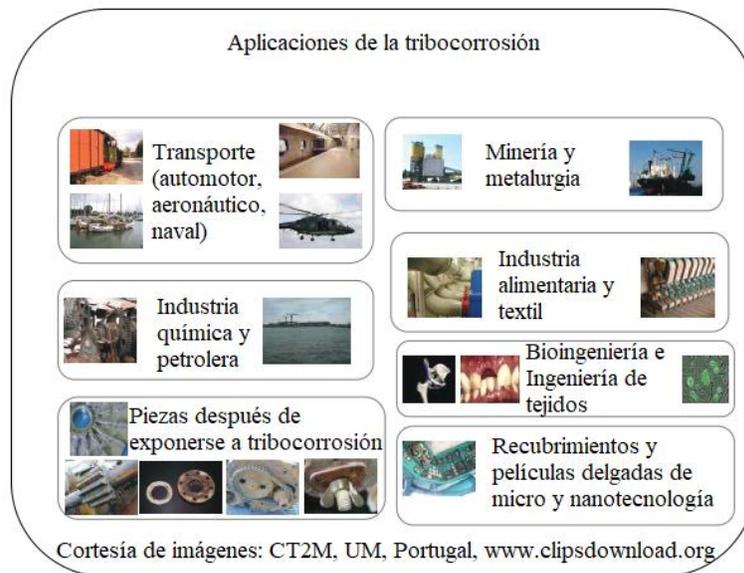


Figura 1. Espectro de importancia práctica de la tribocorrosión. Fuente: [4].

### 3. Historia

Los inicios de la tribocorrosión como área de la ciencia se remontan al año 1875, cuando Edison observó una variación en el coeficiente de fricción en varios potenciales aplicados [4].

El efecto de la química de la superficie en la respuesta mecánica de los materiales ha sido investigado desde principios del siglo XX. En 1954, Uhlig postuló que un factor químico y un factor mecánico estaban involucrados en el mecanismo de tribocorrosión. Posteriormente, entre finales de los años setenta y principios de los ochenta, varios investigadores estudiaron el efecto del desgaste sobre la corrosión en diferentes sistemas de aplicación industrial, como corrosión por abrasión, corrosión por erosión o corrosión por deslizamiento. Pero no fue hasta la década de 1990 que Mischler y colaboradores propusieron mecanismos de tribocorrosión en contacto deslizante; y Madsen, los proponía en forma estándar, es decir, sin deslizamiento [7].

La tribocorrosión en presencia de un tercer cuerpo fue abordado por Cao y Mischler, teniendo como caso de estudio las aleaciones de CoCr en situaciones de desgaste leve y regidos por la deformación plástica del metal. La suposición subyacente de este modelo establece que las propiedades mecánicas del material son homogéneas y, por lo tanto, su aplicación no se extiende a materiales multifásicos [14].

### 4. Variables por considerar

El comportamiento de los fenómenos de tribocorrosión dependen de las propiedades de los materiales en contacto, de la mecánica del contacto tribológico y de las propiedades fisicoquímicas del medio ambiente. De esta manera, es necesario que el estudio de la tribocorrosión se base en enfoques de sistemas que tenga en cuenta los efectos combinados de todos los parámetros significativos [12]. Es crucial controlar los fenómenos de tribocorrosión, así como la naturaleza de las superficies friccionadas o desgastadas que han sufrido tensiones tribológicas [15].

La morfología y la composición química de las superficies de contacto juegan un papel crucial en la tribocorrosión [12], [16]. Otra variable crítica por considerar son las características químicas y electroquímicas de los materiales en contacto en el entorno corrosivo particular al que están expuestos. Las propiedades termodinámicas y la cinética electroquímica de los metales participantes determinan el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión intrínseca, así como

la valencia y la naturaleza física de los productos de oxidación formados. El comportamiento a la pasivación de los metales es particularmente importante para la tribocorrosión. En metales expuestos a altas temperaturas, se forman capas de óxidos relativamente gruesas u otras capas de productos de corrosión dúctiles en la superficie del material. Sus propiedades mecánicas y químicas determinan la tasa de tribocorrosión. En este sentido, la tasa de tribocorrosión en un sistema metal-ambiente depende de las fuerzas aplicadas y el tipo de contacto: deslizamiento, desgaste, rodadura o impacto; este tipo de movimiento puede afectar el tiempo de permanencia de las partículas de desgaste entre las superficies.

La geometría de contacto es otra variable importante en el estudio de la tribocorrosión, porque determina el tamaño de la zona de contacto y la alineación de las superficies de fricción. Además de la fuerza normal aplicada, la velocidad de deslizamiento es crítica para la tasa de tribocorrosión porque determina el tiempo de despasivación del material bajo ciertas condiciones de desgaste. En condiciones de erosión, la energía y el ángulo de incidencia de las partículas que impactan sobre el metal pasivado son variables críticas que determinan su vida útil en un proceso determinado.

### 5. Modelamiento de los sistemas de tribocorrosión

Debido a la alta complejidad de los sistemas de tribocorrosión, las investigaciones relacionadas al estudio de modelamiento teniendo en cuenta todas las variables que afectan este fenómeno presentan un alto grado de dificultad. Se necesitan criterios racionales para la selección de materiales y para el diseño de sistemas de tribocorrosión que tengan en cuenta las propiedades de los materiales electroquímicos y mecánicos. Entre otros, la disponibilidad de tales criterios sería particularmente útil para el desarrollo de recubrimientos avanzados para aplicaciones de tribocorrosión [17]. Los modelos teóricos que brindan información física sobre las complejas interacciones que tienen lugar en los sistemas de tribocorrosión pueden proporcionar pautas útiles para la ingeniería. No obstante, se han logrado grandes avances en la comprensión de los mecanismos de tribocorrosión principalmente en las últimas dos décadas. El logro del progreso se atribuye en gran medida a los novedosos métodos experimentales que integran técnicas electroquímicas en mediciones tribológicas convencionales, así como la creciente disponibilidad de instrumentación avanzada, la adquisición de datos computarizados y el tratamiento combinado con modelos numéricos, que ha permitido ofrecer nuevas y emocionantes oportunidades para el estudio de los sistemas de tribocorrosión [18], [19], [20].

En la actualidad, a pesar de estos avances, los modelos de dos cuerpos aún sufren limitaciones que requieren más estudios y esfuerzos de modelado. En este sentido, las futuras investigaciones en el área de la tribocorrosión deberían centrarse en la generalización de modelos de dos cuerpos a una amplia gama de materiales de ingeniería y en situaciones de desgaste gobernadas por diferentes mecanismos de degradación. Para ello, el material de estudio debe investigarse a fondo con el objetivo de identificar los factores y mecanismos que rigen su degradación por tribocorrosión. Asimismo, existen vacíos del conocimiento relacionados a los métodos utilizados para la cuantificación del desgaste y la caracterización precisa del mecanismo.

Igualmente, las constantes de proporcionalidad para el desgaste químico y mecánico todavía requieren calibración experimental para otros metales pasivos, tales como las aleaciones de CoCr. Esto se puede lograr con un esfuerzo razonable mediante el uso de configuraciones tribo-electroquímicas disponibles que también enfatizan los requisitos de los estudios de tribocorrosión de una variedad de materiales.

Otras de las preguntas de investigación que se generan actualmente se centran en explicar el efecto que cumplen los estados químicos de la superficie sobre el desgaste mecánico, además de establecer si existe una correlación clara entre la reactividad de la superficie y el rendimiento tribológico. Todavía queda mucho trabajo por hacer para tratar de compaginar de una manera coherente y clara los trabajos realizados desde la academia y los realizados en los diferentes centros de investigación para entender los mecanismos de este complejo fenómeno.

Finalmente, una limitación importante de las soluciones analíticas propuestas hasta ahora por los modelos de tribocorrosión derivados del enfoque de Uhlig, es la imposibilidad de predecir fenómenos dependientes del tiempo, como los cambios observados experimentalmente en la rugosidad de la superficie de contacto y en las tasas de desgaste asociadas. Los modelos analíticos propuestos hasta ahora consideran situaciones esencialmente de estado estacionario. Por lo cual se cree que los estudios que abordan simulaciones numéricas representan la forma más prometedora de superar esta limitación. Se espera que las simulaciones numéricas se vuelvan cada vez más comunes en la investigación y el modelado de la tribocorrosión en el futuro cercano.

## Referencias

- [1] J. Villanueva *et al.*, “Corrosion, Tribology, and Tribocorrosion Research in Biomedical Implants: Progressive Trend in the Published Literature,” *J. Bio-Tribo-Corrosion*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1007/s40735-016-0060-1
- [2] R. I. M. Asri *et al.*, “Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 77, pp. 1261–1274, 2017, doi: 10.1016/j.msec.2017.04.102
- [3] D. Young, *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*, vol. 1. 2015
- [4] M. T. Mathew, P. Srinivasa Pai, R. Pourzal, A. Fischer, M. A. Wimmer, “Significance of tribocorrosion in biomedical applications: Overview and current status,” *Adv. Tribol.*, no. December, 2009, doi: 10.1155/2009/250986
- [5] W. Q. Toh, X. Tan, A. Bhowmik, E. Liu, S. B. Tor, “Tribochemical characterization and tribocorrosive behavior of CoCrMo alloys: A review,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 1, 2017, doi: 10.3390/ma11010030
- [6] M. K. Dimah, F. Devesa Albeza, V. Amigó Borrás, A. Igual Muñoz, “Study of the biotribocorrosion behaviour of titanium biomedical alloys in simulated body fluids by electrochemical techniques,” *Wear*, vol. 294–295, pp. 409–418, 2012, doi: 10.1016/j.wear.2012.04.014
- [7] A. López-Ortega, J. L. Arana, R. Bayón, “Tribocorrosion of Passive Materials: A Review on Test Procedures and Standards,” *Int. J. Corros.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/7345346
- [8] S. Mischler, “Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation,” *Tribol. Int.*, vol. 41, no. 7, pp. 573–583, 2008, doi: 10.1016/j.triboint.2007.11.003
- [9] Y. Wang *et al.*, “Improvement in the tribocorrosion performance of CrCN coating by multilayered design for marine protective application,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 528, no. June, p. 147061, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147061

- [10] W. fang CUI, F. juan NIU, Y. ling TAN, G. wu QIN, "Microstructure and tribocorrosion performance of nanocrystalline TiN graded coating on biomedical titanium alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 29, no. 5, pp. 1026–1035, 2019, doi: 10.1016/S1003-6326(19)65011-9
- [11] A. I. Costa, L. Sousa, A. C. Alves, F. Toptan, "Tribocorrosion behaviour of bio-functionalized porous Ti surfaces obtained by two-step anodic treatment," *Corros. Sci.*, vol. 166, no. July 2019, p. 108467, 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108467
- [12] S. M. Smith and J. L. Gilbert, "Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems," 2006, doi: 10.1088/0022-3727/39/15/S01.
- [13] C. Dini, R. C. Costa, C. Sukotjo, C. G. Takoudis, M. T. Mathew, V. A. R. Barão, "Progression of Bio-Tribocorrosion in Implant Dentistry," *Front. Mech. Eng.*, vol. 6, no. January, 2020, doi: 10.3389/fmech.2020.00001
- [14] S. Cao and S. Mischler, "Modeling tribocorrosion of passive metals – A review," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 127–141, 2018, doi: 10.1016/j.cossms.2018.06.001
- [15] S. Fischer, Alfonso; Mischler, "Tribocorrosion : fundamentals , materials," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 15, 2006.
- [16] A. Salicio-Paz *et al.*, "Impact of the multilayer approach on the tribocorrosion behaviour of nanocrystalline electroless nickel coatings obtained by different plating modes," *Wear*, vol. 456–457, no. June, p. 203384, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203384
- [17] Y. Zhu, M. Dong, J. Li, L. Wang, "The improved corrosion and tribocorrosion properties of TiSiN/Ag by thermal treatment," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 385, no. January, p. 125437, 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125437
- [18] K. M. Li, K. J. Song, J. Guan, F. Yang, J. Liu, "Tribocorrosion behavior of a Ti6Al4V alloy electromagnetic induction nitride layer in a fluorine-containing solution," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 386, no. January, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125506
- [19] F. Mindivan, M. P. Yildirim, F. Bayindir, H. Mindivan, "Corrosion and tribocorrosion behavior of cast and machine milled Co-Cr alloys for biomedical applications," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 129, no. 4, pp. 701–704, 2016, doi: 10.12693/APhysPolA.129.701
- [20] E. Haruman, Y. Sun, M. S. Adenan, "A comparative study of the tribocorrosion behaviour of low temperature nitrided austenitic and duplex stainless steels in NaCl solution," *Tribol. Int.*, vol. 151, no. January, p. 106412, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106412