

# Corrosión filiforme del aluminio lacado<sup>(\*)</sup>

A. Bautista<sup>(\*)</sup>, P. Garcés<sup>(\*\*)</sup>, J.A. González<sup>(\*)</sup> y M. Morcillo<sup>(\*)</sup>

**Resumen** La corrosión filiforme es un tipo de corrosión localizada que puede afectar a algunos metales pintados (normalmente acero, aluminio y magnesio). Suele ocurrir en piezas expuestas a atmósferas marinas, y da lugar al deterioro del recubrimiento protector y a un ataque en forma de filamentos del metal base. En este trabajo se presenta una breve revisión bibliográfica sobre la corrosión filiforme en el aluminio lacado. Igualmente, se analiza el papel que juegan diversos factores en la aparición de los filamentos de corrosión, se resume el mecanismo por el que progresan y se recogen las principales soluciones propuestas para este problema.

Palabras clave: **Corrosión filiforme. Aluminio pintado. Atmósfera marina.**

## Filiform corrosion on coated aluminium

**Abstract** Filiform corrosion is a type of localized corrosion which can affect some painted metals (usually steel, aluminium and magnesium). It often occurs in specimens exposed to marine environments, and produces protective coating damage and thread-like metal base attack. In the paper a brief review of filiform corrosion on coated aluminium is shown. The survey analyses the role which some factors play in the initiation of the filaments, summarizes their growing mechanism and shows the main proposed solutions to this problem.

Keywords: **Filiform corrosion. Coated aluminium. Marine atmosphere.**

## 1. INTRODUCCIÓN

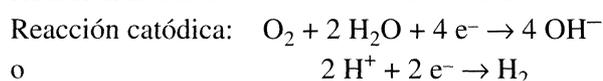
La corrosión filiforme es un tipo de ataque que, por lo general, se desarrolla en determinadas condiciones sobre la superficie de un metal al que previamente se le ha aplicado un recubrimiento de pintura (1). Este tipo de corrosión fue descrito por primera vez de forma rigurosa por Sharman (2) en 1944. Se desarrolla fundamentalmente en hierro, magnesio y aluminio pintados y expuestos a ambientes salinos y húmedos (3 y 4). La corrosión filiforme, como su mismo nombre indica, aparece y avanza sobre la superficie del metal en forma de filamentos o hilitos que nacen a partir de un defecto de la capa de pintura y que crecen bajo ésta. Estos filamentos se componen, básicamente, de dos partes: la cabeza y la cola, aunque no existe una interfase clara entre ambas zonas. La cabeza es la zona activa donde se desarrolla el proceso de corrosión electroquímica

(5), y está llena de una disolución líquida concentrada. La cola es la zona inactiva, y está formada por los productos de corrosión deshidratados.

El objetivo de este trabajo de divulgación es presentar los aspectos más significativos que caracterizan la corrosión filiforme del aluminio lacado y las posibles medidas preventivas.

## 2. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL ALUMINIO FRENTE A LA CORROSIÓN

El aluminio es un metal ligero (con una densidad de 2,71 g/cm<sup>3</sup>) que ocupa una posición muy activa dentro de la serie electroquímica (presenta una tendencia natural a oxidarse). Durante el proceso inicial de la corrosión, que implica la formación de una pila electroquímica, los iones Al<sup>3+</sup> y los electrones se generan en el ánodo, mientras que el oxígeno se reduce en el cátodo dando lugar a iones hidroxilo, OH<sup>-</sup> (o si el medio es ácido, rico en protones, H<sup>+</sup>, estos se reducen produciendo gas hidrógeno, H<sub>2</sub>):



(\*) Trabajo recibido el día 30 de junio de 1995.

(\*) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CSIC). Avda. de Gregorio del Amo, 8. 28040-Madrid (España).

(\*\*) Dpto. de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana. Universidad de Alicante. Apto. 99. 03080-Alicante (España).

Sin embargo, expuesto al agua o al aire, el aluminio se vuelve inmediatamente pasivo. Normalmente, se considera que la capa pasivante que lo protege está formada por óxido de aluminio. El espesor de la capa pasiva del aluminio en la atmósfera viene a ser de 2-10 nm (20-100 Å). En los metales que se corroen de forma generalizada es fácil estimar la vida residual de una estructura. Sin embargo, los metales que se pasivan de forma espontánea pueden experimentar ataques por corrosión localizada, que dificultan la predicción de la vida en servicio, puesto que una pequeña pérdida de metal en una zona determinada puede producir una importante penetración de la corrosión. Algunos de los tipos de corrosión localizada que comúnmente sufre el aluminio son: corrosión bajo tensión, corrosión por picaduras y corrosión en resquicios.

El aluminio es un metal blando que habitualmente se prepara aleado con otros metales a fin de mejorar sus características mecánicas. El nivel de corrosión observado en el aluminio es muy sensible a la presencia de impurezas que, con la excepción del magnesio, tienden a ser catódicas. En general, el aluminio de alta pureza es más resistente a la corrosión que el aluminio puro comercial, que a su vez lo es más que las aleaciones de aluminio.

Para proteger al aluminio y sus aleaciones frente a la corrosión se suele recurrir al anodizado (aumento artificial de la capa protectora de óxido) o al lacado.

### 3. CORROSIÓN FILIFORME EN EL ALUMINIO

Aunque la corrosión filiforme del acero ya fue descrita en la literatura en los años cuarenta, sobre el aluminio no se detectó este fenómeno hasta dos décadas más tarde. Los primeros problemas se registraron en la industria aeronáutica. La corrosión filiforme del aluminio empleado en arquitectura se comenzó a conocer en los años 1980-1982. Las piezas afectadas siempre pertenecían a edificios próximos a la costa, normalmente en zonas donde la atmósfera marina se mezclaba con la industrial (6 y 7). Actualmente, la preocupación por este tipo de ataque se ha extendido a otras industrias, como la automovilística, que también emplean aluminio pintado.

La corrosión filiforme crece de forma arborescente, evitando siempre que los filamentos se crucen unos con otros (Fig. 1). Cuando el aluminio presenta sobre su superficie una dirección de extrusión marcada, los filamentos tienden a desarrollarse siguiendo esa dirección (8).

En general, la corrosión filiforme da lugar a un deterioro simplemente estético. No obstante, en sistemas muy susceptibles, disminuye las propiedades protectoras de la película y amenaza la resistencia física del material. La limitación de la vida útil de

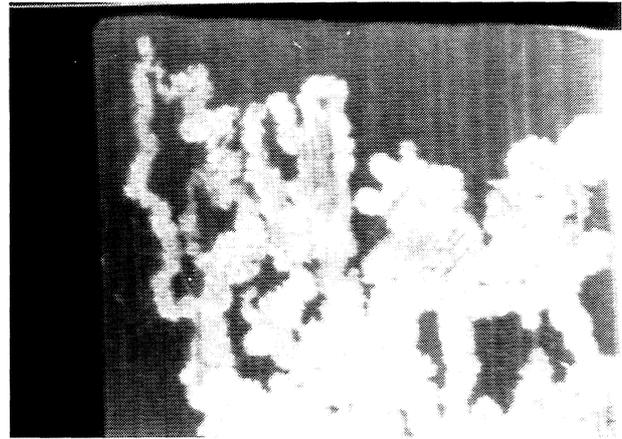


FIG. 1.— Ejemplo del ataque producido por la corrosión filiforme sobre una estructura real de aluminio que había estado previamente expuesta a una atmósfera marina. El recubrimiento orgánico se ha eliminado de la superficie para poder observar la corrosión del sustrato metálico.  $\times 4,4$ .

*FIG. 1.— Example of filiform corrosion attack in a real aluminium structure which has been exposed to a marine atmosphere. The organic coating has been removed to observe the corroded base metal.  $\times 4,4$ .*

las piezas afectadas es muy grande, pues en ambientes agresivos las manifestaciones iniciales del problema suelen ser visibles antes de un año (6). Sin embargo, si el ataque no se inicia en un tiempo relativamente corto, es prácticamente imposible que se llegue a iniciar alguna vez (9).

#### 3.1. Factores involucrados en la aparición de corrosión filiforme

En la aparición de filamentos de corrosión en un metal lacado suelen coincidir una serie de circunstancias:

- a) Presencia de una sal agresiva  
Para que se desencadene el proceso es necesario que la superficie metálica esté contaminada. Se ha comprobado que el desarrollo de la corrosión depende de la naturaleza del anión (cloruro, sulfato, bromuro, etc.), pero es independiente de la del catión (10).
- b) Recubrimiento orgánico defectuoso  
La presencia de pequeños defectos en la película de pintura permite que las sales agresivas que pueda haber en el medio lleguen hasta el sustrato metálico.
- c) Humedad relativa entre el 60 y el 95 %  
La corrosión filiforme tiene lugar, exclusivamente, en atmósferas en las que existe un grado

de humedad suficiente para disolver la sal contaminante (11) y formar la disolución de la cabeza del filamento. No obstante, cuando la humedad relativa del aire es muy próxima al 100 %, este tipo de corrosión deja de producirse y es sustituido por el ampollamiento del recubrimiento.

d) Presencia de oxígeno

Este elemento es indispensable para que tengan lugar las reacciones redox que implica el proceso de corrosión. Se ha comprobado que la corrosión filiforme no aparece en atmósferas inertes (N<sub>2</sub>, He)(12).

e) Composición de la aleación

Diferentes aleaciones de aluminio presentan una respuesta muy distinta a la corrosión filiforme (13). Incluso la pequeña variación del contenido de algunas impurezas como cobre (14-18), hierro (19-21), cinc (16 y 17), plomo (16) y/o magnesio (17) dentro de los márgenes permitidos para una aleación determinada, condicionan la resistencia a la corrosión filiforme del material.

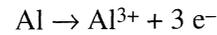
f) Tratamiento de la superficie metálica

La adherencia metal-pintura se opone al desarrollo de los filamentos, y depende del tipo de tratamiento al que se haya sometido la superficie metálica antes de aplicar la laca.

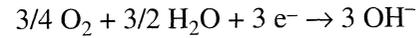
Además, y aunque existen discrepancias sobre el tema, algunos autores (22-25) añaden a estos otro factor adicional: la permeabilidad del recubrimiento orgánico, que tendría que ser suficiente para permitir el paso del agua y del oxígeno necesarios para el desarrollo del proceso de corrosión y la formación de los filamentos.

#### 4. MECANISMO DEL PROCESO DE CORROSIÓN

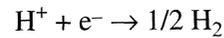
La iniciación de la corrosión filiforme tiene lugar mediante un proceso de osmosis (11 y 25). La contaminación de la superficie metálica con una sal soluble provoca la absorción de agua del ambiente y la formación de un agregado líquido bajo el recubrimiento. El ataque del aluminio comienza debajo de esta gota de disolución salina concentrada. Diferencias en el suministro de oxígeno a distintas zonas del área afectada dan lugar a la aparición de cátodos (donde abunda el oxígeno) y ánodos (donde este elemento es deficitario). La gota se desplaza por la superficie del metal, corroyéndola y dando origen a un filamento. El proceso de corrosión tiene lugar en la cabeza. La parte delantera actúa como ánodo (5) y el metal se oxida en esa zona según la reacción:



Mientras, el oxígeno se reduce cerca de la unión entre la cabeza y la cola (5) donde se localiza el cátodo:



La hidrólisis de los iones Al<sup>3+</sup> da lugar a un pH muy bajo en la parte anterior de la cabeza (25). La elevada acidez de esa zona hace posible que allí se produzca el desprendimiento de pequeñas cantidades de hidrógeno (12) producto de un proceso catódico secundario:



Los gradientes de concentración dentro de la cabeza causan la difusión de los aniones OH<sup>-</sup> hacia la parte anterior y de los cationes Al<sup>3+</sup> hacia la posterior. Así, los iones Al<sup>3+</sup>, al alejarse del ánodo, llegan a una zona con un pH lo suficientemente básico como para que pueda tener lugar la reacción:



Con el avance de la cabeza, los productos de corrosión en forma de hidróxidos que quedan tras ella se deshidratan y forman la cola del filamento. Todo este mecanismo se resume en el esquema de la figura 2.

Existe un consenso relativamente generalizado a la hora de identificar la fuerza impulsora de las transformaciones desde el punto de vista

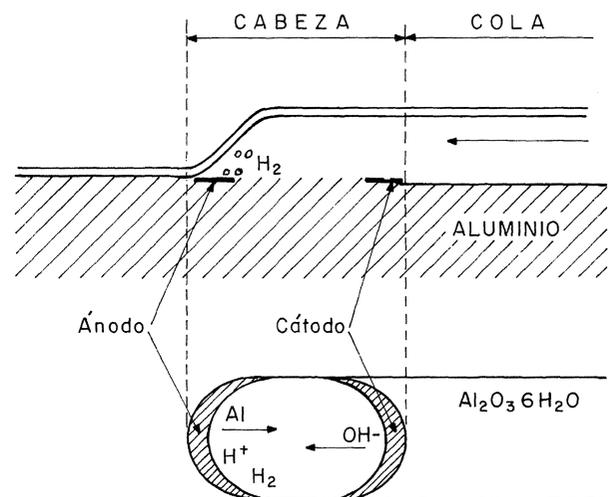


FIG. 2.— Mecanismo de la corrosión filiforme del aluminio lacado.

FIG. 2.— Mechanism of filiform corrosion on coated aluminium.

termodinámico y las reacciones electroquímicas que conlleva la formación de una pila de corrosión por aireación diferencial durante la corrosión filiforme del aluminio. No está claramente establecido, sin embargo, el mecanismo de transporte de las especies electroactivas. Existen dos posibilidades a la hora de plantearse la forma en que el oxígeno alcanza las zonas catódicas:

- a) Algunos autores (3 y 22-25) proponen que la difusión del oxígeno tiene lugar a través de la película orgánica, de naturaleza semipermeable. En sus publicaciones defienden una clara importancia de determinadas características del recubrimiento protector aplicado en el desarrollo del proceso de corrosión.
- b) Sin embargo, gran número de investigadores, asumiendo el mecanismo propuesto por Kaesche (26), han defendido la hipótesis de que la difusión de oxígeno en la corrosión filiforme del aluminio tiene lugar a través de los productos de corrosión que forman la cola porosa del filamento. Para ello se han basado en experiencias en las cuales se observó que un sellado de la cola con epoxi detenía el avance de los filamentos (5 y 27) y en la nula influencia que, según ellos, tienen en la corrosión filiforme algunas características de la película de pintura, como su porosidad (5) o su espesor (6).

## 5. MEDIDAS PREVENTIVAS

Para tratar de evitar el problema de la corrosión filiforme del aluminio lacado, se deben considerar una serie de medidas:

- a) El empleo de pinturas de baja permeabilidad al agua limita el desarrollo de la corrosión filiforme. Una buena resistencia a la transferencia de molécula de agua a través de la película de pintura suele coincidir con un elevado valor porcentual de alargamiento a la rotura (14). Esta característica disminuye la probabilidad de que aparezcan defectos por los cuales pueda penetrar la sal contaminante.
- b) Se deben evitar en la medida de lo posible los defectos en los recubrimientos y reforzar los bordes de la pieza. Una aplicación incorrecta de la pintura o la acusada disminución del espesor que se produce durante el secado en los ángulos agudos de las piezas, son factores claves en el inicio de la corrosión filiforme (6 y 17).
- c) Se puede evitar la aparición de corrosión filiforme modificando la composición del sustrato,

porque, incluso dentro de un mismo tipo de aleación, la diferente proporción de algún elemento minoritario puede afectar a su comportamiento.

- d) Si se aceptara el mecanismo de difusión del oxígeno a través del recubrimiento, una solución válida sería el empleo de pinturas de naturaleza poco permeable aplicadas en capas gruesas o en múltiples capas. La cantidad de pigmentos que contuviera la pintura sería otra variable que también influiría (3, 22 y 28), pues modificaría su permeabilidad y, por lo tanto, su resistencia a la corrosión.
- e) La buena adherencia metal-pintura es un factor clave para limitar el desarrollo de la corrosión filiforme. Este parámetro viene determinado por el tipo de tratamiento al que se ha sometido la superficie metálica antes de aplicarle la película protectora. Se han publicado varios estudios comparativos de la eficacia de diferentes pretratamientos sobre el aluminio y sus aleaciones (28-32). Muchos de los pretratamientos clásicos presentan una mala respuesta frente a la corrosión filiforme debido a los residuos ácidos que pueden dejar en la interfase metal-recubrimiento, que favorecen el inicio del ataque (28). Un procedimiento que ha sido muy empleado es el cromatado, cuya eficacia en la reducción de la corrosión filiforme está comprobada. El cromo hexavalente ha ofrecido mayor protección que el cromo trivalente (24). El poder de inhibición del cromo hexavalente aumenta con el peso por unidad de área de la capa aplicada (24). En la actualidad, sin embargo, se ha limitado enormemente la utilización industrial de este tipo de tratamiento debido a la gran toxicidad del cromo, y se ha impulsado la búsqueda de alternativas menos peligrosas (33 y 34). El pretratamiento más eficaz de los ensayados hasta el momento, con resultados mejores incluso que los del cromatado, es un anodizado de pequeño espesor previo al lacado (30). La aparición de corrosión filiforme, aun así, es posible, pero su probabilidad se ve sensiblemente disminuida. La extensión del ataque disminuye exponencialmente con el espesor de la capa de anodizado (31).

## REFERENCIAS

- (1) BAUTISTA, A. *Prog. Org. Coat.* En prensa.
- (2) SHARMAN, C.F. *Nature*, 153 (5), 1944: 621-622.
- (3) VAN LOO, M., LAIDERMAN, D.D. y BRUHN, R.R. *Corrosion*, 9 (8), 1953: 277-283.
- (4) HOLLER, A.C. *Off. Dig. Fed. Soc. Paint Technol.*, 35 (11), 1963: 1.163-1.175.

- (5) RUGGERI, R. y BECK, Th. R., *Corrosion*, 39 (11), 1983: 452-465.
- (6) DOLPHINJN, G.J. *Ossidare e Verniciare Oggi*, 11 (4-5), 1991: 32-41.
- (7) THEILER, F.P. *OXIT*, (3), 1989: 9-14.
- (8) HANIN, C. *Metals Handbook*. Vol. 13: Corrosion. 1ª Ed. Eds. J. R. Davis *et al.* ASM International. Metals Park, Ohio (EE.UU.), 1987: 104-108.
- (9) LENDERINK, H.J.L. Filiform Corrosion of Coated Aluminium Alloys: a study of mechanisms. Tesis doctoral. Technische Universiteit Delf (Países Bajos), 1995.
- (10) KOEHLER, E.L. *Corrosion*, 33 (6), 1977: 209-217.
- (11) FUNKE, W. *Prog. Org. Coat.*, 9 (1), 1981: 29-46.
- (12) SLABAUGH, W.H., DEJAGER, W., HOOVER, S.E. y Hutchinson, L.L. *J. Paint. Technol.*, 44 (566), 1972: 72-83.
- (13) GÓMEZ, E. y DE MIGUEL, I. *Alum. Finish.*, 14 (3), 1994: 26-29.
- (14) POWERS, J.H. Tech. Pap. Society of Automobile Engineers. Warrendale, Pennsylvania (EE.UU.), 1992.
- (15) TOYOSE, K., FUJIMOTO, H., TURUNO, A. y KOGA, S. Conf. RASELM'91. Ciencia e Ingeniería de los Metales Ligeros. Tokio, (Japón), Oct. 1991: 365-370.
- (16) DEFRAUCQ, J.N. Simp. Estal (Sección Eurocoat). Cannes (Francia), 16 Sep. 1994.
- (17) NIJHOF, G.H. Simp. Intersurface 94. Jaabeurs, Utrecht (Países Bajos), 3 Nov. 1994.
- (18) KOYAMA, T. y MOSEGAWA, Y. *Sumimoto Light Met. Tech. Rep.*, 33, 1992: 26.
- (19) IWATA, M., NISHIKADO, M., SATO, E. e ITOI, Y. *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 34 (9), 1984: 531-536.
- (20) IWATA, M., ITOI, Y. y SATO, E. *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 34 (5), 1984: 273-277.
- (21) IWATA, M., NISHIKADO, M. y SATO, E. 65º Conf. Japan Institute of Light Metals. Tokio (Japón), 17-18 Nov. 1983: 2.
- (22) HAAGEN, H. y RIHM, K.H. *Farbe + Lack*, 96 (7), 1990: 509-513.
- (23) PIETSCHMANN, J.E. y PFEIFER, H. *Aluminium*, 69 (11), 1993: 1.019-1.023.
- (24) European Committee of Standardization. VOM Reflections on Filiform Corrosion. Encuentro de SWG5. Bilthoven, 29 Jun. 1993.
- (25) LEIDHEISER, H. *Corrosion*, 38 (7), 1982: 374-383.
- (26) KAESCHE, H. *Werks. Korrs.*, 10 (11), 1959: 668-681.
- (27) MORITA, J. y YOSHIDA, M. *Corrosion*, 50 (1), 1994: 11-19.
- (28) RIQUE, J.P. *Surfaces*, 17 (116), 1978: 55-58.
- (29) PIETSCHMANN, J.E. y PFEIFER, H. *Aluminium*, 69 (12), 1993: 1.081-1.084.
- (30) PIETSCHMANN, J.E. y PFEIFER, H. *Aluminium*, 70 (1-2), 1994: 82-86.
- (31) HAAGEN, H., GASZNER, K. y SCHECK, K. *Farbe + Lack*, 97 (4), 1991: 306-310.
- (32) SUZUKI, T. e IKEDA, H. *Sumimoto Light Met. Tech. Rep.*, 20 (1-2), 1979: 12-22.
- (33) FEDRIZZI, L., DEFLORIAN F., CANTERI R., FEDRIZZI, M. y BONORA P.L. Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion. Vol. 1. 1ª Ed. Eds. J.M. Costa y A.D. Mercer. Barcelona, 1993: 131-138
- (34) BUCHHEIT, R.G., BODE, M.D. y STONER, G.E. *Corrosion*, 50 (3), 1994: 205-214.