

# Influencia del tiempo de exposición al medio corrosivo en la resistencia a la tracción de aleaciones de aluminio

J.E. Díaz Vázquez<sup>(1)</sup>, R. Bienvenido Bárcena<sup>(1)</sup>, P.F. Mayuet Ares<sup>(1)</sup>, J.M. Gerez Miras<sup>(1)</sup>, M. Marcos Bárcena<sup>(1)</sup>, F. J. Botana Pedemonte<sup>(2)</sup>

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz  
enrique.diaz@uca.es

(2) Dpto. de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica. Universidad de Cádiz

---

*En la evaluación del rendimiento de cualquier proceso de conformado se contempla, actualmente, el estudio de la influencia de distintos parámetros que intervienen antes, durante y después del proceso. Así, el estudio del rendimiento del proceso debe contemplar aspectos económicos, energéticos, medioambientales y funcionales. Estos últimos se asocian al comportamiento en servicio de los productos obtenidos. En este sentido, es necesario disponer de referencias del comportamiento del material frente a los agentes externos. Este trabajo se centrará en el análisis del posible cambio de las propiedades mecánicas de los materiales tras los procesos de corrosión. Se ha analizado la influencia del tiempo de exposición en atmósfera salina en la resistencia a la tracción de las aleaciones UNS A92024 y UNS A97075, lo que se ha dado en llamar Tensión Tras Corrosión (TTC). Para ello, se expusieron muestras de ensayo planas a procesos de corrosión acelerada de hasta 504 horas y se sometieron a ensayos de tracción a temperatura ambiente.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de la introducción de nuevos materiales en la fabricación aeronáutica, las aleaciones de aluminio siguen utilizándose, consecuencia de su buena relación peso/propiedades físico-químicas/coste. A las ventajas en cuanto a aligeramiento del peso de equipos e instalaciones, se une el bajo impacto negativo al final del ciclo de vida del producto, debido a la prácticamente ilimitada capacidad de reciclaje del aluminio. Además, estas aleaciones adquieren excelentes propiedades mecánicas tras los tratamientos de endurecimiento por precipitación [1,2].

La aleación UNS A92024-T3 se utiliza en zonas sometidas a fatiga como el fuselaje de las cabinas presurizadas y el revestimiento del intradós de las alas. Asimismo, en el revestimiento del extradós de las alas, que tienen que resistir principalmente esfuerzos de compresión cuando el ala se flexiona hacia arriba durante el vuelo, se utiliza la UNS A97075-T6, que también se emplea para las estructuras de aviones militares de combate, que generalmente tienen alas más rígidas y, excepto para el área de la cabina, un fuselaje sin presurizar.

En cuanto al comportamiento frente a la corrosión, el aluminio desarrolla una capa natural pasiva de alúmina ( $Al_2O_3$ ) en la superficie que protege al material de la corrosión, por lo que, en general, el aluminio y sus aleaciones presentan una buena resistencia a la corrosión atmosférica.

Se conoce que esta capa pasiva tiene una naturaleza dual [2]. Está formada por una capa interna adherente, compacta y estable, y por otra capa externa porosa, menos estable y que es más susceptible a la corrosión. Sobre todo, la presencia de cloruros provoca el aumento de la velocidad de corrosión.

Por ello, un largo período de almacenamiento en un ambiente húmedo y marino, podría causar corrosión [1,2]. Así, las aleaciones de aluminio son más propensas a sufrir la

formación de picaduras en presencia del ión cloruro, que inicia las interacciones provocando la despasivación localizada aprovechando la presencia de micro-defectos superficiales [3-6] y la formación de pares galvánicos localizados entre partículas intermetálicas de segunda fase y la matriz de aluminio dando origen a procesos de corrosión alcalina localizada [6-8].

En las aleaciones endurecidas por precipitación, existe una predisposición a que algunas de las partículas grandes del precipitado se fijen y crezcan en los bordes de grano. El resultado es que las partículas precipitadas se alinean a lo largo de los bordes de grano y están rodeadas por bandas muy estrechas de metal que están empobrecidas de los componentes de la aleación que han contribuido al precipitado. A esta zona se la conoce como la zona desnuda del borde de grano. Así, se crea una red continua de tres bandas de metal muy cercanas y con composiciones diferentes: el precipitado, la zona desnuda y la matriz, entre las que se pueden producir interacciones electroquímicas [3]. Los cloruros junto con los precipitados intermetálicos en los bordes de grano, son los responsables del crecimiento y progresión de las picaduras y su evolución a un proceso de corrosión intergranular.

Respecto a las aleaciones estudiadas en este trabajo, en las de la serie UNS A92XXX (cobre-magnesio-silicio), los precipitados en el borde de grano incluyen al compuesto  $\text{CuAl}_2$ , y la zona desnuda es anódica respecto al precipitado y a la matriz, pudiendo producirse pares galvánicos y creándose rutas para el avance de la grieta [6]. Por otra parte, en las aleaciones de alta resistencia de la serie UNS A97XXX (cinc-magnesio-cobre), el precipitado  $\text{MgZn}_2$  es anódico respecto a la matriz [9].

Estos mecanismos de degradación no implican grandes pérdidas de material pero las propiedades mecánicas del metal pueden sin embargo verse gravemente afectadas [10,11].

En el sentido de lo anteriormente expuesto se entiende que un material sometido a un proceso de corrosión pierde resistencia mecánica debido a la aparición de microgrietas como consecuencia de picaduras o corrosión alcalina localizada. En particular, una de las propiedades que supuestamente más debe verse afectada es la resistencia a la tracción. Sin embargo, en un estudio anterior [12], realizado para evaluar la dependencia de la resistencia a tracción de aleaciones de aluminio con el tiempo de exposición a niebla salina, no se obtuvieron resultados definitivos en tiempos de estudio de hasta 168 horas.

En esta comunicación se exponen los resultados obtenidos para la resistencia a la tracción a temperatura ambiente tras procesos de corrosión (TTC) con tiempos de exposición superiores a los considerados en los estándares de ensayos de Cámara de Niebla Salina (CNS), comparándose con los resultados presentados en [12].

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se obtuvieron probetas planas para ensayos de tracción de las aleaciones comerciales UNS A92024-T3 (véase la composición en la tabla 1) y UNS A97075-T6 (véase la composición en la tabla 2) mediante procesos de mecanizado de contornos de chapas de 2.0 mm y de 1.4 mm, respectivamente.

Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn
90.7/94.7	3.8/4.9	1.2/1.8	0.3/0.9	Máx 0.5	Máx 0.5	Máx 0.25

Tabla 1. Composición nominal (% en peso) de la aleación UNS A92024-T3

Al	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si
87.1/91.4	5.1/6.1	2.1/2.9	1.2/2	0.18/0.28	Máx 0.5	Máx 0.4

Tabla 2. Composición nominal en (% en peso) de la aleación UNS A97075-T6

Para cada material, se dispusieron cuatro parejas de muestras de ensayo planas (figura 1), que se sometieron a procesos de corrosión acelerada CNS durante 24, 168, 336 y 504 horas, respectivamente, en el Laboratorio de Corrosión y Protección de la Universidad de Cádiz. Asimismo, se utilizaron muestras de control que no estuvieron sometidas a corrosión.

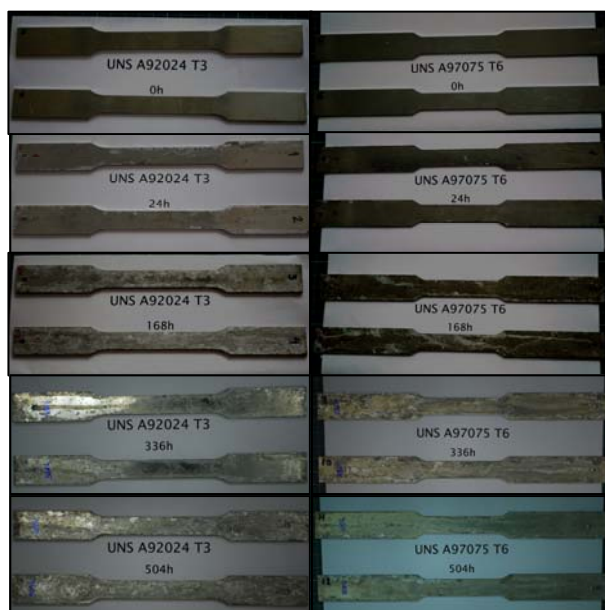


Figura 1. Muestras de ensayo

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo conforme a la norma UNE-EN ISO 6892-1:2010 a una velocidad de separación de las mordazas ( $v_c$ ) de  $0,0125 \text{ mm s}^{-1}$  y aplicando la tensión en la dirección longitudinal (L). Los ensayos se realizaron con una máquina convencional (véase la figura 2), con una célula de carga de 50 kN, calibrada por un laboratorio acreditado por ENAC y con trazabilidad con el Centro Español de Metrología, y a una temperatura ambiente de 296 K.



Figura 2. Máquina de ensayos utilizada

El análisis de las superficies de fractura se realizó con un microscopio estereoscópico Nikon SMZ800 equipado con una cámara CCD conectada a un ordenador (véase la figura 3).

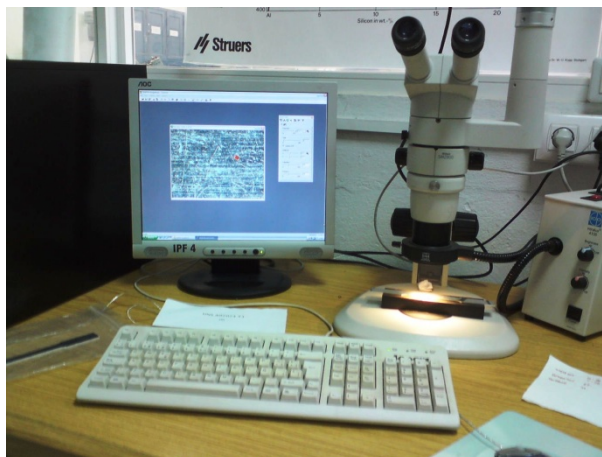


Figura 3. Montaje en el microscopio estereoscópico

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Realizando una primera observación, se advierte que las muestras de control partieron simétricamente a la mitad de la longitud en dos partes aproximadamente iguales, mientras que las muestras sometidas al ensayo en la cámara de niebla salina partieron en dos partes claramente desiguales, como se puede ver en la figura 4. Este hecho se puede interpretar como un indicio de que la grieta comienza a formarse en algún defecto superficial provocado por la corrosión.



Figura 4. Muestra de ensayo fracturada en dos partes claramente desiguales

Respecto a estos defectos provocados por la corrosión se puede comprobar en las figura 5 y la figura 6 que el ataque que se produce sobre las superficies de las muestras de ensayo expuestas es, fundamentalmente, por formación de picaduras. Es un ataque muy localizado y concentrado que, como se indicó anteriormente, se relaciona con la ruptura localizada de la capa pasiva en presencia de cloruros.

Asimismo, se puede observar que la densidad y número de picaduras es claramente superior en la muestra correspondiente a la aleación UNS A2024-T3 que en la muestra correspondiente a la aleación UNS A7075-T6.

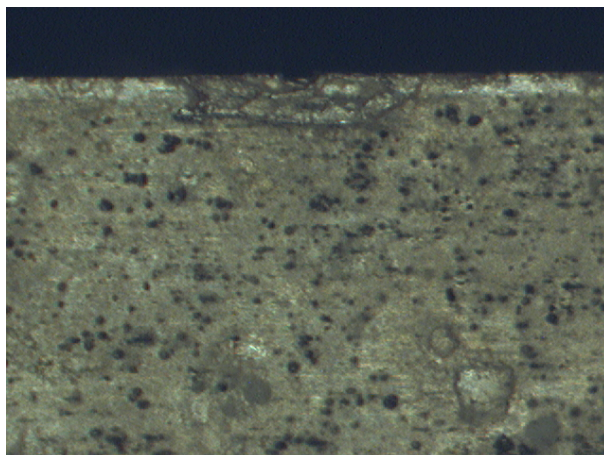


Figura 5. Macrografía de la superficie de una muestra de ensayo de UNS A92024-T3 expuesta a CNS durante 168 h. 60x

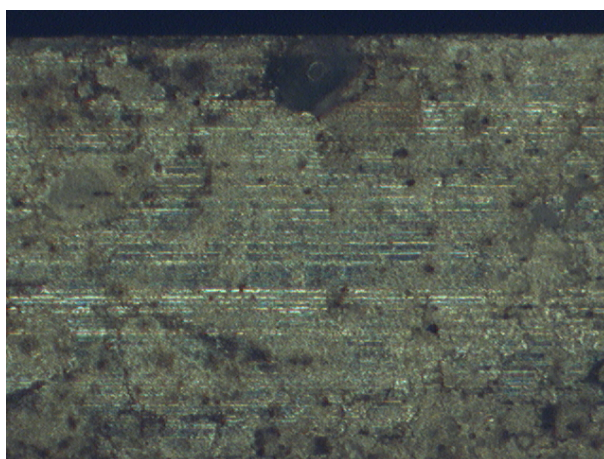


Figura 6. Macrografía de la superficie de una muestra de ensayo de UNS A97075-T6 expuesta a CNS durante 168 h. 60x

Como se puede comprobar en la macrografía de la figura 7, las superficies de fractura de las muestras sometidas a la atmósfera salina presentan un aspecto heterogéneo y diversos defectos superficiales, que han podido influir en el inicio de la fractura asimétrica de las muestras a las que se hacía mención anteriormente.

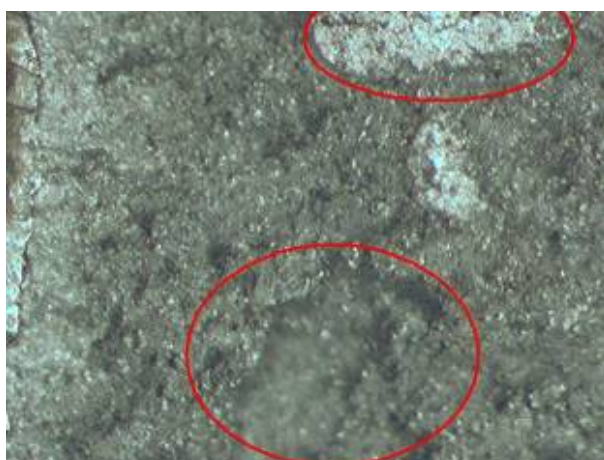


Figura 7. Macrografía de la superficie de fractura de una muestra de UNS A92024-T3 expuesta a CNS durante 168 h. 60x

En cuanto al efecto de la corrosión en las propiedades mecánicas de los materiales, se ha centrado el estudio en la resistencia a la tracción ( $R_m$ ), la tensión de rotura ( $R_r$ ) y la energía de fractura ( $U_r$ ). A continuación (véanse las figura 8 y figura 9), se muestran los resultados obtenidos para cada aleación en función del tiempo de exposición a la atmósfera salina.

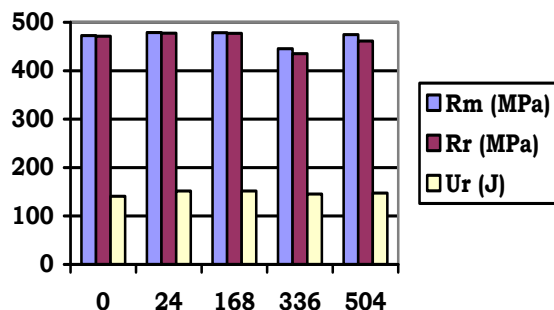


Figura 8. UNS A92024-T3. Propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición a la atmósfera salina

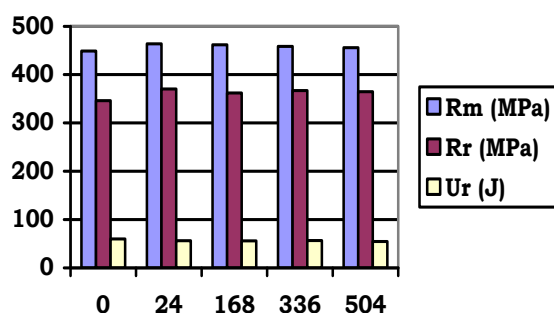


Figura 9. UNS A97075-T6. Propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición a la atmósfera salina

Estos resultados no son claramente concluyentes, ya que se obtienen valores muy parecidos en los tres parámetros sin una tendencia clara definida, excepto para la UNS A92024-T3, que muestra una ligera disminución (9%) de sus propiedades resistentes para el tiempo de 336 horas.

En cuanto al alargamiento porcentual de rotura ( $A$ ), no se observa una variación significativa al aumentar el tiempo de exposición, según los resultados obtenidos y que se muestran en la figura 10. Los materiales estudiados mantienen la ductilidad observada en las muestras de control, sin apenas variación, para los tiempos de exposición CNS estudiados.

**ALARGAMIENTO PORCENTUAL DE ROTURA**

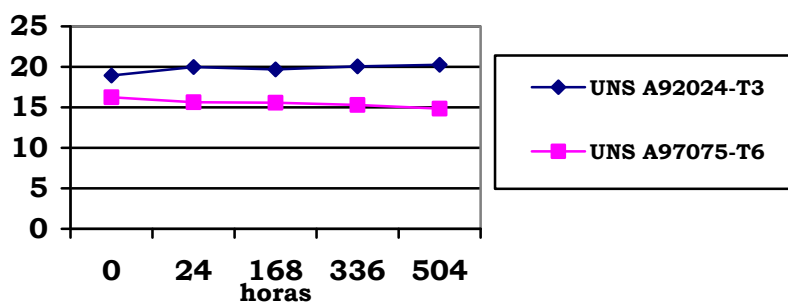


Figura 10. Alargamiento porcentual de rotura ( $A$ ) en función del tiempo de exposición

Para evaluar el comportamiento particular de cada aleación a la exposición a la atmósfera salina, se definen los parámetros  $P_f(R_m)$ ,  $P_f(R_r)$  y  $P_f(U_r)$  como el cociente entre el valor obtenido para la  $R_m$ ,  $R_r$  y  $U_r$ , respectivamente, de la UNS A92024 y el correspondiente a la UNS A97075.

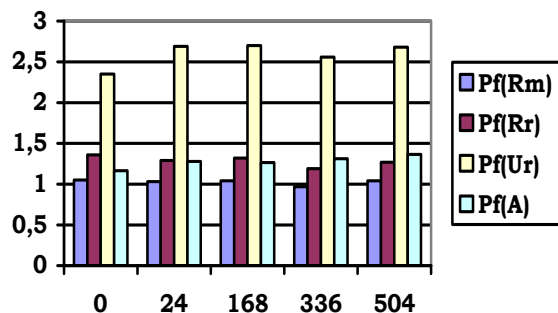


Figura 11. Evaluación del comportamiento de cada aleación

Teniendo en cuenta los valores representados gráficamente en la figura 11, no existen diferencias sustanciales en el comportamiento de los dos materiales ante la exposición a la atmósfera salina en el rango de tiempos estudiado, salvo en el correspondiente al tiempo de exposición de 336 horas, para el que empeora el comportamiento de la UNS A92024 frente a la UNS A97075.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha dispuesto de muestras de ensayo planas de dos de las aleaciones de aluminio más utilizadas en la industria aeronáutica, que han sido sometidas a ensayos de corrosión acelerada CNS de hasta 504 horas previamente a su ensayo a tracción a temperatura ambiente.

Como resultado de la exposición a la atmósfera salina, se han producido picaduras en las superficies expuestas, siendo más susceptible la UNS A92024 que la UNS A97075. Posiblemente la presencia de cobre en la aleación tenga alguna influencia, que debe verse confirmada con un análisis de espectroscopia dispersiva de electrones (EDS).

Se ha observado que las muestras de ensayo sometidas a corrosión acelerada parten de manera asimétrica en los ensayos a tracción, mientras que las muestras de control parten aproximadamente por la mitad.

Asimismo, las muestras de ensayo de control muestran mayor homogeneidad en las superficies de fractura que las muestras sometidas a corrosión acelerada, que presentan defectos en las superficies de fractura. Estos defectos superficiales y la presencia de picaduras son, posiblemente, el punto de origen del inicio de las grietas de la fractura.

La variación de las propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición no muestra una tendencia claramente definida, salvo para la UNS A92024-T3, para la que se observa una disminución del 9% de sus propiedades resistentes para el tiempo de 336 horas.

No se observan diferencias significativas en las propiedades resistentes de los dos materiales ante la exposición a la atmósfera salina en el rango de tiempos estudiado.

La ampliación de los tiempos de exposición de las muestras de ensayo no ha resultado en una disminución de las propiedades resistentes del material ni de su ductilidad.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por financiar este proyecto a través del proyecto “Sostenibilidad económica, energética y medioambiental del mecanizado de materiales de interés aeronáutico”, de referencia DPI2008-06771-C04-01 y correspondiente al Programa Nacional de Proyectos de

Investigación Fundamental, en el marco del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011.

## 6. REFERENCIAS

- [1] R. Grilli et al. *Localized corrosion of a 2219 aluminium alloy exposed to a 3.5% NaCl Solution*, Corrosion Science, 52(9) (2010), 2855-2866.
- [2] W.A. Badawy et al. *Electrochemical behaviour and corrosion inhibition of Al, Al-6061 and Al-Cu in neutral aqueous solutions*, Corrosion Science, 41(4) (1999), 709-727.
- [3] D. Talbot, J. Talbot, *Corrosion Science and Technology*, CRC Press, (1998).
- [4] H. Ezuber et al. *A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater*, Materials & Design, 29 (2008), 801-805.
- [5] D. Tanguy et al. *Hydrogen effects during IGSCC of pure Al-5Mg alloy in NaCl media*, Corrosion Science, 44(6) (2002), 1163-1175.
- [6] M. Bethencourt et al. *Behaviour of the alloy AA2017 in aqueous solutions of NaCl. Part I: Corrosion mechanisms*, Corrosion Science 51(3) (2009), 518-524.
- [7] M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, J.M. Sánchez-Amaya, and L. González Rovira. *Using EIS to analyse samples of Al-Mg alloy AA5083 treated by thermal activation in cerium salt baths*, Corrosion Science 50(5) (2008), 1376-1384.
- [8] M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, and M. Marcos. *High protective, environmental friendly and short-time developed conversion coatings for aluminium alloys*, Applied Surface Science 189(1-2) (2002), 162-173.
- [9] H. Vogt, M. O. Speidel. *Stress corrosion cracking of two aluminium alloys: A comparison between experimental observations and data based on modelling*, Corrosion Science 40(2-3) (1998), 251-270.
- [10] B. Davó et al. *Inhibition of stress corrosion cracking of alloy AA8090 T-8171 by addition of rare earth salts*, Corrosion Science 47(5) (2005), 1227-1237.
- [11] A. Fernández et al., *Influencia de la corrosión por picaduras en la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6082*, Congreso Iberoamericano de Materiales, Alicante, España, (2012).
- [12] J. E. Díaz et al. *Efecto de la corrosión en la resistencia a la tracción de las aleaciones UNS A92024 y UNS A97075*, Anales de Ingeniería Mecánica, 17 (2010), 108.