

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO BAJO CARGA MECÁNICA A ALTA TEMPERATURA DE PELÍCULAS DE ANODIZADO BASADAS EN ÁCIDO CÍTRICO SOBRE ALEACIONES DE ALUMINIO AL-MG-SI

J. Gómez¹, D. Álvarez², S. Valverde²

¹Escuela de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio. Dpto. de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica
jose.gmz.fdez@gmail.com

²Grupo de Investigación ENCOMAT. Departamento de Ingeniería de los Materiales, Mecánica aplicada y Construcción. Universidad de Vigo

Resumen: La búsqueda de una mayor eficiencia en el consumo de combustible y la duración de las baterías para el sector de la automoción, derivada de las actuales políticas sobre sostenibilidad, ha promovido el uso de materiales ligeros compatibles con la producción a gran escala que la industria requiere, como las aleaciones de aluminio. Sin embargo, este creciente enfoque ha puesto en evidencia algunos de los principales defectos de dichas aleaciones, como su baja resistencia a la temperatura, lo que representa un desafío significativo en su implementación en componentes críticos de los vehículos. Esto ha servido como motivación para plantear el presente trabajo, donde se estudió la influencia que tienen los anodizados de elevado espesor obtenidos a partir de ácido cítrico sobre las propiedades de tracción del aluminio-6082 a temperatura ambiente y en entornos de alta temperatura. Para ello, se diseñaron y fabricaron probetas de tracción estandarizadas de aluminio-6082 a partir de un bruto de colada, dividiendo el espacio muestral en probetas en estado de recepción, probetas a las que se les aplicó un T6 y probetas con T6 anodizadas. Las probetas se sometieron a ensayos de tracción normalizados, análisis metalográficos tanto bajo microscopio óptico como con tecnología SEM y finalmente a un análisis fractográfico, pudiendo así comparar la influencia de la temperatura y del anodizado sobre los diferentes tipos de material estudiados.

Palabras Clave: Anodizado; tratamientos térmicos; ensayos tracción; ácido cítrico; AA6082;

1. INTRODUCCIÓN.

La industria automotriz ha adoptado cada vez más las aleaciones de aluminio debido a sus múltiples ventajas, como su ligereza y resistencia a la corrosión, lo que contribuye significativamente a la reducción del peso de los vehículos y mejora la eficiencia en el consumo de combustible [1]. Esta tendencia responde directamente a las normativas y políticas actuales que buscan incrementar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes [2].

Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrentan las aleaciones de aluminio es su limitada resistencia a altas temperaturas. Esto se convierte en un problema crítico en aplicaciones automotrices donde las piezas están expuestas a temperaturas elevadas, como en las inmediaciones del bloque motor o en componentes cruciales para la seguridad y el rendimiento del vehículo [3].

El presente estudio se centra en evaluar cómo el anodizado de alto espesor, obtenido por medio de electrolitos ecológicos basados en ácido cítrico, afecta a las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio-6082 por medio de ensayos a temperatura ambiente y a alta temperatura tanto de probetas sin tratamiento térmico como con probetas a las que se les ha aplicado

el tratamiento T6. De esta forma, es posible hacer una primera caracterización orientada hacia el estudio de la influencia del espesor en las propiedades de tracción del material ensayado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Diseño de probetas y planificación.

El material de partida consiste en un bruto de colada de aluminio-6082 proporcionado por la empresa CIE Galfor, colaboradora del proyecto.

Utilizando como restricciones de diseño las dimensiones del bruto obtenido (cilindro de 65 mm de diámetro y 500 mm de longitud), la tensión máxima que el equipo de ensayos de tracción puede proporcionar (50000 N) y la propia norma (UNE-EN ISO 6892-2), se obtuvieron 12 probetas que constituyen el espacio muestral del proyecto, cuya designación se recoge en la Tabla 1. Los resultados del diseño de las probetas de ensayo se muestran en la Figura 1.

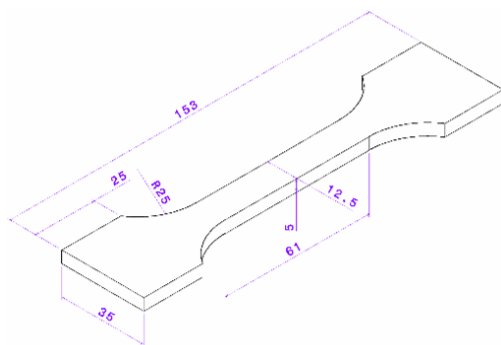


Figura 1.- Resultado del diseño de las probetas

Tabla 1.- Designación de las probetas.

Designación	Material	Tratamiento térmico	Anodizado	Temperatura de ensayo a tracción (°C)
N1	AA 6082	-	No	20
N2	AA 6082	-	No	160
N3	AA 6082	-	No	160
N4	AA 6082	-	No	-
T6-5	AA 6082	T6	No	20
T6-6	AA 6082	T6	No	20
T6-7	AA 6082	T6	No	160
T6-8	AA 6082	T6	No	160
A1	AA 6082	T6	Si	20
A2	AA 6082	T6	Si	160
A3	AA 6082	T6	Si	20
A4	AA 6082	T6	Si	160

2.2. Tratamiento térmico y anodizado.

El tratamiento térmico utilizado en el proyecto fue elegido por CIE Galfor, consistiendo en una solubilización a 560 °C durante 25 minutos, seguida de un hipertemple en agua a 20 °C y de un envejecimiento artificial a 190 °C durante 180 minutos. Los resultados de este proceso se verificaron por medio del ensayo de dureza Vickers, tal como se recoge en la Tabla 2.

Tabla 2. Dureza medida y mínima del material [4].

	Dureza mínima	Dureza medida (promedio)	Desviación típica
AA 6082	35 HV	62,875 HV	1,448
AA 6082-T6	95 HV	120,875 HV	5,718

Para el proceso de anodizado se utilizó un electrolito experimental compuesto de una disolución 2M de ácido cítrico con un 10% de ácido sulfúrico al 98% [5] cuya temperatura se mantuvo a 5 °C ± 1 °C durante todo el proceso y suministrando una densidad de corriente de 1,5 A/dm² por medio de control galvanostático.

De las cuatro probetas anodizadas, las dos primeras (A1 y A2) se procesaron simultáneamente, obteniendo un espesor heterogéneo a lo largo de su superficie. Entre las posibles causas de este suceso se encuentran la falta de potencia de la fuente de alimentación utilizada, una

agitación insuficiente y una mala ubicación de las probetas en la célula de anodizado.

Las dos siguientes probetas (A3 y A4) fueron anodizadas individualmente y con mejoras en el sistema de agitación, solucionando así el posible problema de falta de potencia. De esta forma se alcanzaron espesores de anodizado mayores y con una distribución más homogénea en la superficie bañada.

Tras el sellado en agua de las probetas anodizadas, se utilizó el medidor de espesores DUALSCOPE MP0R para evaluar la calidad de los resultados:

- Probeta A1: 1,5 – 25,9 µm
- Probeta A2: 1,0 – 70,2 µm
- Probeta A3: 10,0 – 60,9 µm
- Probeta A4: 55,0 – 60,3 µm

En las probetas A1 y A2 se observa una división clara entre espesores elevados y espesores bajos a lo largo de la sección de ensayo (Figura 2), sirviendo su estudio para teorizar sobre la influencia del espesor del anodizado sobre la ubicación de la fractura. Por otra parte, las probetas A3 y A4 (Figura 3) mantienen un espesor constante en la sección de ensayo, observando los espesores mínimos en las zonas de agarre para las mordazas.

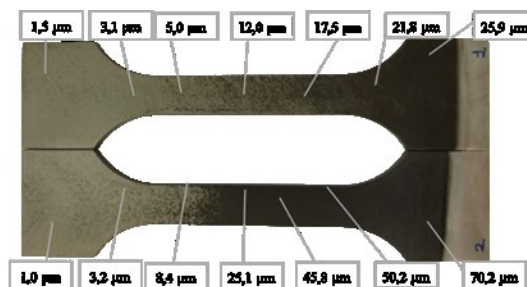


Figura 2. Distribución de espesores en las probetas A1 y A2.



Figura 3. Probetas A3 (arriba) y A4 (abajo) anodizadas.

3. RESULTADOS.

3.1. Análisis metalográfico.

Durante el desarrollo del proyecto, algunos de los sobrantes del mecanizado de las probetas fueron sometidos a los mismos procesos que éstas, pudiendo

realizar de esta forma ensayos destructivos sin reducir el espacio muestral. Por ello, para el análisis metalográfico se emplearon secciones de estos sobrantes preparadas superficialmente para microscopía óptica y electrónica de barrido (Figura 4).

El análisis metalográfico permitió estudiar la microestructura del material utilizado, corroborando la correcta aplicación del tratamiento térmico al observarse una clara reducción en el tamaño de las fases endurecedoras Mg₂Si [6].

A su vez, este proceso permite observar la morfología y el espesor real de los anodizados obtenidos (Figura 5), información con la que se desarrollaron hipótesis sobre las propiedades de las probetas y una posible influencia del anodizado sobre ellas previa a la realización de los ensayos. Así, la Figura 6 muestra la microestructura antes y después del anodizado. Por otra parte, la Figura 7 muestra la morfología columnar y los diámetros característicos encontrados en la capa porosa del anodizado.

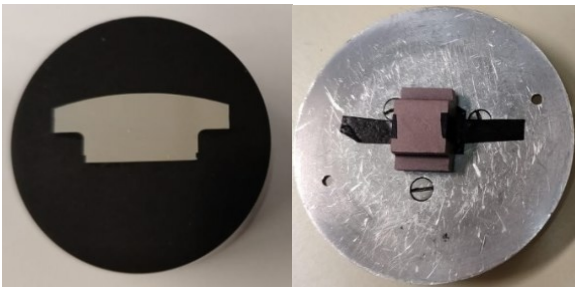


Figura 4. Muestras preparadas para el análisis metalográfico.



Figura 5. Medidas de espesor de la capa de óxidos por microscopía óptica.

3.2.- Ensayos de tracción y análisis fractográfico.

Los ensayos de tracción se realizaron siguiendo las recomendaciones de CIE Galfor, basadas en las normas de ensayos a temperatura ambiente y a alta temperatura (UNE-EN ISO 6892-1 y UNE-EN ISO 6892-2, respectivamente). Tras ellos se realizó un análisis fractográfico para estudiar el origen y tipo de rotura producido.

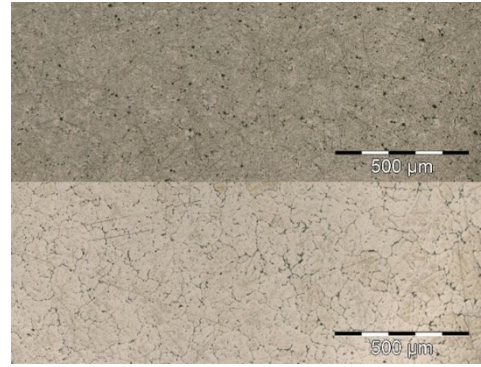


Figura 6. Microestructura antes (arriba) y después (abajo) del tratamiento térmico (100 aumentos).

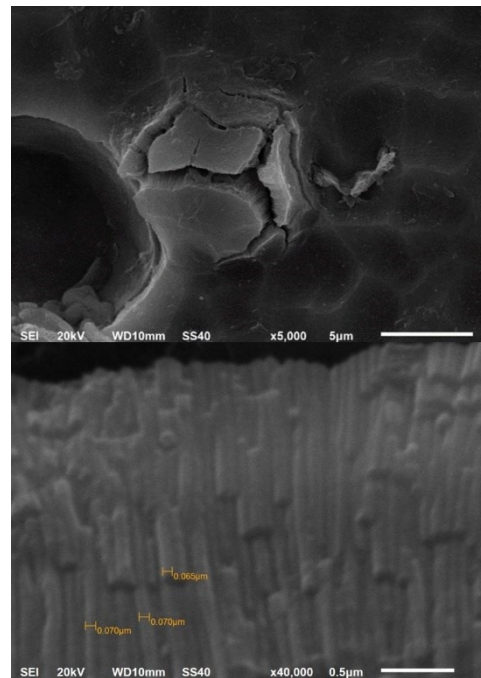


Figura 7. Morfología columnar y diámetros en la capa porosa del anodizado.

Los parámetros empleados fueron:

- Longitud calibrada de 44,04 mm
- Velocidad de ensayo de 2 mm/min
- Exposición previa a rotura a 160 °C durante 60 min (ensayos a alta temperatura)
- Variación máxima de temperatura de ±3 °C entre puntos de las probetas

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura se muestran en la Figura 8.

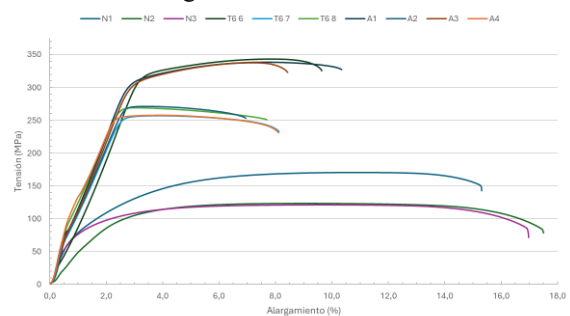


Figura 8. Resultados de los ensayos de tracción.

Las probetas tratadas térmicamente muestran datos de resistencia a tracción a temperatura ambiente un 1,5% mayores que los observados en las anodizadas, mientras que las segundas resisten un 0,5% más a alta temperatura, como se puede apreciar en la Figura 9. Una posible causa de este fenómeno es el aislamiento térmico que produce la capa de óxidos del anodizado, que mitigaría los efectos de la temperatura sobre la probeta durante los ensayos.

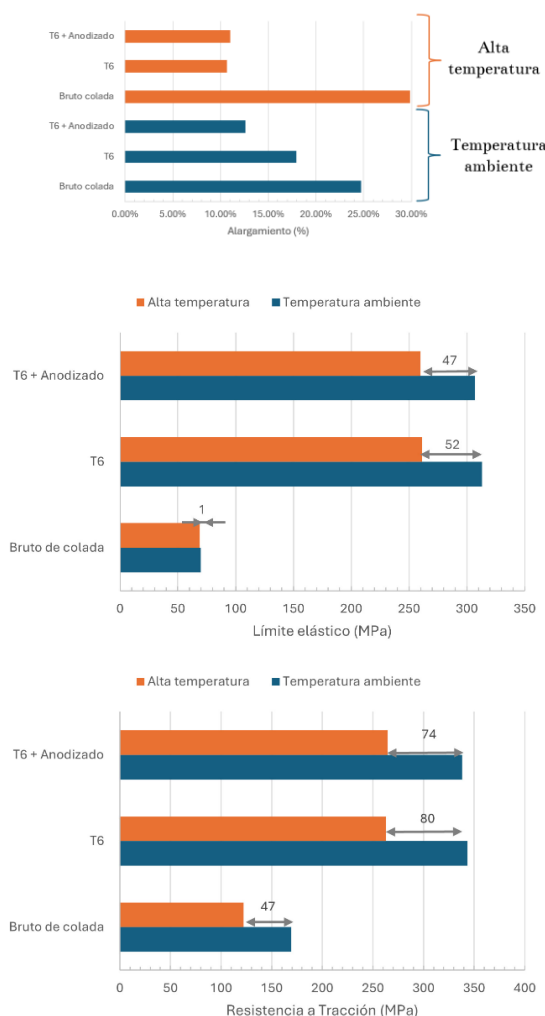


Figura 9. Resultados de tracción procesados.

Se puede concluir que el proceso de sellado del anodizado, realizado en agua a 95-100 °C durante una hora, no provoca un sobrevejecimiento de las probetas al mostrar resistencias a tracción muy similares a las de las tratadas térmicamente.

La influencia del anodizado sobre las propiedades de tracción de la aleación 6082-T6 frente a esfuerzos estáticos es casi despreciable, ya que los resultados obtenidos para el mayor espesor posible apenas distan de los presentados por las probetas con un tratamiento T6 sin anodizar. Esta diferencia tenderá a disminuir cuanto menor sea el espesor de la capa de óxidos.

Se concluye que el electrolito empleado, basado en ácido cítrico, es una alternativa viable y ecológica a los ácidos sulfúrico y crómico para generar anodizados de espesor elevado en componentes pequeños.

Resulta lógico asumir que la disminución de espesor de anodizado reducirá su impacto en las propiedades mecánicas, pudiendo optimizar en futuros estudios la combinación de resistencia a tracción y corrosión.

4. CONCLUSIONES.

Se observa que el tratamiento térmico T6 incrementa la resistencia a tracción de las probetas en más de un 50%, alcanzando valores de 343 MPa, a la vez que reduce sensiblemente su alargamiento porcentual a rotura, obteniendo deformaciones un 28% menores para las probetas tratadas térmicamente.

Las propiedades de tracción de todos los tipos de probetas se ven reducidas con el aumento de la temperatura de su entorno, observándose disminuciones del 28% en las probetas de bruto de colada, del 23% en las probetas con tratamiento térmico T6 y del 22% en las probetas anodizadas.

5. AGRADECIMIENTOS.

Finalmente, se considera imprescindible señalar que este proyecto no habría sido posible sin la inestimable ayuda del grupo de investigación ENCOMAT y sus miembros, así como el equipo de técnicas y técnicos de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Vigo.

6. REFERENCIAS.

- [1] Morita A. Aluminum alloys for automobile applications. In: ICAA 6th; Aichi, Japan. Proceedings. Tokyo: The Japan Institute of Light Metals; 1998. p. 25-32. <http://www.icaa-conference.net/>
- [2] Li, J., Jiao, J., & Tang, Y. (2019). An evolutionary analysis on the effect of government policies on electric vehicle diffusion in complex network. *Energy Policy*, 129, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.070>
- [3] Liang, Y., Ni, Z., Liu, J., Fan, F., Zhi, X., Ye, J., Pan, Y., & Guo, Y. (2023). High-temperature mechanical properties of constructional 6082-T6 aluminum alloy extrusion. *Structures*, 48, 1244-1258. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.043>
- [4] Society of Automotive Engineers, Inc. [SAE] & American Society for Testing and Materials [ASTM]. (1999). *Metals and Alloys in the Unified Numbering System* (8.a ed.) [PDF].
- [5] Cabral-Miramontes, J., Almeraya-Calderón, F., López, F. E., Banda, M. L., Olgún-Coca, J., López-León, L. D., Castañeda-Robles, I., Alcalá, M. Á. E., Zambrano-Robledo, P., & Gaona-Tiburcio, C. (2021). Citric Acid as an Alternative to Sulfuric Acid for the Hard-Anodizing of AA6061. *Metals*, 11(11), 1838. <https://doi.org/10.3390/met11111838>
- [6] European Aluminium Association [EAA]. (1999). *TALAT lecture 5203: Anodizing of Aluminium*