



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



repositorio.uptc@uptc.edu.co

**ESTADO DEL ARTE DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO
TRIVALENTE EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3 EN LA INDUSTRIA
AERONÁUTICA Y AEROESPACIAL**

HOLMES DANIEL SUÁREZ ROMERO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
BOGOTÁ
2021**

**ESTADO DEL ARTE DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO
TRIVALENTE EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3 EN LA INDUSTRIA
AERONÁUTICA Y AEROESPACIAL**

HOLMES DANIEL SUÁREZ ROMERO

**Monografía para obtener el título de Especialista en Gestión de la Integridad
y corrosión**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN
BOGOTÁ
2021**

DEDICATORIA

A mi madre Adriana Romero Builes, que me concedió la vida, mi motor, mi mejor amiga y mi amor eterno, a ella en especial le dedico este triunfo

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1. OBJETIVOS | 11 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 11 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 2. METODOLOGÍA | 12 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 3.1 CROMO TRIVALENTE | 13 |
| 3.2 ALUMINIO 2024-T3 | 14 |
| 3.3 CORROSIÓN EN LA ALEACIÓN 2024-T3 | 15 |
| 3.4 ESTUDIOS RECIENTES EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL Y AERONÁUTICA | 16 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 17 |
| 4.1 MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS Y/O QUÍMICOS ÓPTIMOS A LOS QUE SOMETE EL RECUBRIMIENTO EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3..... | 17 |
| 4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO TRIVALENTE | 20 |
| 4.3 PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO TRIVALENTE EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3 | 22 |
| 4.4 ESTUDIO DE CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA Y AEROESPACIAL | 25 |
| 4.4.1 Desprendimiento de hidrogeno. | 25 |
| 4.4.2 Stress corrosion cracking (SSC). | 26 |
| 4.4.3 Corrosión Localizada. | 27 |
| 5. CONCLUSIÓN | 29 |
| BIBLIOGRAFÍA | 30 |
| ANEXOS | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Diagrama de flujo del proceso bibliográfico | 12 |
| Figura 2. Curva de polarizacion en una concentracion de 0,5M a una voltametría cíclica de 0,2 mV/s..... | 18 |
| Figura 3. Curva de polarizacion entre AA224-T3 y AA2024-T351, con base al desoxidante utilizado en el preparación de la muestra | 20 |
| Figura 4. Micrografía SEM de la superficie del recubrimiento de conversión de cromo..... | 22 |
| Figura 5. (a-c) Imágenes TEM de las secciones transversales de los recubrimientos de conversión de cromo trivalente en las muestras AA 2024 - T3 para a) muestra laminada de aleación A; b) muestra pulida de aleación A; c) muestra pulida de aleación B..... | 24 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Composición química del AA2024-T53..... | 15 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Glosario | 34 |
| Anexo B. Resultado de las ecuaciones a partir de los parámetros de búsqueda . | 35 |

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO DEL ARTE DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO TRIVALENTE EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3 EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA Y AEROESPACIAL

AUTOR: HOLMES DANIEL SUÁREZ ROMERO*

PALABRAS CLAVES: Cromo trivalente, aluminio, recubrimiento, corrosión, aeroespacial, aeronáutica,

En esta monografía se realiza un estudio basado en el estado del arte sobre el recubrimiento de conversión de cromo trivalente en la aleación de aluminio 2024-T3, también se realiza un estudio en su aplicación en la industria aeronáutica y aeroespacial, ya que estos recubrimientos son muy utilizados contra la corrosión atmosférica, un problema que aqueja a estas industrias a nivel mundial. La revisión del estado del arte se hace con el fin de encontrar las mejores condiciones de operación del recubrimiento en la aleación de aluminio, y a su vez analizar las propiedades anticorrosivas que estas se generan una vez entre en interacción con el medio ambiente corrosivo. En el desarrollo de esta monografía se realizó una revisión entorno al campo de la corrosión, seguidamente se analizó sus consecuencias en la industria aeronáutica y aeroespacial. Los resultados deberían servir de insumo a posteriores investigaciones experimentales, donde se apliquen las recomendaciones hechas.

INTRODUCCIÓN

La industria aeroespacial revolucionó el transporte de seres humanos, mercancías, comercio internacional y los intercambios de todo tipo. En consecuencia, algunos aviones sufren una corrosión severa. Para garantizar la seguridad, puede ser necesaria una intervención importante en la aeronave, como el reemplazo de piezas estructurales corroídas o dañadas mecánicamente¹

Dentro de la industria aeronáutica y aeroespacial existen diversos temas de interés para el desarrollo tecnológico de la misma; lamentablemente hay un fenómeno electroquímico que apremia a esta industria y no deja de ser un tema de suma importancia a tratar, cuando los materiales metálicos como el aluminio empleado en la fabricación de las aeronaves, dejan de ser funcionales debido a la corrosión u oxidación por las diferentes condiciones de operación en las que se ve sometidas estas².

Las aleaciones de aluminio ocupan un lugar muy importante en los campos aéreos, industrial y del transporte. El recubrimiento de conversión del proceso de cromo trivalente es el candidato principal para reemplazar los recubrimientos de conversión de cromato heredados utilizados para proteger las aleaciones de aluminio aeroespaciales, en especial la 2024-T3 de la corrosión y promover la adhesión con capas de imprimación³. La aleación es conocida por sus buenas propiedades mecánicas demandadas por el sector aeronáutico, sin embargo, esta aleación es muy susceptible a la corrosión en condiciones agresivas⁴.

En un intento por cumplir con los fines de optimización en el campo de los recubrimientos para la mitigación de la corrosión en los metales, se llevaron a cabo investigaciones en los últimos años con base en la utilización del cromo trivalente

¹ PROENÇA, C. S., PEREIRA, A. M., CABRAL, A. M., PIGLIARU, L., ROHR, T., ARAÚJO, M. E. M., & CORREIA, J. Trivalent chromium conversion coating on AA2024-T3 used in aeronautical and aerospace industry. *Surface and Interface Analysis*, 51(12), 2019 pp. 1298–1311. <https://doi.org/10.1002/sia.6653>

² VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Comparative analysis of the anticorrosive properties of trivalent chromium conversion coatings formed on 2024-T3 and 2024-T351 aluminium alloys. *Corrosion Science*, 167. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108508>

³ GUO, Y., & FRANKEL, G. S. Active Corrosion Inhibition of AA2024-T3 by Trivalent Chrome Process Treatment. In *Corrosion Science Section Corrosion* (Vol. 68, Issue 4) 2012

⁴ NGUYEN, A. S., & PÉBÈRE, N. A local electrochemical impedance study of the self-healing properties of waterborne coatings on 2024 aluminium alloy. *Electrochimica Acta*, 222, 2016 pp. 1806–1817. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.152>

en el proceso de protección del aluminio 2024-T3 contra la corrosión en la industria aeronáutica y aeroespacial.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio basado en la literatura de antecedentes sobre el revestimiento con cromo trivalente en la aleación de aluminio 2024-T3 utilizado en los componentes estructurales para la industria aeroespacial y aeronáutica.

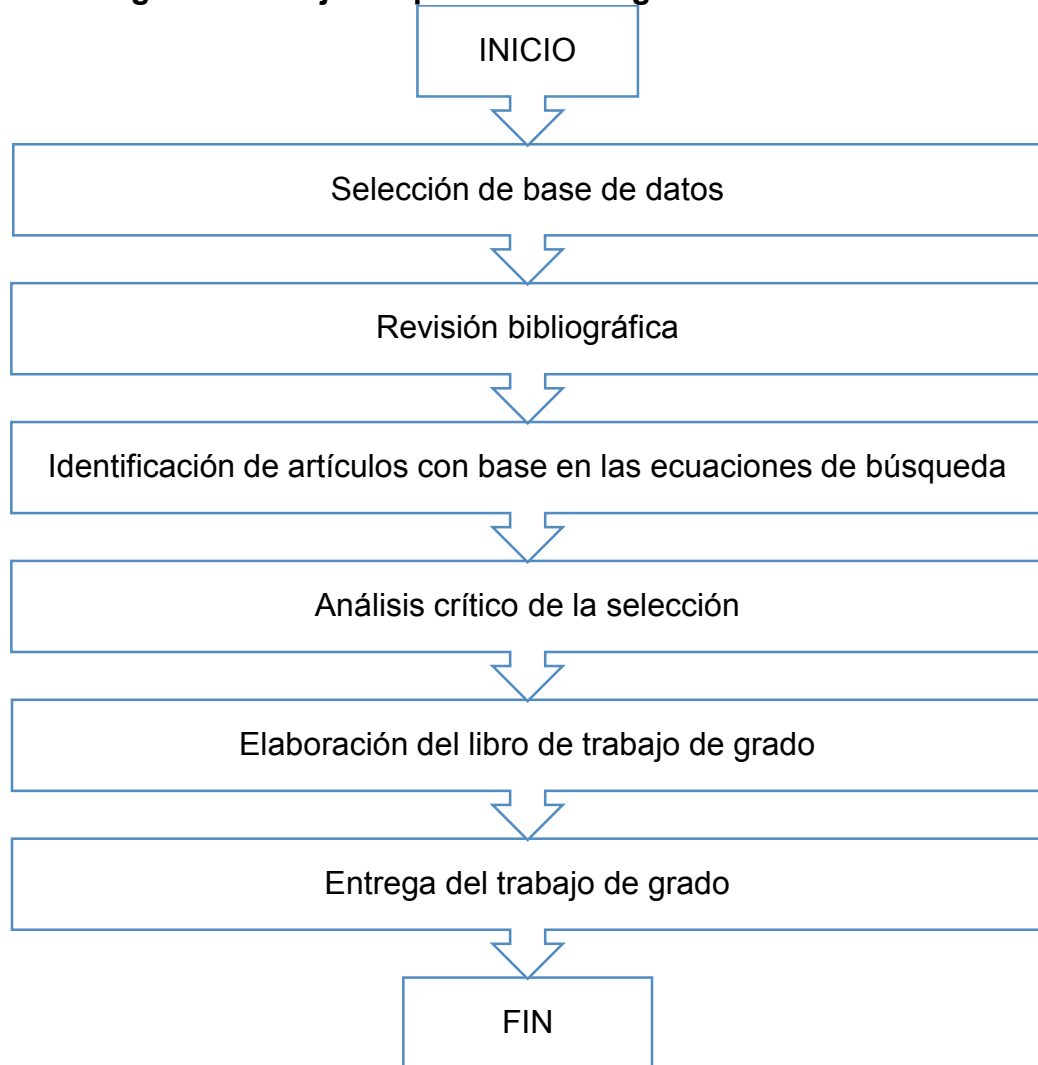
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Exponer los métodos electroquímicos y/o químicos óptimos a los que somete el recubrimiento de cromo trivalente en la aleación de aluminio 2024-T3.
- Plantear las mejores condiciones de operación del cromo trivalente en la aleación de aluminio 2024-T3.
- Analizar las propiedades anticorrosivas del recubrimiento de conversión de cromo trivalente en la aleación de aluminio 2024-T3 en la industria aeroespacial y aeronáutica.
- Resaltar estudios de corrosión en la industria aeronáutica y aeroespacial.

2. METODOLOGÍA

En la **Figura 1** se muestran las etapas a seguir durante el trabajo de grado. Además, en el **Anexo A** se encontrará el glosario donde se explica los términos generados en las ecuaciones a partir de los parámetros de búsqueda.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso bibliográfico



3. MARCO TEÓRICO

3.1 CROMO TRIVALENTE

El éxito del uso del cromo en aplicaciones industriales se atribuye a la extraordinaria combinación de propiedades que posee y que no se encuentran en ningún otro metal comercialmente disponible. La propiedad más importante que presenta es su dureza, combinada con una gran resistencia al desgaste, a la corrosión y a la erosión⁵. Los depósitos de cromo obtenidos por electrólisis son de gran importancia en el campo de los revestimientos decorativos e industriales; el cromo metálico no se puede obtener directamente de una solución de Cr^{+3} sulfatos o cloruros, ya que forman complejos estables e inertes con OH^- , SO_4^{-2} y Cl^- , iones y óxidos durante la deposición que interfieren con la reacción catódica. El cromo debe formar un complejo con un compuesto (ligando) que pueda deslizar fácilmente el Cr^{+3} iones y por lo tanto conducir a su reducción a Cr^0 ⁶.

Los recubrimientos de conversión de Cr hexavalente se utilizan en gran medida para proteger las aleaciones de Al contra la corrosión, pero su uso en la AA 2024 en la industria aeronáutica y aeroespacial está prohibida por el reglamento europeo REACH⁷. Por lo tanto, muchos estudios de investigación se han centrado en el desarrollo de recubrimientos de conversión libres de Cr (VI), como es el caso del recubrimiento de proceso de Cr trivalente⁸. A pesar del creciente interés en los recubrimientos de conversión que cumplen con los requisitos de salud y medioambientales de las directivas, los artículos publicados sobre recubrimientos de conversión basados en Cr (III) son limitados, de igual forma, se ha dedicado mucho interés al desarrollo de la formulación y aplicación de recubrimientos de conversión alternativos. Entre las soluciones de tratamiento de sustitución sugeridas que se investigan, la conversión de cromo trivalente se ha considerado un candidato adecuado hasta la fecha⁹.

⁵ HESAMEDINI, S., & BUND, A. Trivalent chromium conversion coatings. In *Journal of Coatings Technology and Research* (Vol. 16, Issue 3, pp. 623–641). Springer New York LLC. 2019 <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00210-9>

⁶ SUAREZ, O. J., OLAYA, J. J., SUAREZ, M. F., & RODIL, S. E. Corrosion resistance of decorative chromium films obtained from trivalent chromium solutions. In *J. Chil. Chem. Soc* (Vol. 57, Issue 1) 2012

⁷ VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Op. Cit.

⁸ HUGHES, A. E., BOAG, A., GLENN, A. M., MCCULLOCH, D., MUSTER, T. H., RYAN, C., LUO, C., ZHOU, X., & THOMPSON, G. E. Corrosion of AA2024-T3 Part II: Co-operative corrosion. *Corrosion Science*, 53(1), 2011 pp. 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.030>

⁹ HESAMEDINI, S., & BUND, A. Op. Cit.

A diferencia de los recubrimientos de cromato, se sabe que las propiedades anticorrosión de los recubrimientos de cromo trivalente dependen significativamente de la preparación de la superficie, es decir, el pre tratamientos realizados antes del proceo del como trivalente¹⁰

3.2 ALUMINIO 2024-T3

La aleación de aluminio 2024-T3 es una aleación de alta resistencia, perteneciente a la serie Al-Cu-Mg. Se utiliza principalmente para fabricar varias piezas mecánicas de alta carga, como esqueletos de aeronaves. La aleación de aluminio 2024-T3 es difícil de soldar; con soldadura por fusión tradicional, especialmente soldada con otro material como aleación de titanio o aleación de cobre¹¹. Sus buenas propiedades mecánicas están relacionadas principalmente con la adición de diferentes elementos de aleación que conducen a una disminución de la resistencia a la corrosión de las aleaciones en comparación con el aluminio puro

La aleación de aluminio 2024-T3 se ha utilizado ampliamente en la estructura de aviones. Sin embargo, debido a las diversas partículas intermetálicas a las picaduras y a la corrosión intergranular. Los recubrimientos de conversión de cromato se ha empleado en el proceso de tratamiento de superficies para la aleación de AA 2024-T3 y otras aleaciones metálicas por su excelente rendimiento de anticorrosión¹², pero una de las pocas desventajas que posee la aleación es la susceptibilidad a la corrosión localizada. Esto se debe en parte al contenido de cobre como se observa en la **Tabla 1**, ya que puede establecer celdas galvánicas con la matriz de aluminio y producir corrosión localizada (especialmente corrosión por picaduras y corrosión intergranular)¹³.

¹⁰ VERDALET-GUARDIOLA, X., BONINO, J. P., DULUARD, S., FORI, B., & BLANC, C. Influence of the alloy microstructure and surface state on the protective properties of trivalent chromium coatings grown on a 2024 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 344, 2018 pp. 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.046>

¹¹ QI, J., GAO, L., LI, Y., WANG, Z., THOMPSON, G. E., & SKELDON, P. An Optimized Trivalent Chromium Conversion Coating Process for AA2024-T351 Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(7), 2017 pp. C390–C395. <https://doi.org/10.1149/2.1371707jes>

¹² CAI, C., LIU, X. Q., TAN, X., LI, G. D., WANG, H., LI, J. M., & LI, J. F. A Zr- and Cr(III)-containing conversion coating on Al alloy 2024-T3 and its self-repairing behavior. *Materials and Corrosion*, 68(3), 2017 pp. 338–346. <https://doi.org/10.1002/maco.201609067>

¹³ CARREIRA, A. F., PEREIRA, A. M., VAZ, E. P., CABRAL, A. M., GHIDINI, T., PIGLIARU, L., & ROHR, T. Alternative corrosion protection pretreatments for aluminum alloys. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(4), 2017 pp. 879–892. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9922-9>

Tabla 1. Composición química del AA2024-T53.

| Cu | Mg | Mn | Fe | Si | Zn | Cr | Ti | Otros |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 4,4% | 1.5% | 0,6% | 0,5% | 0,5% | 0,25% | 0,10% | 0,15% | 0,15% |

Fuente: CARREIRA, A. F., PEREIRA, A. M., VAZ, E. P., CABRAL, A. M., GHIDINI, T., PIGLIARU, L., & ROHR, T. Alternative corrosion protection pretreatments for aluminum alloys. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(4), 2017 pp. 879–892. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9922-9>

3.3 CORROSIÓN EN LA ALEACIÓN 2024-T3

La corrosión puede conducir a la no disponibilidad de las aeronaves y en casos extremos, a una falla catastrófica. Bajo estas circunstancias es importante que el lector conozca los fundamentos de corrosión y control, evaluación y predicción para estos materiales¹⁴. Las aleación de aluminio de alta resistencia 2024 y se ha utilizado ampliamente en la industria de la aviación para muchos componentes importantes. Muchas investigaciones han evaluado el mecanismo detrás del fracaso de la aleación 2024, se ha demostrado que el SCC (stress corrosión cracking) es una de las fallas comunes e incidentales de estas dos aleaciones en la atmósfera¹⁵. La acción combinada de la tensión aplicada y el ambiente corrosivo también puede promover el agrietamiento por corrosión bajo tensión (stress corrosión cracking) en aleaciones susceptibles¹⁶

La corrosión de las aleaciones de aluminio suele ser de naturaleza localizada, su forma más común son las picaduras e implica mecanismos electroquímicos. En soluciones acidificadas, la reacción anódica básica es la disolución del metal y las reacciones catódicas son la reducción de oxígeno e hidrógeno como resultado de la hidrólisis de iones de aluminio¹⁷.

¹⁴ SUAREZ, O. J., OLAYA, J. J., SUAREZ, M. F., & RODIL, S. E. Op. Cit.

¹⁵ GE, F., ZHANG, L., TIAN, H., YU, M., LIANG, J., & WANG, X. Stress Corrosion Cracking Behavior of 2024 and 7075 High-Strength Aluminum Alloys in a Simulated Marine Atmosphere Contaminated with SO₂. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(1), 2020 pp. 410–422. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04537-7>

¹⁶ CABRINI, M., BOCCHI, S., D'URSO, G., GIARDINI, C., LORENZI, S., TESTA, C., & PASTORE, T. Stress corrosion cracking of friction stir-welded AA-2024 T3 alloy. *Materials*, 13(11). 2020 <https://doi.org/10.3390/ma13112610>

¹⁷ MAHDAVI, S., ALLAHKARAM, S. R., & HEIDARZADEH, A. Characteristics and properties of Cr coatings electrodeposited from Cr(III) baths. *Materials Research Express*, 6(2). 2019 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaeb4f>

3.4 ESTUDIOS RECIENTES EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL Y AERONÁUTICA

Investigaciones hechas en los últimos años con base en la corrosión en la industria aeroespacial y aeronáutica, a partir de las condiciones operacionales en las que se ve sometida, certifican una necesidad en el avance de los recubrimientos en esta industria que abarca gran parte de la humanidad. Los componentes aeroespaciales fabricados con aleaciones 2xxx y 7xxx incluyen revestimientos de aeronaves, largueros de alas, capós, fuselaje, cristales de alas, timones, estructuras de aeronaves y cabinas de presión, etc. En general, se considera que las aleaciones de aluminio en la industria aeroespacial exhiben una mejor vida bajo cargas cíclicas en combinación con su resistencia a la corrosión y al desgaste¹⁸. El cromo de conversión trivalente se utiliza particularmente para la aleación AA2024 durante más de 30 años en la industria aeronáutica y aeroespacial, debido a que presenta buenas propiedades mecánicas y resistencia a la fatiga.

¹⁸ MADHAVI, Y., RAMA KRISHNA, L., & NARASIAH, N. Corrosion-Fatigue Performance of Hard Anodized and MAO-Coated 2024-T3 and 7075-T6 Aerospace Al Alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(9), 2021 pp. 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02313-7>

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS Y/O QUÍMICOS ÓPTIMOS A LOS QUE SOMETE EL RECUBRIMIENTO EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3

A continuación, se planteara las condiciones de operación más apropiadas para llevar a cabo de manera satisfactoria el proceso de electroquímico y/o químico con base en la literatura encontrada a partir de las propiedades del aluminio 2024-T3

Como se ha mencionado anteriormente, el aluminio y sus aleaciones se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial y aeronáutica por sus propiedades. Las aleaciones de aluminio generan una capa de óxido para resistir la corrosión cuando se ve expuesta a entornos hostiles debido a las condiciones climáticas o del ambiente como la presión, temperatura, humedad, gases corrosivos, ácidos, sales, entre otros.

Por lo tanto, *Sofia* y colaboradores prepararon una muestra de aluminio 2024-T3 lijado inicialmente para la superficie con SiC, con Alodine 1200S (trióxido de cromo, utilizado para el tratamiento del aluminio en los campos de la aeronáutica), sumergiéndolo en un baño alcalino (Henkel) a 60°C durante 10 min; posterior a este proceso se utilizó una corriente de agua desionizada en un baño desengrasante a 65 °C alrededor de 15 min.

De forma comparativa, se empleó PreCoat A32 (capa de pasivación en la superficie del aluminio), bañándolo en un desengrasante alcalino a 55 °C durante 5 min, culminado el tiempo se limpian con agua desionizada, después, se sumergen en una mezcla de Postrinse A32 y peróxido de hidrogeno entre 15° y 25 °C, y para finalizar se deja con agua desionizado como forma de secado hasta que sea de su uso.

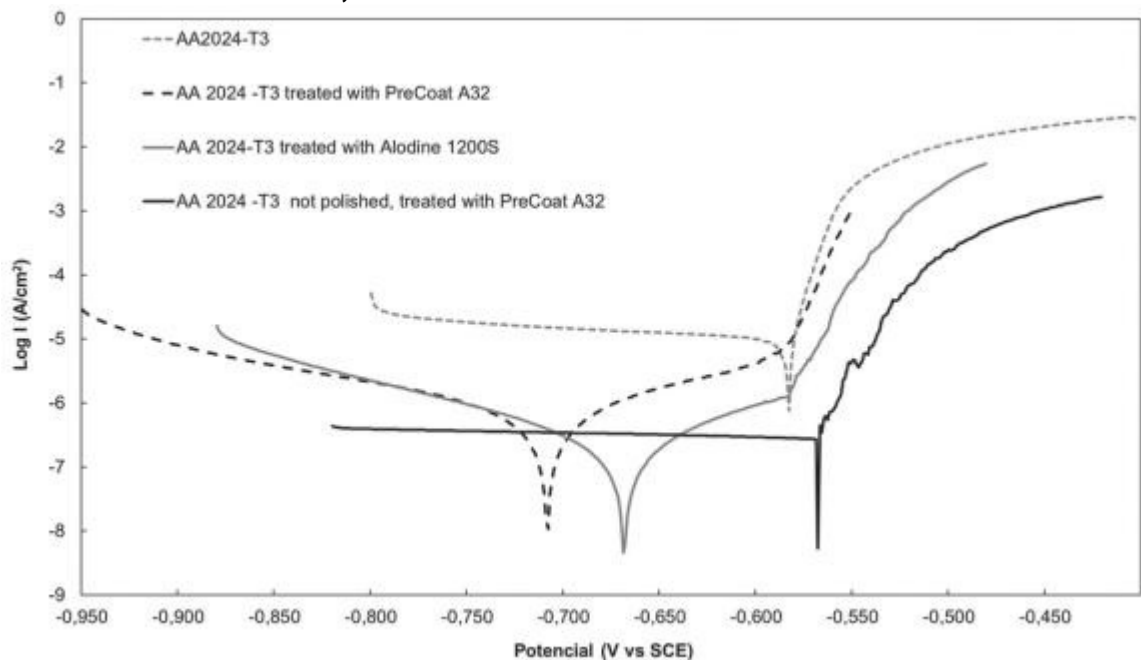
Una vez se culmina con estos baños, se realiza un tratamiento con Alodine 1200 durante 2 min a temperatura ambiente, finalizado el tiempo se lleva a un horno para su respectivo secado a 60 °C

Dentro de las condiciones operativas electroquímicas que se llevaron a cabo, encontramos que se utilizó tres electrodos en una celda de vidrio electroquímica convencional, se usó un electrodo saturado de calomel (SCE, 0.241 V vs NHE), un

contra-electrodo de rejilla de platino y como medio electrolítico una solución acuosa de NaCl de concentración 0,5M.

Con base en estas condiciones operativas, se realiza una gráfica de polarización como se observa en la Figura 1, donde se puede calcular la velocidad de corrosión mediante la intercepción de los segmentos lineales extrapolados de las ramas anódicas y catódicas de las curvas¹⁹.

Figura 2. Curva de polarización en una concentración de 0,5M a una voltametría cíclica de 0,2 mV/s



Donde se puede observar en la curva de polarización que hay una perturbación en el área anódica, esta se puede presentar por falta de homogenización en la preparación de la muestra. Para la muestra de AA2024-T3 sin pulir tratado con PreCoat A32 presenta un mejor comportamiento anticorrosivo en comparación con la misma muestra pulida, se puede concluir que la capa de óxido de aluminio se encuentra en su estado natural junto con su revestimiento de conversión de cromato, sin alguna afectación a la hora de emplear una lija para su posterior tratamiento electroquímico.

¹⁹ PROENÇA, C. S., PEREIRA, A. M., CABRAL, A. M., PIGLIARU, L., ROHR, T., ARAÚJO, M. E. M., & CORREIA, J. Op. Cit.

Por otro lado, *Verdelet-Guardiola* y colaboradores realizaron un estudio similar al anterior, en el cual se utilizó reactivos químicos como la acetona para eliminar los contaminantes de la superficie y agua desionizada para preparar la muestra para su respectivo análisis.

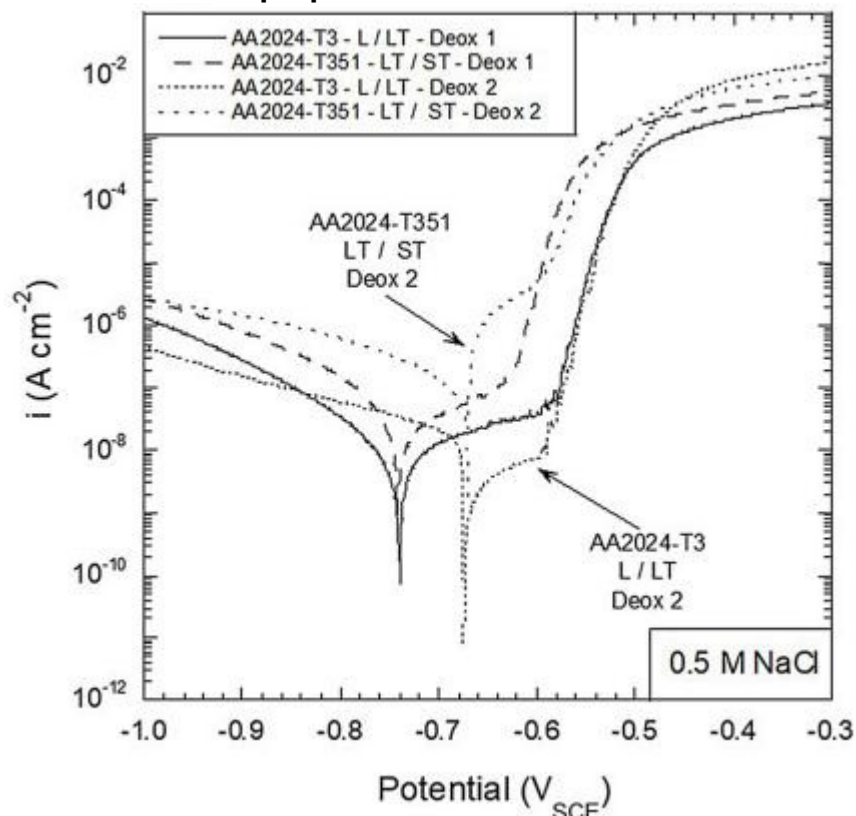
Este estudio se llevó a cabo realizando una comparación entre la AA2024-T3 y AA2024-T351, aleaciones comunes en la industria aeronáutica y aeroespacial, la diferencia que más resalta es la composición química que difiere de forma mínima en el cobre, se utilizó una solución desoxidante Socosurf A1858 y A1806 para la preparación de la muestra; estas se sumergieron en esta solución desoxidante a una temperatura de 50 °C durante 5 horas.

Las propiedades de corrosión de las muestras recubiertas de cromo trivalente se evaluaron primero mediante pruebas de niebla salina neutra (NSST) porque estas pruebas se utilizan ampliamente en la industria y están definidas por la norma ISO9227. Además, el estándar aeronáutico requiere NSST para certificar capas de conversión. En este marco, los resultados de NSST fueron relevantes y útiles para fortalecer el impacto industrial de los resultados²⁰.

En la **Figura 2**, se puede observar las curvas de polarización entre AA2024-T3 y AA2024-T351, con base en eso podemos decir que para AA2024-T351 LT/LS (corte transversal corto), mostró el peor comportamiento de corrosión con el desoxidante A1858, también se puede apreciar un cambio significativo de aproximadamente 60 ± 10 mV para el potencial de corrosión hacia valores menos negativos entre los desoxidantes 1 y 2 para las dos aleaciones, pero ninguna variación del potencial de picadura visible. Por lo tanto, para ambas aleaciones, el rango de potencial correspondiente a la meseta de pasivación se redujo para la desoxidación con A1806 en comparación con el pretratamiento de desoxidación con A1858.

²⁰ VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Op. Cit.

Figura 3. Curva de polarización entre AA224-T3 y AA2024-T351, con base al desoxidante utilizado en el preparación de la muestra



Fuente: VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Comparative analysis of the anticorrosive properties of trivalent chromium conversion coatings formed on 2024-T3 and 2024-T351 aluminium alloys. *Corrosion Science*, 167. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108508>

4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO TRIVALENTE

Los recubrimientos de conversión de cromato a menudo se aplican para conferir protección contra la corrosión. Sin embargo, la toxicidad y los problemas de salud relacionados con las especies de Cr (VI) han estimulado el desarrollo de tratamientos alternativos ecológicos, incluidos los recubrimientos de conversión de cromo trivalente²¹.

²¹ QI, J., NĚMCOVÁ, A., WALTON, J. R., ZHOU, X., SKELDON, P., & THOMPSON, G. E. Influence of pre- and post-treatments on formation of a trivalent chromium conversion coating on AA2024 alloy. *Thin Solid Films*, 616, 2016 pp. 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.08.044>

Los recubrimientos de conversión se basan en la adsorción de óxido metálico protector en la película de óxido existente, sin embargo, puede incluir no metales en algunos casos. Al eliminar y reemplazar la capa de óxido del sustrato metálico y mediante un proceso químico o electroquímico, los recubrimientos de conversión proporcionan una barrera aislante de baja solubilidad al sustrato.³ Este método retarda las reacciones de corrosión que pueden tener lugar sobre el sustrato con la formación de una capa pasiva de difusión controlada. 2 o liberación de especies inhibitoras de la corrosión²².

Guo y sus colaboradores hicieron un estudio de la inhibición activa de la corrosión en una aleación de Al (AA2024-T3) mediante revestimientos de cromo trivalente.

Para evaluar las propiedades de autocuración del revestimiento de cromo trivalente se ensambló una celda que contenía un electrolito corrosivo con dos muestras paralelas de aleación de Al (AA2024-T3) (una tratada con cromo trivalente y la otra sin tratar) separadas por un oval ring. Aunque las muestras tratadas con un revestimiento de cromo trivalente y sin tratar no estaban en contacto, se encontraron especies de cromo (Cr) en la muestra sin tratar. Esta disolución y transporte de cromo (Cr) se atribuyeron a la formación transitoria de Cr (VI). Además, la resistencia a la polarización de la superficie no tratada adyacente al revestimiento de conversión de cromo trivalente tratado fue 29 más que el control de la muestra sin tratar. Esto implica que la película de conversión de cromo trivalente proporciona inhibición activa de la corrosión a una superficie vecina sin tratar²³.

En otro estudio, *Mahdavi* y compañía, investigaron los efectos de los baños de cromo trivalente que han sido desarrollados como alternativa a la electrodeposición de cromo hexavalente, como se ha mencionado anteriormente el Cr^{+3} (cromo trivalente) no posee iones tóxicos.

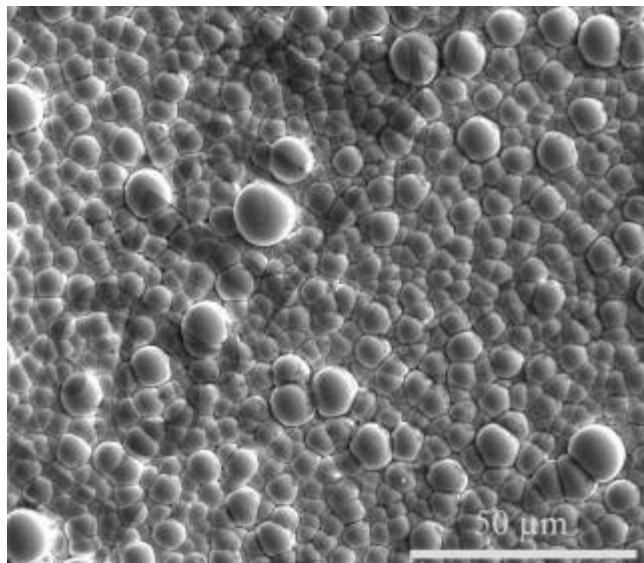
Por lo tanto, se analizó las características y propiedades del revestimiento de cromo, en este estudio se observó las condiciones adecuadas para producir un revestimiento de cromo uniforme, grueso y eficiente. Se comparó con un sustrato de acero inoxidable 316L para compararlo con el revestimiento de cromo, ya que sabe que el acero inoxidable presenta muy buenas propiedades anticorrosivas.

²² HESAMEDINI, S., & BUND, A. Op. Cit.

²³ GUO, Y., & FRANKEL, G. S. Active Corrosion Inhibition of AA2024-T3 by Trivalent Chrome Process Treatment. In Corrosion Science Section Corrosion (Vol. 68, Issue 4). 2012

Las condiciones de operación fueron las siguientes; el cromo se electrodepositó a partir de un baño que contiene 0.3M de $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ la temperatura, el tiempo de deposición, la densidad de corriente y el pH fueron 30 °C, 60 min, 14 y 15 $\text{mA}\cdot\text{cm}^2$, respectivamente. Potencial de corrosión (E_{corr}) del sustrato (-140 mV) es más noble y su corrosión densidad de corriente (I_{corr}) es la mitad del recubrimiento de Cr (con E_{corr} y I_{corr} de -270 mV y 0,1 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente), que indican una mayor resistencia a la corrosión de 316L en comparación con la película de Cr electrodepositada. Este comportamiento puede deberse a la morfología nodular como se observa en la **Figura 3** y agrietada del recubrimiento de cromo, que aumentan el área de contacto entre la muestra y el medio corrosivo²⁴.

Figura 4. Micrografía SEM de la superficie del recubrimiento de conversión de cromo



Fuente: MAHDAVI, S., ALLAHKARAM, S. R., & HEIDARZADEH, A. Characteristics and properties of Cr coatings electrodeposited from Cr(III) baths. *Materials Research Express*, 6(2). 2019 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaeb4f>

4.3 PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DEL RECUBRIMIENTO DE CONVERSIÓN DE CROMO TRIVALENTE EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 2024-T3

Los recubrimientos de conversión de cromato son muy efectivos como inhibidores de la corrosión y proporcionan una base adhesiva para la aplicación de

²⁴ MAHDAVI, S., ALLAHKARAM, S. R., & HEIDARZADEH, A. Characteristics and properties of Cr coatings electrodeposited from Cr(III) baths. *Materials Research Express*, 6(2). 2019 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaeb4f>

recubrimientos. Sin embargo, la aplicación de estos recubrimientos de cromo es costosa debido a las consideraciones relacionadas con la protección ambiental y la gestión de desechos peligrosos. Por ejemplo, los pasos complejos antes de la aplicación del recubrimiento de conversión incluyen desengrasado con vapor, limpieza alcalina y desoxidación para la preparación de la muestra. Los recubrimientos de conversión involucran procesos complejos localizados que tienen lugar en superficiales asociadas con partículas intermetálicas y fases secundarias²⁵.

Los procesos de cromo trivalente constituyen una de las soluciones de sustitución más prometedoras a diferencia de los recubrimientos de cromo, se sabe que las propiedades anticorrosión de los recubrimientos de cromo trivalente dependen significativamente de la preparación de la superficie, es decir, los pretratamientos realizados antes del recubrimiento de conversión de cromo para eliminar grasas y aceites.

La estructura física y la composición química del revestimiento resultante dependen de la composición del baño de revestimiento, la composición química de la superficie de la aleación y la morfología de la superficie de la aleación, es decir, la rugosidad de la superficie y la densidad de picaduras²⁶.

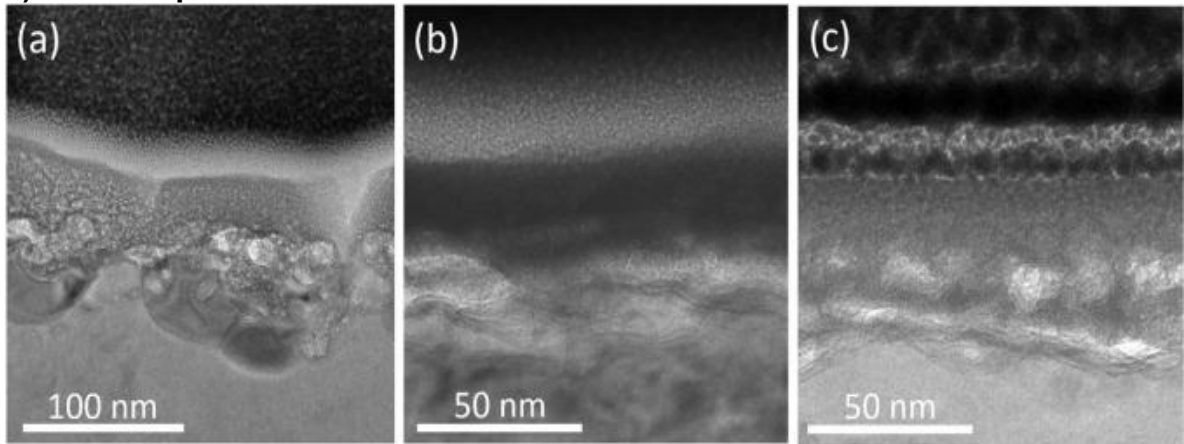
Verdalet-Guardiola y compañía investigaron el efecto de los pretratamientos en la morfología de la superficie de la aleación de aluminio 2024-T3 para el uso del revestimiento de inversión de cromo y se evaluaron sus propiedades protectoras mediante medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica y pruebas de niebla salina neutra, entre otras. La reactividad de la superficie de la aleación antes y después de los dos pasos de pretratamiento, relacionada principalmente con el comportamiento de corrosión de las partículas intermetálicas gruesas presentes en la superficie de la muestra, se evaluó mediante la realización de polarización anódica en un 0.1 M Na₂SO₄.

El material utilizado fue un AA 2024-T3 laminado en frío proporcionado en forma de láminas de diferentes espesores con composiciones químicas similares se denominaron aleación A para la hoja de 1 mm de espesor y aleación B para la hoja de 3 mm de espesor, respectivamente.

²⁵ SABAU, A. S., MEYER, H. M., & LEONARD, D. N. Laser-interference pulse number dependence of surface chemistry and sub-surface microstructure of AA2024-T3 alloy. *Optics and Laser Technology*, 131 2020. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106457>

²⁶ SHRUTHI, T. K., & SWAIN, G. M. Communication—Role of Trivalent Chromium on the Anti-Corrosion Properties of a TCP Conversion Coating on Aluminum Alloy 2024-T3. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(2), 2018 pp. C103–C105. <https://doi.org/10.1149/2.1301802jes>

Figura 5. (a-c) Imágenes TEM de las secciones transversales de los recubrimientos de conversión de cromo trivalente en las muestras AA 2024 - T3 para a) muestra laminada de aleación A; b) muestra pulida de aleación A; c) muestra pulida de aleación B.



Fuente: VERDALET-GUARDIOLA, X., BONINO, J. P., DULUARD, S., FORI, B., & BLANC, C. Influence of the alloy microstructure and surface state on the protective properties of trivalent chromium coatings grown on a 2024 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 344, 2018 pp. 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.046>

Para la muestra pulida de la aleación **Figura 4B**, el espesor total de la capa fue de alrededor de 50 nm. Para muestra pulida de aleación **Figura 8C**, el espesor total podría evaluarse entre 60 y 75 nm teniendo en cuenta o no una capa externa defectuosa denominada "rugosidad". Para la muestra laminada de la aleación **Figura 4A**, se observó una fuerte heterogeneidad en el espesor del recubrimiento de conversión de cromo trivalente con zonas de 50 nm de espesor comprendidas entre zonas con un espesor de aproximadamente 115 nm.

La mayor rugosidad observada para la muestra laminada de aleación **Figura 4A** aumentó ligeramente la cinética de crecimiento del recubrimiento de conversión de cromo. Además, los resultados del crecimiento del recubrimiento podrían verse afectadas por el cobre electroactivo antes de que sea cubierto por el recubrimiento en crecimiento. De hecho, el cobre electroactivo constituye sitios catódicos donde pueden producirse reducciones de oxígeno y protones, lo que lleva a un aumento local del pH que promueve la precipitación de la capa rica en cromo y circonio. La cobertura de cobre de la superficie más fuerte observada para la muestra pulida de

la aleación **Figura 4B** debería explicar una cinética rápida de crecimiento del recubrimiento de conversión de cromo trivalente²⁷.

4.4 ESTUDIO DE CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA Y AEROESPACIAL

En condiciones de emergencia, fase de prelanzamiento o almacenamiento prolongado para naves espaciales reutilizables, las aleaciones de aluminio pueden estar expuestas a entornos hostiles, como atmósferas marinas asociadas con sitios de lanzamiento o gases corrosivos, lo que resulta en pérdida de pasividad y corrosión de la aleación. Para proteger las aleaciones de aluminio contra la corrosión, es común aplicar un sistema de recubrimiento que consiste en un esquema de recubrimiento y un pretratamiento en la superficie metálica de la aleación²⁸.

La resistencia de una aleación de Al tratable térmicamente se mejora principalmente mediante un proceso de endurecimiento por precipitación, en el que los principales elementos de aleación (Cu, Mg y Zn) precipitan en forma de un compuesto intermetálico /nueva fase.

4.4.1 Desprendimiento de hidrogeno. Las aleaciones de aluminio endurecido son pertinentes para una variedad de aplicaciones aeroespaciales. Los componentes aeroespaciales fabricados con aleaciones 2xxx y 7xxx incluyen revestimientos de aeronaves, largueros de alas, capós, fuselaje, cristales de alas, timones, estructuras de aeronaves y cabinas de presión²⁹

Por otro lado tenemos las aleaciones de titanio; las aleaciones de titanio ofrecen propiedades atractivas: alta relación resistencia y peso, también una buena resistencia a la corrosión, buena confortabilidad y biocompatibilidad, por lo que se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones como en las industrias aeroespacial y aeronáutica.

²⁷ VERDALET-GUARDIOLA, X., BONINO, J. P., DULUARD, S., FORI, B., & BLANC, C. Influence of the alloy microstructure and surface state on the protective properties of trivalent chromium coatings grown on a 2024 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 344, 2018 pp. 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.046>

²⁸ CARREIRA, A. F., PEREIRA, A. M., VAZ, E. P., CABRAL, A. M., GHIDINI, T., PIGLIARU, L., & ROHR, T. Op. Cit.

²⁹ MADHAVI, Y., RAMA KRISHNA, L., & NARASIAH, N. Op. Cit.

Por lo tanto, *Muñoz* y compañía, demostró que cuando el titanio se expone a sulfuros, cloruros y fosfatos, la resistencia a la corrosión del titanio disminuye³⁰. Cuando las aleaciones de Ti entran en contacto con sulfuros, se produce un ataque uniforme. La capa de óxido que se crea en la superficie del metal se deteriora y se disuelve, eliminando el protector contra la corrosión. Un ión soluble de Ti va al electrolito, $Ti \rightarrow Ti^{3+} + 3e^-$. La reacción química del ácido sulfúrico es el siguiente $Ti + 2H_2SO_4 + 2e^- \rightarrow TiSO_4$ ²³¹

La difusión de hidrógeno puede provocar fragilización y hacer que el titanio sea susceptible a la fractura de la superficie intergranular³². La fragilización de la superficie induce una disolución más rápida del material y podría aumentar la velocidad de corrosión. La capa de óxido no siempre está compuesta de TiO₂. El dióxido de titanio se forma por mitigación y adsorción de OH

4.4.2 Stress corrosion cracking (SSC). El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) es un problema común que afecta a las aleaciones de aluminio en aplicaciones aeroespaciales. Este tipo de corrosión es causado por los efectos simultáneos de la tensión de tracción y un ambiente corrosivo específico en materiales susceptibles. Desafortunadamente, la literatura sobre el comportamiento del SCC no es muy abundante en la aleación de aluminio 2024-T3 y cualquier artículo estudia el fenómeno del SCC de acuerdo con los estándares internacionales, tales como:

- ASTM G 44 - *Práctica estándar para la exposición de metales y aleaciones por inmersión alterna en una solución neutra de cloruro de sodio al 3.5%.*
- ASTM G 47 - *Método de prueba estándar para determinar la susceptibilidad al SCC de productos de aleaciones de aluminio 2xxx y 7xxx*
- ASTM G 49 - *Práctica estándar para la preparación y uso de probetas de prueba de corrosión por tensión directa.*

³⁰ CAI, C., LIU, X. Q., TAN, X., LI, G. D., WANG, H., LI, J. M., & LI, J. F. Op. Cit.

³¹ JAQUEZ-MUÑOZ, J., GAONA-TIBURCIO, C., LIRA-MARTINEZ, A., ZAMBRANO-ROBLEDO, P., MALDONADO-BANDALA, E., SAMANIEGO-GAMEZ, O., NIEVES-MENDOZA, D., OLGUIN-COCA, J., ESTUPIÑAN-LOPEZ, F., & ALMERAYA-CALDERON, F. Susceptibility to pitting corrosion of ti-cp2, ti-6al-2sn-4zr-2mo, and ti-6al-4v alloys for aeronautical applications. *Metals*, 11(7). 2021 <https://doi.org/10.3390/met11071002>

³² DUBENT, S., & MAZARD, A. Characterization and corrosion behaviour of grade 2 titanium used in electrolyzers for hydrogen production. In *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 44, Issue 29, 2019 pp. 15622–15633. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.093>

En otras investigaciones se ha evaluado el mecanismo detrás del fracaso de las aleaciones de aluminio 2024. Se ha demostrado que el stress corrosión cracking es una de las fallas comunes en la atmósfera. Desempeña un papel importante en la corrosión de los metales. En atmósferas marinas, los metales están cubiertos por una fina película líquida que es inestable debido a las variaciones inherentes y la complejidad de las atmósferas marinas. La reacción redox y el proceso de corrosión en películas delgadas de líquido cambian a medida que cambia el estado de transición de la película de líquido.

Se ha encontrado que el SO₂ en atmósfera con 90% de humedad relativa podría potenciar el ataque local sobre una superficie bajo una fina película líquida, agravando así la corrosión de la aleación de aluminio 2024 en la industria aeronáutica y aeroespacial. Esto da como resultado un aumento significativo en la velocidad de corrosión de las aleaciones de aluminio³³.

4.4.3 Corrosión Localizada. La corrosión localizada es una de las principales causas de falla en la aleación 2024-T3. Entre varios tipos de ataque localizado que sufren las aleaciones de aluminio, la corrosión por exfoliación (EXCO) es una forma importante. Se cree que EXCO es una forma particular de corrosión intergranular (IGC) que puede ocurrir en la superficie de las aleaciones de aluminio forjado con una estructura de grano alargada³⁴. Durante este proceso de corrosión, las tensiones internas causadas por voluminosos productos de corrosión obligan a las capas de metal no corroído a alejarse del cuerpo del material, dando lugar a una apariencia en capas³⁵. EXCO puede provocar la falla del metal por desintegración gradual, y la presencia de corrosión por exfoliación reduce la tenacidad de la aleación y mejora la tasa de crecimiento de grietas por fatiga³⁶

Yi y colaboradores prepararon una capa externa del recubrimiento de cromo trivalente cromo en la placa de aleación de Al 2024 pretratada con Desoxidante 6 y ácido nítrico, respectivamente. Se encontró que la capa externa contenía más especies de Cr y Zr, que la capa interna independientemente de los pretratamientos con ácidos. Además, es probable que el recubrimiento con cromo trivalente muestre una estructura de dos capas con la parte interior como óxido de aluminio con enriquecimiento de F y la parte exterior como una mezcla de óxido / fluoruro de circonio y cromo y óxido de aluminio.

³³ GE, F., ZHANG, L., TIAN, H., YU, M., LIANG, J., & WANG, X. Op. Cit.

³⁴ PROENÇA, C. S., PEREIRA, A. M., CABRAL, A. M., PIGLIARU, L., ROHR, T., ARAÚJO, M. E. M., & CORREIA, J. Op. Cit.

³⁵ VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Op. Cit.

³⁶ BRAHAMI, A., FAJOU, J., & BOUCHOUICHA, B. Exfoliation Corrosion Impact on Microstructure, Mechanical Properties, and Fatigue Crack Growth of Aeronautical Aluminum Alloy. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(1), 2020 pp. 197–207. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00815-y>

El pretratamiento ácido es esencial para las aleaciones de Al antes del tratamiento de recubrimiento de conversión. En el pasado, la industria aeroespacial usaba el desoxidante como una solución de pretratamiento³⁷.

³⁷ QI, J., NĚMCOVÁ, A., WALTON, J. R., ZHOU, X., SKELDON, P., & THOMPSON, G. E. Op. Cit.

5. CONCLUSIÓN

Los recubrimientos de conversión de cromo han cumplido en su mayoría con las propiedades anticorrosivas en la aleación 2024-T3 existente, al tiempo que muestran un comportamiento de corrosión satisfactorio en varios sustratos, incluidas las aleaciones de titanio (Ti) y las aleaciones de aluminio. Por lo tanto, para evitar el uso de compuestos de cromo cancerígenos como el cromo hexavalente (VI), muchas industrias han implementado los recubrimientos de conversión de cromo trivalente (III) como las alternativas más prometedoras a los recubrimientos en las aleaciones de aluminio para la industria aeronáutica y aeroespacial, hasta la fecha. Los revestimientos de conversión de cromo no solo son fáciles de aplicar, sino que también son sencillas por procesos químicos como electrodeposición, los cuales se mencionaron en esta monografía. La capa formada es resistente a temperaturas elevadas y entornos corrosivos. La formación del recubrimiento, así como su comportamiento frente a la corrosión, está influenciada por diferentes factores, incluido el material del sustrato; procesos de pretratamiento; formulación de la solución de tratamiento; parámetros de los procesos, así como postratamientos de la superficie para un rendimiento óptimo del recubrimiento, el cual es sumamente importante en el proceso de adhesión. Los parámetros óptimos del proceso del recubrimiento deben definirse individualmente para cada sistema en el cual se utilice diferentes medios químicos o electroquímicos para su ejecución, Por tanto, se prevé nuevas formulaciones de revestimientos de cromo trivalente (III).

BIBLIOGRAFÍA

BRAHAMI, A., FAJOUJ, J., & BOUCHOUICHA, B. Exfoliation Corrosion Impact on Microstructure, Mechanical Properties, and Fatigue Crack Growth of Aeronautical Aluminum Alloy. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(1), 2020 pp. 197–207. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00815-y>

BRUNET, M., COCHARD, A., DESHAYES, C., BROUCA-CABARRECQ, C., ROBBIOLO, L., OLIVIER, J. M., & SCIAU, P. Study of Post-World War II French Aeronautical Aluminium Alloy and Coatings: Historical and Materials Science Approach. *Studies in Conservation*, 65(2), 2020 pp. 103–117. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1610846>

CABRINI, M., BOCCHI, S., D'URSO, G., GIARDINI, C., LORENZI, S., TESTA, C., & PASTORE, T. Stress corrosion cracking of friction stir-welded AA-2024 T3 alloy. *Materials*, 13(11). 2020 <https://doi.org/10.3390/ma13112610>

CAI, C., LIU, X. Q., TAN, X., LI, G. D., WANG, H., LI, J. M., & LI, J. F. A Zr- and Cr(III)-containing conversion coating on Al alloy 2024-T3 and its self-repairing behavior. *Materials and Corrosion*, 68(3), 2017 pp. 338–346. <https://doi.org/10.1002/maco.201609067>

CARREIRA, A. F., PEREIRA, A. M., VAZ, E. P., CABRAL, A. M., GHIDINI, T., PIGLIARU, L., & ROHR, T. Alternative corrosion protection pretreatments for aluminum alloys. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(4), 2017 pp. 879–892. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9922-9>

DUBENT, S., & MAZARD, A. Characterization and corrosion behaviour of grade 2 titanium used in electrolyzers for hydrogen production. In *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 44, Issue 29, 2019 pp. 15622–15633. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.093>

GE, F., ZHANG, L., TIAN, H., YU, M., LIANG, J., & WANG, X. (). Stress Corrosion Cracking Behavior of 2024 and 7075 High-Strength Aluminum Alloys in a Simulated Marine Atmosphere Contaminated with SO₂. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(1), 2020 pp. 410–422. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04537-7>

GUO, Y., & FRANKEL, G. S. Active Corrosion Inhibition of AA2024-T3 by Trivalent Chrome Process Treatment. In *Corrosion science section corrosion* Vol. 68, Issue 4 2012.

HESAMEDINI, S., & BUND, A. Trivalent chromium conversion coatings. In *Journal of Coatings Technology and Research* Vol. 16, Issue 3, pp. 623–641. Springer New York LLC. 2019 <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00210-9>

HUGHES, A. E., BOAG, A., GLENN, A. M., MCCULLOCH, D., MUSTER, T. H., RYAN, C., LUO, C., ZHOU, X., & THOMPSON, G. E. Corrosion of AA2024-T3 Part II: Co-operative corrosion. *Corrosion Science*, 53(1), 2011 pp. 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.030>

Jaquez-Muñoz, J., Gaona-Tiburcio, C., Lira-Martinez, A., Zambrano-Robledo, P., Maldonado-Bandala, E., Samaniego-Gamez, O., Nieves-Mendoza, D., Olguin-Coca, J., Estupiñan-Lopez, F., & Almeraya-Calderon, F. Susceptibility to pitting corrosion of ti-cp2, ti-6al-2sn-4zr-2mo, and ti-6al-4v alloys for aeronautical applications. *Metals*, 11(7). 2021 <https://doi.org/10.3390/met11071002>

Kuznetsov, V. V., Vinokurov, E. G., Telezhkina, A. V., & Filatova, E. A. Electrodeposition of corrosion-resistant Cr–P and Cr–P–W coatings from solutions based on compounds of trivalent chromium. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23(8), 2019 pp. 2367–2376. <https://doi.org/10.1007/s10008-019-04347-w>

LI, L., DESOUZA, A. L., & SWAIN, G. M. Effect of Deoxidation Pretreatment on the Corrosion Inhibition Provided by a Trivalent Chromium Process (TCP) Conversion Coating on AA2024-T3. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(5), 2014 pp. C246–C253. <https://doi.org/10.1149/2.031405jes>

MADHAVI, Y., RAMA KRISHNA, L., & NARASIAH, N. Corrosion-Fatigue Performance of Hard Anodized and MAO-Coated 2024-T3 and 7075-T6 Aerospace Al Alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(9), 2021 pp. 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02313-7>

MAHDAVI, S., ALLAHKARAM, S. R., & HEIDARZADEH, A. Characteristics and properties of Cr coatings electrodeposited from Cr(III) baths. *Materials Research Express*, 6(2). 2019 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aeab4f>

NGUYEN, A. S., & PÉBÈRE, N. A local electrochemical impedance study of the self-healing properties of waterborne coatings on 2024 aluminium alloy. *Electrochimica Acta*, 222, 2016 pp. 1806–1817. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.152>

PANTELAKIS, S. G., & KERMANIDIS, A. T. (). Effect of corrosion on the mechanical behaviour of aircraft aluminum alloys. In *Corrosion control in the aerospace industry 2009* pp. 67–108. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781845695538.1.67>

PEARLSTEIN, F., & AGARWALA, V. S. *Trivalent Chromium Solutions For Applying Chemical Conversion Coatings To Aluminum Alloys or for Sealing Anodized Aluminum*

PROENÇA, C. S., PEREIRA, A. M., CABRAL, A. M., PIGLIARU, L., ROHR, T., ARAÚJO, M. E. M., & CORREIA, J. Trivalent chromium conversion coating on AA2024-T3 used in aeronautical and aerospace industry. *Surface and Interface Analysis*, 51(12), 2019 pp. 1298–1311. <https://doi.org/10.1002/sia.6653>

PROTSENKO, V., & DANILOV, F. Kinetics and mechanism of chromium electrodeposition from formate and oxalate solutions of Cr(III) compounds. *Electrochimica Acta*, 54(24), 2009 pp. 5666–5672. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.04.072>

QI, J., GAO, L., LI, Y., WANG, Z., THOMPSON, G. E., & SKELDON, P. An Optimized Trivalent Chromium Conversion Coating Process for AA2024-T351 Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(7), 2017 pp. C390–C395. <https://doi.org/10.1149/2.1371707jes>

QI, J., NĚMCOVÁ, A., WALTON, J. R., ZHOU, X., SKELDON, P., & THOMPSON, G. E. Influence of pre- and post-treatments on formation of a trivalent chromium conversion coating on AA2024 alloy. *Thin Solid Films*, 616, 2016 pp. 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.08.044>

SABAU, A. S., MEYER, H. M., & LEONARD, D. N. Laser-interference pulse number dependence of surface chemistry and sub-surface microstructure of AA2024-T3 alloy. *Optics and Laser Technology*, 131. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106457>

SHRUTHI, T. K., & SWAIN, G. M. Communication—Role of Trivalent Chromium on the Anti-Corrosion Properties of a TCP Conversion Coating on Aluminum Alloy 2024-T3. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(2), 2018 pp. C103–C105. <https://doi.org/10.1149/2.1301802jes>

SUAREZ, O. J., OLAYA, J. J., SUAREZ, M. F., & RODIL, S. E. Corrosion resistance of decorative chromium films obtained from trivalent chromium solutions. In *J. Chil. Chem. Soc* Vol. 57, Issue 1. 2012

VERDALET-GUARDIOLA, X., BONINO, J. P., DULUARD, S., FORI, B., & BLANC, C. Influence of the alloy microstructure and surface state on the protective properties of trivalent chromium coatings grown on a 2024 aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 344, 2018 pp. 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.046>

VERDALET-GUARDIOLA, X., SAILLARD, R., FORI, B., DULUARD, S., & BLANC, C. Comparative analysis of the anticorrosive properties of trivalent chromium conversion coatings formed on 2024-T3 and 2024-T351 aluminium alloys. *Corrosion Science*, 167. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108508>

VINOKUROV, E. G. (). Internal stress of chrome coatings electrodeposited from solutions of chromium (III) salts. *ChemChemTech*, 62(12), 2019 pp. 33–38. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196212.6076>

VINOKUROV, E. G., BURUKHINA, T. F., & NAPERENINA, E. Y. Multi-Response Optimisation Of Electrodeposition Of Nano-Crystalline Composite Coatings Cr-Cr₃p In Statu Nascendi From Trivalent Chromium-Baths. *ChemChemTech*, 64(3), 2021 pp. 73–81. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6341>

ANEXOS

Anexo A. Glosario

| Término | Descripción |
|----------------|---|
| TITTLE-ABS-KEY | Article tittle, Abstract, Keywords, después de escribir las palabras de interés y antes de dar click en buscar, se selecciona este parámetro. |
| AND | Es un conector, para realizar las búsquedas, se puede escribir o no, debido a que Scopus lo genera automáticamente en caso de no hacerlo. |
| LIMIT-TO | Limitado a, se genera automáticamente, cada que se seleccione un filtro y se realice la búsqueda. |
| PUBYEAR | Año de publicación, al que fue limitada la búsqueda, se genera al seleccionar un año determinado de la búsqueda |
| DOCTYPE | Tipo de documento, se genera al seleccionar un tipo de documento |
| Ar | Article, Documento tipo Articulo |
| Re | Review, Documentos revisados |
| SUBJAREA | Subject Area, Área de la temática, se genera al selecciona un área de interés, como ciencia de los materiales, ingeniería, entre otras. |
| MATE | Materials Science, ciencia de los materiales |
| ENGI | Engineering, Ingenieria |

Anexo B. Resultado de las ecuaciones a partir de los parámetros de búsqueda

TITLE-ABS-KEY (aluminum AND 2024 T3 AND aeronautical AND aerospace) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))