

## CAPÍTULO 33. PÉRDIDA DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN METALES REFUNDIDOS SOSTENIBLES

**<sup>1</sup>Julio José Caparros Mancera; <sup>1</sup>Ángel Mariano Rodríguez Pérez;  
<sup>1</sup>José Antonio Hernández Torres**

*<sup>1</sup>Universidad de Huelva, España.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de caracterizar el aluminio reciclado, en este trabajo se realiza un proceso de refundición y el posterior ensayo de fatiga. En primer lugar, se inician pruebas con probetas de aluminio comerciales. Con estas probetas se realiza un ensayo con una máquina de fatiga. Una vez realizado el ensayo, se funden estas probetas. Previamente se ha realizado un modelo con una impresora 3D para hacer el molde en arena. Este proceso se puede realizar varias veces para poder cuantificar la pérdida sucesiva de propiedades del metal. En este trabajo se han realizado dos refundidos de aluminio. En estas dos refundiciones se han caracterizado grandes pérdidas de vida a fatiga de las probetas. Además, se han comparado las secciones de fractura de cada una de las más probetas y se observan grandes diferencias entre ellas.

El uso de metales es clave en la construcción (Li et al., 2021; Yang et al., 2022). En particular, este trabajo se centra en las características potenciales que se pueden lograr con el uso de aluminio reciclado. (Enginsoy, Bayraktar, Katundi, Gatamorta, & Miskioglu, 2020; Shamsudin, Zhong, Rahim, & Lajis, 2017; Zhou et al., 2021). Sus aplicaciones son numerosas en construcciones menores, incluyendo ventanas, puertas, marcos, rejas, escaleras o perfiles. (Abeysondra, Babel, Gheewala, & Sharp, 2007; Asdrubali, Baldinelli, & Bianchi, 2013; Hauser & Kerler, 1958; Rai, Annam, & Pradhan, 2013; Schroth, Brueggeman, & Grewal, 2007; Zeng, Liang, Liu, & Zhang, 2021). Aunque también se utiliza con frecuencia en estructuras de mayor tamaño como vigas, barandillas, cerramientos, fachadas y pérgolas. (Georgantzia, Gkantou, & Kamaris, 2021; Jen & Chang, 2009; Matteis et al., 2001; Moen, Hopperstad, & Langseth, 1999; Ray, Oldani, & Plaxico, 2004; Shi, Cheng, & Wang, 2005). La edificación en los núcleos urbanos está en constante renovación, donde se realizan nuevas construcciones y no siempre se reutilizan directamente los materiales (Cireddu, 2021; Inomovich, 2021; Lee, 2021). Por eso la sostenibilidad de las ciudades del futuro pasa por la forma de utilizar y obtener los materiales de construcción, de acuerdo con el Pacto Verde (“A European Green Deal | European Commission,” n.d.). El Pacto Verde Europeo recoge precisamente una serie de estrategias y medidas con las que hacer que Europa sea competitiva en el futuro. Con ello busca tanto una transición digital, aplicable también en ensayos mecánicos a través de la digitalización del registro y análisis

de datos, como una transición hacia la sostenibilidad. En este sentido, no sólo es importante que la edificación sea sostenible, en cuanto al uso de materiales no contaminantes o al reciclaje de diferentes materiales, como es el caso de estudio en este trabajo, sino que también debe ser una estrategia temprana. . De esta forma, la sostenibilidad no debería ser un coste para las empresas y constructoras en Europa, sino una ventaja competitiva. Con ello se busca una edificación rentable y sostenible, gracias a un elemento diferenciador que se ha implantado con un gran alcance mucho antes que sus competidores. Por tanto, la fundición de metales es una forma sostenible de poder reutilizar los metales para nuevas construcciones. (Sormunen & Kärki, 2019). Por tanto, este trabajo analiza y caracteriza específicamente la pérdida de propiedades posterior en el metal refundido.

El aluminio es uno de los metales más utilizados en el mundo. Es ligero, fuerte y económico. También es un metal importante porque tiene muchas propiedades químicas que lo hacen útil en una amplia variedad de aplicaciones. Las propiedades químicas del aluminio son las que lo hacen tan útil para muchas cosas, como latas de bebidas, utensilios de cocina e incluso aviones. El Aluminio como material es un metal de baja densidad y alta resistencia. Tiene la tercera mayor cantidad de aleaciones en uso, después del acero y el hierro. El aluminio tiene muchas propiedades mecánicas que lo convierten en un buen candidato para aplicaciones de ingeniería. El módulo de Young y la resistencia a la tracción son mayores que los de otros metales, pero debido a que el aluminio es más liviano que el acero o el hierro, no tiene la misma resistencia a la compresión. El aluminio es un metal que se utiliza mucho en la edificación y la construcción. Es uno de los metales más útiles porque es ligero y fuerte. El aluminio tiene muchos usos en la industria de la construcción, se puede usar para hacer ventanas, puertas y marcos. También se puede utilizar para crear materiales para techos como tejas o tejas. Por lo tanto, el aluminio es un metal que tiene muchos usos diferentes en la industria de la construcción debido a su ligereza y resistencia.

Debido a las características mecánicas del aluminio, y su alta disponibilidad en diferentes aplicaciones, incluida la construcción, se ha considerado su uso para este trabajo. Dada su gran cantidad de aplicaciones, esto también significa que es un material en gran abundancia cuando se desecha, y por tanto, clave a la hora de ser reciclado y reutilizado en diferentes aplicaciones, incluida la construcción. Esto también lo convierte en un material asequible de obtener y, dadas sus propiedades térmicas, rentable de fundir para ser reutilizado. Con ello, este trabajo propone el análisis mecánico del aluminio a través de la metodología y resultados descritos en este artículo. Las conclusiones muestran las principales observaciones obtenidas a partir de los resultados de los ensayos mecánicos, por lo que se propone un contexto sobre el que dar una mayor aplicación al aluminio en la edificación en función del grado de refundición que se realice sobre el mismo. Así, este trabajo propone una metodología de ensayo específica y una caracterización mecánica del aluminio como material de construcción sostenible.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para analizar de manera efectiva la factibilidad de utilizar metales fundidos, este trabajo se enfoca en cuantificar la pérdida de propiedades mecánicas cuando se lleva a cabo el proceso de fundición. Para ello, en este trabajo se han utilizado 6 probetas cilíndricas de aluminio 6061 con unas dimensiones de 146 mm de largo y 8 mm de diámetro, Figura 1. Estas han sido seleccionadas para garantizar que la caracterización parte de un metal con unos estándares de calidad específicos, el cual sería utilizado en diferentes estructuras en la construcción, dadas sus conocidas propiedades mecánicas.

De estas 9 probetas comerciales, 3 de ellos se mantienen para caracterización experimental en laboratorio. Los otros 6 pasan por un proceso de refundición. Previamente se ha realizado un modelo con una impresora 3D para hacer el molde en arena. Una vez obtenidas las 6 piezas de metal colado, se reservan 3 de ellas, para caracterizar las propiedades obtenidas tras esta primera colada. A continuación, los 3 restantes se someten a otro proceso de fundición, de forma que se obtienen 3 piezas de metal refundido. Finalmente, estas 3 piezas servirán para caracterizar las propiedades mecánicas del refundido. La refundición de metal para la construcción es un proceso que se utiliza para crear metal a partir de chatarra. Se trata de derretir la chatarra y verterla en un molde para crear una nueva forma. El proceso de refundición suele ser más barato que comprar metal nuevo, pero también puede resultar más caro si la chatarra es de baja calidad.

La figura 1 muestra las piezas de aluminio comercial, junto con las piezas de aluminio fundido obtenido del proceso de fundición.

Figura 1: Probetas: comerciales (arriba) y fundidos (abajo)



Fuente. Elaboración propia

## 3. RESULTADOS

Las 6 piezas obtenidas tanto del proceso de fundición como del refundido pasan por un ensayo de fatiga con el fin de comparar los resultados obtenidos en las probetas comerciales y en los obtenidos en la fundición de los anteriores. La

prueba de fatiga es un método común para analizar las propiedades mecánicas de los metales. Se realiza aplicando cargas cíclicas y midiendo las respuestas. La vida de fatiga de un metal se puede calcular a partir de los datos obtenidos de estas pruebas. Este artículo discutirá la prueba de fatiga en metal para analizar las propiedades mecánicas y cómo se puede usar para calcular la vida de fatiga de un metal.

Los resultados obtenidos de los ensayos se incluyen en la Tabla 1. El proceso de ensayo pasa por un rápido aumento progresivo de la fuerza, hasta alcanzar el valor de tensión de rotura en el que se rompe la pieza. El número de ciclos se refiere al número de revoluciones en la máquina de ensayo antes de llegar a la rotura. Su funcionamiento es de 3000 ciclos por minuto. Así, se comprueba que el esfuerzo de rotura en el material comercial ronda los 140 N, mientras que para las piezas fundidas es de 60 N.

Tabla 1. Resultados del ensayo de fatiga

<b>Probetas</b>	<b>Tensión de ruptura (N)</b>	<b>Ciclos antes de romper</b>
<b>Comercial - 1</b>	140	2150
<b>Comercial - 2</b>	140	1840
<b>Comercial - 3</b>	140	1960
<b>Fundición - 1</b>	60	450
<b>Fundición - 2</b>	60	620
<b>Fundición - 3</b>	60	1100
<b>Refundición - 1</b>	50	480
<b>Refundición - 2</b>	50	520
<b>Refundición - 3</b>	50	610

Fuente. Elaboración propia

La Figura 2 muestra las probetas rotas resultantes después de las pruebas. A la izquierda se muestran las probetas comerciales, tras el ensayo de fatiga. El corte podría considerarse bastante limpio en lo que se refiere a la superficie del corte. Esto se verifica en todas las probetas de ensayo. Por otro lado, en la parte derecha de la imagen, se muestran las probetas coladas tras el ensayo de fatiga posterior sobre dichas probetas. Se puede comprobar como en el perfil de fractura se visualiza una unión menos uniforme, en lo que nuevamente se refiere a la textura del corte después de los ensayos. Por tanto, esta pérdida de uniformidad en el material obtenido tras la colada que justifica los resultados de pérdidas mecánicas obtenidos.

Figura 2: Probetas de ensayo después de las pruebas de fatiga: comerciales (izquierda) y fundidos (derecha)



Fuente. Elaboración propia

Tal y como está diseñado, para su posterior caracterización, para cuantificar el deterioro progresivo del material colado, se vuelven a fundir las piezas previamente coladas y se repite el ensayo. Los resultados se recogen también en la Tabla 1, y las piezas resultantes de la refundición, antes y después del ensayo, se muestran en la Figura 3. Se comprueba que efectivamente con la refundición se vuelve a producir un deterioro, aunque porcentualmente mucho menor. que con respecto a la primera fundición.

Figura 3: Probetas de ensayo refundidas



Fuente. Elaboración propia

Los perfiles de los tres casos se comparan estructuralmente en la Figura 4. Se comprueba que en el primer fundido se conservan muchas propiedades del contorno mayor de las piezas originales, mientras que en el segundo fundido el material se estabiliza perdiendo las características de la textura original. Se puede observar como las propiedades estructurales del material comercial, más brillante y homogéneo, se conservan en la primera colada. Sin embargo, después de refundir el metal, las irregularidades aumentan, así como la diferencia de profundidad en el perfil de fractura. Asimismo, los procesos de fundición posteriores muestran un metal con menor brillo, con imperfecciones oscuras y con claros signos de porosidad.

Figura 4: Perfil de última hora: comercial, elenco y refundido (de izquierda a derecha)



Fuente. Elaboración propia

El metal de la primera fundición, al fin y al cabo, es una mezcla entre el comercial y el obtenido de la fundición, lo que en el primer proceso no reduce drásticamente sus propiedades. En la segunda fundición quedan pocos rastros de las características estructurales del metal comercial. Sin embargo, en base a los resultados de los ensayos mecánicos, es evidente que las porciones de metal comercial todavía presentes en la primera colada no logran dar la suficiente resistencia, ya que la pérdida de propiedades mecánicas es mucho mayor después de la primera colada, en comparación con metal comercial, que después de la segunda fundición, en comparación con la primera.

#### 4. CONCLUSIONES

El aluminio es un material frecuente en la sociedad, dadas sus múltiples aplicaciones en la vida diaria. Esto afecta tanto a la edificación como a otros ámbitos como la industria, el automóvil, etc. En la actual era de transición hacia la sostenibilidad cobra especial relevancia la implantación de estrategias que permitan un uso responsable de los materiales de construcción. En este sentido, el aluminio, como tantos otros metales, puede jugar un gran papel a través de su reciclaje. Para realizar un análisis específico del aluminio, como material de construcción reciclado, se propone este trabajo donde se analizan sus propiedades mecánicas. Para un análisis en profundidad del mismo, se plantea el estudio del aluminio en diferentes fases. Estas etapas de análisis pasan por fases posteriores de fundición y refundición. De esta forma, se inicia con el análisis del aluminio comercial, preparado en probetas específicas para el análisis mecánico diseñado. Estas probetas de ensayo pasan por una prueba de fatiga. En este ensayo se cuantifica la rotura y sus ciclos. Asimismo, se realiza un análisis visual del perfil que presenta la rotura de las probetas tras la realización del ensayo de fatiga. Luego de esto, las piezas se utilizan para ser recicladas, esto es mediante la fundición de las mismas obteniendo piezas con la misma forma. La misma prueba de fatiga se lleva a cabo en estas probetas de ensayo de fundición. Se cuantifica nuevamente la rotura, a través de su valor y ciclos, y se analiza visualmente su perfil, comparándolo con el anterior, de las probetas comerciales. Finalmente, se propone la refundición de las probetas de fundición, repitiendo nuevamente todo el proceso de ensayo y análisis mecánico. A lo largo

del trabajo se aportan los datos obtenidos del ensayo, así como diferentes vistas de detalle de los perfiles de fractura para un mejor análisis del aluminio como posible material reciclado en aplicaciones de edificación. En base a ello, se proponen las siguientes conclusiones principales de este trabajo, que parte del análisis de los ensayos mecánicos realizados, tanto en cuanto a sus resultados cuantificables, como del análisis visual de los perfiles de fractura.

Después de realizar el procedimiento indicado, es posible observar una pérdida de vida de fatiga general. La brecha relacionada con los ciclos de vida a la fatiga, entre las probetas de aluminio comerciales y las obtenidas después del primer proceso de refundición, se muestra notablemente amplia.

Mientras tanto, es posible apreciar una reducción notoria en la brecha entre el primer y el segundo proceso de refundición.

Estos resultados limitan mucho el uso de fundición de aluminio para elementos constructivos ya que no presenta la resistencia esperada. De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de aluminio fundido debe ser preferentemente en tareas mecánicamente no exigentes, como elementos decorativos o no estructurales.

Con respecto a las secciones de fractura, se puede ver que las probetas fundidas tienen más poros internos. Esto puede deberse a un problema en el proceso de fundición.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A European Green Deal | European Commission. (n.d.). Retrieved January 15, 2022, from [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)

Abeysondra, U. G. Y., Babel, S., Gheewala, S., & Sharp, A. (2007). Environmental, economic and social analysis of materials for doors and windows in Sri Lanka. *Building and Environment*, 42(5), 2141–2149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.005>

Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2013). Influence of cavities geometric and emissivity properties on the overall thermal performance of aluminum frames for windows. *Energy and Buildings*, 60, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.028>

Cireddu, A. (2021). New Housing Developments in the City Center of Guadalajara (Mexico): An Analysis from the Perspective of Collective and Sustainable Dwelling. *Buildings*, 11(4), 168. <https://doi.org/10.3390/buildings11040168>

Enginsoy, H. M., Bayraktar, E., Katundi, D., Gatamorta, F., & Miskioglu, I. (2020). Comprehensive analysis and manufacture of recycled aluminum based hybrid metal matrix composites through the combined method; sintering and

sintering + forging. *Composites Part B: Engineering*, 194, 108040. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108040>

Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227, 111372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>

Hauser, U., & Kerler, W. (1958). Easily Mounted Aluminum Oxide Foils for Windows and Backings. *Review of Scientific Instruments*, 29(5), 380–382. <https://doi.org/10.1063/1.1716202>

Inomovich, A. N. (2021). Principles of Reconstruction and Formation of Residential Buildings Typical of Historical City Centers. *EUROPEAN JOURNAL OF INNOVATION IN NONFORMAL EDUCATION*, 1(2), 29–40.

Jen, Y.-M., & Chang, L.-Y. (2009). Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1282–1293. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.004>

Lee, S. (2021). A Study on the Trends for Expression in Korean Contemporary Architectural Facade Design: Focusing on Large Buildings in the City Center. *Buildings*, 11(7), 274. <https://doi.org/10.3390/buildings11070274>

Li, Z., Wang, X., He, M., Shu, Z., Huang, Y., Wu, A., & Ma, Z. (2021). Mechanical performance of pre-fabricated metal dovetail connections for Cross-Laminated Timber (CLT) structures. *Construction and Building Materials*, 303, 124468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124468>

Matteis, G. De, Moen, L. A., Langseth, M., Landolfo, R., Hopperstad, O. S., & Mazzolani, F. M. (2001). Cross-Sectional Classification for Aluminum Beams—Parametric Study. *Journal of Structural Engineering*, 127(3), 271–279. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:3\(271\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:3(271))

Moen, L. A., Hopperstad, O. S., & Langseth, M. (1999). Rotational Capacity of Aluminum Beams under Moment Gradient. I: Experiments. *Journal of Structural Engineering*, 125(8), 910–920. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:8\(910\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(910))

Rai, D. C., Annam, P. K., & Pradhan, T. (2013). Seismic testing of steel braced frames with aluminum shear yielding dampers. *Engineering Structures*, 46, 737–747. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.027>

Ray, M. H., Oldani, E., & Plaxico, C. A. (2004). Design and analysis of an aluminum F-shape bridge railing. *International Journal of Crashworthiness*, 9(4), 349–363. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0295>

Schroth, J. G., Brueggeman, H. M., & Grewal, N. P. (2007). Quick Plastically Formed Aluminum Doors: Design and Performance. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(3), 339–348. <https://doi.org/10.1007/s11665-007-9059-6>

Shamsudin, S., Zhong, Z. W., Rahim, S. N. A., & Lajis, M. A. (2017). The influence of temperature and preheating time in extrudate quality of solid-state recycled aluminum. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9–12), 2631–2643. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9521-4>

Shi, Y. J., Cheng, M., & Wang, Y. Q. (2005). Application and Study of Aluminum Alloy in Building Structures [J]. *Building Science*, 6.

Sormunen, P., & Kärki, T. (2019). Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. *Journal of Building Engineering*, 24, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100742>

Yang, K., Tang, Z., Cheng, Z., Zhao, H., Feng, R., & Long, G. (2022). Mechanical properties of ultra-high strength cement-based materials (UHSC) incorporating metal powders and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 318, 125926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125926>

Zeng, L., Liang, H., Liu, L., & Zhang, Q. (2021). Anti-explosion Design Method for Aluminum Alloy Doors in Ordinary Buildings. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(1), 268–279. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01055-w>

Zhou, B., Liu, B., Zhang, S., Lin, R., Jiang, Y., & Lan, X. (2021). Microstructure evolution of recycled 7075 aluminum alloy and its mechanical and corrosion properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 879, 160407. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160407>