

Estado del arte de los procesos de soldadura con Tig para estructuras de aluminio

State of the art of TIG welding processes for aluminum structures

-  Luis Antonio Chica Castro: Universidad de Guayaquil, Magister en Diseño Mecánico con Mención en Fabricación de Autopartes, <https://orcid.org/0000-0002-1560-5147>
 Hugo Ernesto Solís Ferrer: Universidad de Guayaquil, Magister en Sistemas Integrados de Gestión, <https://orcid.org/0000-0002-7197-8319>
 Víctor Hugo Garofalo Largo: Universidad de Guayaquil, Magister en Sistemas Integrados de Gestión, <https://orcid.org/0000-0002-4259-6573>
 Joyce Marcelo Arias Pereira: Universidad de Guayaquil, Magister en Diseño Curricular, <https://orcid.org/0000-0002-9238-2557>

Autor de correspondencia: luis.chicac@ug.edu.ec

Recibido: 4 agosto 2025

Publicado: 25 septiembre 2025

DOI: <https://doi.org/10.64424/rcu42202594>

Resumen:

La soldadura por fusión es un proceso clave en la fabricación industrial, entre sus variantes, el proceso TIG destaca para soldar aleaciones de aluminio que son considerados como materiales ligeros y de alta resistencia debido a su precisión y calidad. Sin embargo, su principal desafío es el control térmico. Un aporte de calor insuficiente no rompe la capa de óxido del aluminio, mientras que el exceso expande la Zona Afectada por el Calor (ZAC), provocando crecimiento de grano, pérdida de propiedades mecánicas hasta un 50% de resistencia y defectos. Esta revisión sistemática empleó el método PRISMA para analizar, en Scopus, el impacto de la temperatura del proceso TIG sobre las propiedades de las soldaduras de aluminio. Tras filtrar 823 documentos con criterios estrictos 2020-2025, acceso abierto, se seleccionaron 30 artículos clave. El análisis se centra en correlacionar el aporte térmico con la microestructura y las características mecánicas finales de la unión. El análisis evidencia que el calor del proceso TIG degrada consistentemente las propiedades mecánicas en las aleaciones de aluminio estudiadas 2219, 5083, 7075, 6061. El efecto principal es el ablandamiento y crecimiento de grano en la Zona Afectada por el Calor (HAZ), lo que reduce la dureza y la resistencia a la tracción hasta en un 50-60% comparado con el metal base.

Palabra clave: Aluminio, Soldadura TIG, ZAC, Prisma,

Abstract

Fusion welding is a key process in industrial manufacturing. Among its variants, the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW/TIG) process stands out for welding aluminum alloys materials valued for their light weight and high strength due to its precision and quality. However, its primary challenge is thermal management. Insufficient heat input fails to break down the tenacious aluminum oxide layer, while excessive input widens the Heat-Affected Zone (HAZ), leading to grain growth, loss of mechanical properties with strength reductions of up to 50%, and defects. This systematic review employed the PRISMA method to analyze the impact of TIG process temperature on aluminum weld properties using the Scopus database. After filtering 823 documents based on strict criteria 2020–2025, open access, 30 key articles were selected. The analysis focuses on correlating heat input with the final microstructure and mechanical characteristics of the joint. The findings demonstrate that the heat from the TIG process consistently degrades the mechanical properties of the aluminum alloys studied 2219, 5083, 7075, 6061. The primary effect is softening and grain coarsening in the Heat-Affected Zone (HAZ), which reduces hardness and tensile strength by up to 50–60% compared to the base metal

Keywords: Aluminum, TIG welding, ZAC, Prisma

UNANCHAY Revista de Ciencias de la Ingeniería Volumen 4. Número 2. Año 2025, p. 131-147

ISSN 2953-6707 julio - diciembre 2025

<https://istte.edu.ec/revistaunanchay/index.php/RCU/index>

Como citar la obra: Chica Castro, L. M., Solís Ferrer, H. E., Garofalo Largo, V. H. y Arias Pereira, J. M. (2025). Estado del arte de los procesos de soldadura con tig para estructuras de aluminio. *Revista Científica Unanchay*, 4(2), 131-147
doi: <https://doi.org/10.64424/rcu42202594>



Introducción

La industria de fabricación moderna se encuentra desarrollando procesos de unión de materiales metálicos, mediante la fusión de los materiales base sumando un elemento de aporte (Omprakasam et al, 2022). Dicho proceso de fabricación es denominado soldadura por fusión, el cual, consiste en calentar el elemento hasta su estado de fusión, para unirlos o integrarlos (Al Kareem, 2023), siendo un claro ejemplo de este proceso las uniones metálicas utilizadas en el ámbito industrial, con una destacada presencia en áreas como la automotriz, ferroviaria, construcción, naval y aeroespacial (González et al, 2023).

El proceso de soldado es considerado un método rentable que genera acabados de alta calidad para trabajos de uniones (Omprakasam et al, 2022). Entre los procesos de soldadura por fusión se encuentran los siguientes:

La soldadura por arco metálico protegido (SMAW); la soldadura por arco metálico con gas (GMAW), que incluye, en particular, la soldadura por gas inerte metálico (MIG) y la soldadura por gas activo metálico (MAG); la soldadura TIG, también llamada soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW); la soldadura ultrasónica (USW); la soldadura por haz láser (LBW); la soldadura por fricción y agitación (FSW); y la soldadura por haz de electrones (EBW) (González et al, 2023, p 2).

De los métodos citados, el Mic/Mag, Tig y SMAW se encuentran con mayor prevalencia en el medio, destacando de este grupo el proceso de soldadura Tig, debido a su superioridad en la soldadura de materiales menos densos que son considerados más versátiles, económicos, genéricos y comúnmente utilizados en la mayoría de los sectores mencionados (Antony et al, 2023), sin embargo, al ser un procesos que se encuentra dentro de la industria de la metalurgia, es fuertemente criticada por emplear métodos que consumen grandes cantidades de energía para la transformación de un material (González et al, 2023).

La relación entre el consumo de energía y la generación de residuos presentes en los procesos de soldadura se debe, a que la tecnología empleada durante la actividad de fabricar un nuevo elemento de diferente forma y tamaño, precisa de la aplicación de calor al material hasta su punto de fusión, lo que conlleva a un elevado consumo de energía, pero, si no se logra aplicar la cantidad de calor adecuado, la unión puede presentar porosidad, soplado, segregación de la aleación y agrietamiento (Rajendran et al, 2021), lo cual no solo perjudica esta relación consumo-producción, sino, presenta un producto deficiente para la industria.

Es decir, la relación entre consumo y generación, como se menciona, va más allá de solo el criterio ambiental, si no, de lo que se encuentra inmerso en el proceso de fabricación, como el calor, ciclo térmico, conductividad térmica, posible precalentamiento, estética, técnica del operario, material, consumo del material, espesor del material, proceso de soldadura específico y demás variables presentes, que deben ser analizadas, para encontrar un balance entre el proceso y el producto (Gonzalez et al, 2023; Fracchia et al, 2022)

La soldadura es un proceso crítico en la fabricación y ensamblaje de estructuras metálicas. Sin embargo, este proceso presenta diversas problemáticas que afectan la calidad y las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. Por ello, de los criterios mencionados para la investigación, se tomó en cuenta el proceso de soldadura específico, material, calor y como ellos inciden en las características mecánicas del elemento soldado.

El proceso de soldadura Tig presenta mejores resultados a la hora de soldar materiales menos densos como el aluminio (Anthony et al, 2023). Además, es el más empleado para estas aleaciones (Ji et al, 2023). Por el hecho de que cuentan con una alta conductividad térmica, lo cual, permite a estos materiales llevar un gran baño de fusión, sin embargo, un alto aporte de calor puede provocar una disminución en la calidad de la soldadura (Wang et al, 2023), otro punto a considerar es la elección del material de aporte, el cual, si no es compatible con el material base, puede generar problemas como la segregación de elementos de aleación durante la solidificación, provocando defectos como agrietamiento en caliente y microestructura gruesa (Kumar et al, 2022).

Dentro de las características del aluminio este cuenta con una alta resistencia y, al ser un material ligero, es empleado en la fabricación de estructuras para las industrias automotriz y aeroespacial, las cuales, exigen elementos ligeros y de alta resistencia que contribuyan al desarrollo de transportes energéticamente eficientes (Cheng, et al, 2022).

De la misma manera, el aluminio cuentan con excelentes propiedades mecánicas, que al estar acompañadas de una alta resistencia a la corrosión, a la fatiga y su relación resistencia-peso (Haryadi et al, 2020; Fracchia et al, 2022; Rajendran et al, 2021) lo convierten en un elemento ideal para las industrias mencionadas, sin embargo, en el estudio de Rajendra et al (2021) evidencio que las uniones a las que se aplica el método Tig, la aleación de aluminio 6061-T6 presenta una eficiencia de 40%-50% menor de la resistencia que presenta el material base, lo cual, fue contrastado con el estudio de Anthony et al, (2023), en el cual menciona que en circunstancias optimas la soldadura TIG generaría uniones de alta calidad.

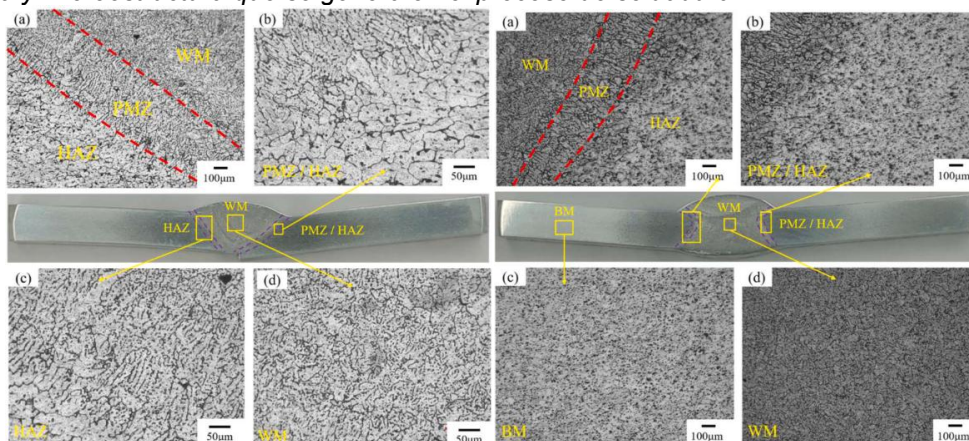
Además, durante la revisión bibliográfica se logró corroborar que las aleaciones de aluminio 2019-T8, 5083, 7075 y 6061-T6 son las que cuentan con investigaciones que presentan procesos de prueba para valorar la incidencia del calor durante el proceso de soldadura y, como el tipo de microestructuras que se forma tiene una correlación con las características mecánicas del elemento.

Es decir, el alto aporte de calor significa una baja densidad de energía y un arco más ancho. En las aleaciones de aluminio este aporte de calor tiene inferencia en la microestructura, lo cual, incide en las propiedades mecánicas, llevando a que la zona afectada por la temperatura (ZAT) aumente, pero, este aporte de calor por parte del proceso TIG responde a la necesidad de que la ruptura de la capa de óxido en la zona de soldadura es difícil, y solo se logra romper con un alto aporte de calor (Rajendran et al, 2021).

Los procesos de soldadura por lo general evidencian tres regiones generales soldado como son el metal base (MB o BM), la zona afectada por el calor (ZAC, HAZ o PMZ) y el metal soldado (MM o WM) (Fracchia et al, 2022; Anthony et al, 2023; Ji et al, 2023). Estas zonas son consideradas para análisis de la incidencia de calor con el tipo de microestructura que se genera ya que, “las propiedades de resistencia de las uniones soldadas dependen de la dureza, el tamaño del grano y la distribución de los precipitados” (Rajendran et al, 2021, p. 482), además, “las estructuras de grano fino resultantes de una soldadura óptima son capaces de producir mejores propiedades mecánicas, como mayor resistencia a la tracción, dureza mejorada y alta resistencia al impacto de la unión soldada” (Antony et al, 2023, p. 599) figura 1.

Figura 1

Zona y microestructura que se genera en el proceso de soldadura



Nota. Ji et al, (2023). La figura representa las zonas que se generan durante el proceso de soldadura y como la cantidad de calor incide en la formación de microestructuras. En el lado izquierdo se presenta un proceso de soldadura de una sola pasada. En el lado derecho se presenta un proceso de soldadura de doble pasada en el cual ya se observa el proceso de enfriamiento y calentamiento

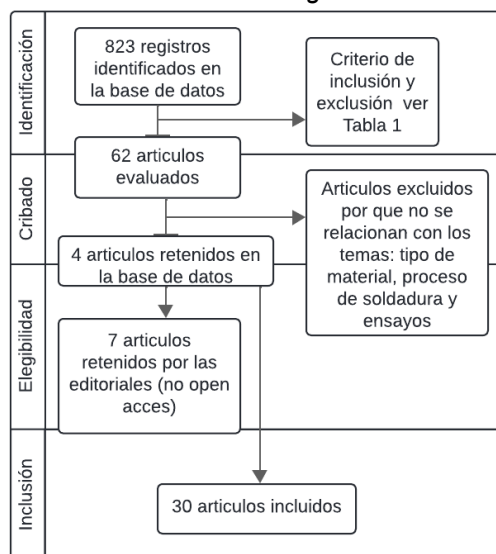
Metodología

El estudio desarrolla una revisión sistemática de la literatura sobre los procesos de soldadura Tig en aleaciones de aluminio y como la temperatura empleada en el proceso de suelda incide en la característica del mismo, para ello, se inicia con la selección y la combinación de estudios presentes en la base de datos Scopus, este método no solo considera realizar una revisión de la literatura, sino qué, permite un análisis consistente de los resultados que cada investigación presenta (Manterola et al, 2013), además, el registro para la selección de los estudios se realizó mediante la aplicación del método PRISMA 2009, mismo, que permite evidenciar una síntesis del estado de la cuestión en el área de conocimiento previamente determinada (Page et al, 2021).

El proceso para la selección de la literatura se encuentra detallado en la figura 2, la cual, es una adaptación de procedimientos similares, permitiendo la replicabilidad de este.

Figura 2

Diagrama del proceso para la selección de investigaciones



Nota. Autores, (2025). Diagrama adaptado del estudio de Page et al, (2020); Ferreira et al, (2011); Toma, (2021),

La búsqueda se realiza en la base de datos Scopus, el criterio para la selección de la base de datos se basa en el impacto que presentan estas investigaciones y, aportar información de relevancia. Para iniciar se utilizaron operadores booleanos y palabras clave *tig and welding and process for aluminum*, se ingresó la información en inglés, porque generó un número mayor de resultados en este idioma, en comparación al español. El registro inicial presento 823 documentos, a los cuales, se les realiza un refinamiento, añadiendo criterios de inclusión y exclusión, que se detallan en la tabla 1

Tabla 1*Criterios para la búsqueda de información teórica*

Criterios	Inclusión	Exclusión
Fuentes de información	Artículos de bases de datos indexada (Scopus)	Libros, reportajes, conferencias y reportes de caso
Tiempo	Artículos publicados de 2020 a 2025.	Publicaciones anteriores a 2020
Idioma	Artículos en inglés y español	Artículos en otros idiomas
Área temática	Ingeniería y ciencia de materiales	Artículos sin relación con las áreas definidas
Acceso	Acceso abierto	Grado bronce, plata, oro y DOI corrompidos
Keywords	Aluminum Alloys, Aluminum, Welding, Tungsten Inert Gas Welding, Tig Welding, Tungsten Inert Gas, Welding Process, Tig, Aluminum Alloy, Tig Welding Process, Defects, Tig Method, Tungsten Inert Gas (tig) Welding, Welding Process Parameters	Palabras sin relación con las enunciadas

Nota. Autores, (2025)

Al finaliza el registro se presentó un total de 30 artículos, los cuales, serán analizados bajo los criterios del tipo de aluminio empleado, proceso de suelda Tig y evaluación realizada a la suelda, para corroborar si la zona de calor que se genera incide en la característica de la unión y, cuál de ellas presenta una adecuada unión.

Resultados

Incidencia de calor en la aleación 2219-T8

El calor genera un ablandamiento significativo en las aleaciones 2219-T8, provocando un endurecimiento, el cual, se elimina a una temperatura de entre 200 y 300 °C, este fenómeno conocido como recocido provoca una disminución en la resistencia del material, ya que, un material endurecido puede reducir su tensión residual longitudinal a 150 Mpa menor a un material sin recocido (Zhao et al, 2023). Además, el MM presenta diferentes características en cuanto a resistencia y ductilidad de material con respecto a la ZAC, generadas por el cambio en la microestructura, que parten de la formación de fases intermetalizadas (Zhao et al, 2023).

Esto provoca que la unión soldada presente una resistencia a la tracción con un 50 a 60% del material base, generadas por la formación de microestructuras no deseadas en la zona de soldadura MM y la zona parcialmente fundida (PMZ), donde se producen concentraciones de tensiones y segregación de elementos que afectan negativamente las propiedades mecánicas (Zhao et al, 2023; Wan et al, 2024)

La microestructura de la zona de soldadura convencionalmente presenta granos dendríticos gruesos, lo que contribuye a la fragilidad de la unión (Wang et al, 2023), sin embargo, la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas es compleja y no lineal. Lo que conlleva a que las investigaciones en este campo continúen siendo de vital importancia para mejorar la calidad y la eficiencia de la soldadura en aplicaciones críticas, como las aeroespaciales (Wan et al, 2022; Wan et al, 2024)

Incidencia de calor en la aleación 5083

La soldadura Tig es un proceso ampliamente utilizado en la unión de aleaciones que contienen magnesio, como la serie AA5XXX, sin embargo, el calor aplicado puede provocar la disolución del magnesio en la aleación, lo que resulta en una disminución de la resistencia mecánica en la zona de fusión, debido a que el calor excesivo puede llevar a un envejecimiento sobrepasado de los precipitados de refuerzo, debilitando así la estructura del material (Raj et al, 2024).

El efecto de este fenómeno se puede observar en la resistencia a la tracción de las uniones soldadas por TIG que generalmente es inferior a la del metal base, debido a la formación de microfisuras y porosidades en la zona de soldadura (Habba et al, 2023); (Goriparthi et al, 2023)

La microestructura resultante de la soldadura TIG en la zona de fusión, presenta estructuras dendríticas de grano grueso, lo que resulta en una menor resistencia mecánica en comparación con el metal base no afectado. Esto debido al intenso calor aplicado en el proceso lo que provoca cambios en la microestructura del metal base y en la HAZ. (Raj et al, 2024). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que un aporte de calor insuficiente puede resultar en una unión débil, mientras que un exceso de calor puede causar deformaciones no deseadas y defectos en la soldadura (Goriparthi et al, 2023). Una solución para reducir la pérdida de Mg es utilizar una varilla de aporte con un alto porcentaje de Mg 3.5%, ya que, en aleaciones de 1 a 2,5% de Mg son propensas a agrietarse. Adicional, el estudio realizado por Raj (2024) menciona que es posible mitigar una parte de la pérdida de magnesio con la aplicación de una varilla de aporte con alto porcentaje de magnesio, en su estudio aplicó la ER5356, a pesar de ello, se presentaron otros desafíos como microfisuras, sin embargo, cabe tomar en cuenta que las aleaciones que contienen de 1 a 2,5% de Mg son propensas a agrietarse por ende es necesario utilizar un metal de aporte que contenga un 3.5% de Mg (Tandel y Menghani, 2022).

Incidencia de calor en la aleación 7075

Durante el proceso de soldadura, se generan diferentes zonas afectadas por el calor (ZAC), que influyen significativamente en las propiedades mecánicas de la unión soldada. Además, las zonas afectadas por el calor (ZAT) experimentan un ablandamiento debido al envejecimiento excesivo, lo que también contribuye a la disminución de la resistencia. En estas zonas, se forman precipitados frágiles que pueden llevar a fallas intergranulares, como se evidenció en las micrografías de las superficies de fractura (Kaba et al, 2022). La microdureza en la ZF es notablemente más baja, alcanzando valores de alrededor de 96 HV, en comparación con los 148 HV en las ZAT, lo que indica una variabilidad significativa en las propiedades mecánicas a lo largo de la unión soldada (Kaba et al, 2022).

Un tratamiento térmico posterior a la soldadura puede ayudar a restaurar algunas de las propiedades mecánicas perdidas. Este proceso puede modificar el tamaño y la distribución de los precipitados, mejorando así la resistencia y la plasticidad de la unión soldada. Por ejemplo, se ha demostrado que el tratamiento de solución y el envejecimiento natural pueden aumentar la microdureza y la resistencia a la tracción de las uniones soldadas, acercándolas a las propiedades del material base (Wang et al, 2023).

Incidencia de calor en la aleación 6061

Durante el proceso de soldadura, se generan altas temperaturas que afectan la microestructura del material, lo que a su vez influye en sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y la dureza.

El calor aplicado durante la soldadura provoca la formación de diferentes zonas en la unión soldada: la zona de fusión (FZ), la zona afectada por el calor (HAZ) y el metal base (BM). En la FZ, la temperatura puede superar la línea de solvus, lo que resulta en la disolución de precipitados y la vaporización de elementos como el magnesio (Mg) (Cheng et al, 2022). Esto puede llevar a una disminución de la resistencia mecánica, ya que la microestructura se vuelve menos homogénea y más susceptible a la fractura.

La HAZ experimenta un crecimiento de grano debido al calor, lo que puede resultar en una disminución de la dureza y la tenacidad del material. Se ha observado que la dureza en esta región puede disminuir significativamente, alcanzando valores tan bajos como 58 HV, en comparación con el metal base que puede tener durezas superiores a 90 HV (Ji et al, 2023).

Los estudios han demostrado que la resistencia a la tracción de las uniones soldadas puede ser significativamente inferior a la del metal base. Por ejemplo, se ha reportado que la resistencia a la tracción de las uniones soldadas puede ser solo del 60-70% de la del metal base (Cheng et al, 2022).

Esto se debe a la influencia de múltiples ciclos térmicos en la soldadura, que alteran la composición química y la microestructura del material, resultando en una disminución de sus propiedades mecánicas (Ji et al, 2023). Además, la incidencia del calor en las propiedades mecánicas del material soldado es un fenómeno complejo que involucra cambios en la microestructura debido a la temperatura y la velocidad de enfriamiento (Al Kareem et al, 2023).

Incidencia de calor en la formación de microestructuras y características mecánicas de la aleación 5083

Un aumento en la corriente puede llevar a un mayor tamaño de grano en la zona de fusión, lo que generalmente resulta en una disminución de la resistencia mecánica. Por ende, un control adecuado de la corriente y la adición de elementos como el escandio en la varilla de aporte pueden mejorar significativamente la microestructura, promoviendo un tamaño de grano más fino y una mejor distribución de las fases intermetálicas, lo que se traduce en propiedades mecánicas superiores (Raj et al, 2024; Tandel y Menghani, 2022)

La correlación entre la microestructura y las características mecánicas del elemento soldado en la soldadura TIG es compleja y depende de múltiples factores, incluyendo la composición del material de aporte, los parámetros de soldadura y la naturaleza de la aleación base. La optimización de estos factores es esencial para lograr uniones soldadas de alta calidad que mantengan o superen las propiedades mecánicas del material base. Las uniones en esta zona tienden a mostrar una mayor resistencia a la tracción en comparación con las uniones soldadas por TIG, debido a la recrystalización que ocurre en estado sólido (Goriparthi et al, 2023).

La zona de agitación (WM o SZ) se caracteriza por presentar granos finos y equiaxiales debido a la recrystalización dinámica. Esto se debe a la alta temperatura y deformación plástica que se generan durante el proceso (Goriparthi et al, 2023). Mientras que la zona HAZ presenta crecimiento de grano y una posible disminución de dureza, lo que puede conllevar a una disminución de la resistencia mecánica, esta zona, presenta combinaciones de deformaciones plásticas y calentamiento.

En la HAZ, se observa un crecimiento del grano y una posible disminución de la dureza debido al sobre-envejecimiento de los precipitados de refuerzo. Esto puede resultar en una disminución de la resistencia mecánica (Goriparthi et al, 2023; Habba et al, 2023).

La cantidad de calor generada durante el proceso de soldadura es crucial. Un aporte de calor insuficiente puede resultar en una unión débil, mientras que un exceso de calor puede causar un sobre envejecimiento y defectos en la microestructura afectando negativamente a la unión soldada (Habba, et al, 2023); (Goriparthi et al, 2023).

Incidencia de calor en la formación de microestructuras y características mecánicas de la aleación 7075

La microestructura resultante de la soldadura TIG se caracteriza por la formación de granos gruesos en la zona afectada por el calor (ZAC), lo que puede llevar a una disminución significativa de las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y la dureza. Esto se debe a que el calor concentrado puede provocar la disolución de precipitados de refuerzo y la formación de defectos como porosidad y grietas (Shi et al, 2021).

El calor aplicado durante la soldadura provoca cambios microestructurales en el material. La zona fundida (ZF) presenta una microestructura dendrítica gruesa, lo que resulta en una baja densidad de dislocaciones y, por ende, en una disminución de la resistencia mecánica, se ha observado que la resistencia máxima a la tracción de la unión soldada de aleaciones 2024 y 7075 es considerablemente inferior a la de los metales base, mostrando reducciones del 44% y 37% respectivamente (Kaba et al, 2022). Esto se debe a que los precipitados de endurecimiento se disuelven en la ZF, lo que impide la formación de una estructura resistente.

La correlación entre la microestructura y las propiedades mecánicas se hace evidente al analizar cómo los parámetros del proceso de soldadura, como la corriente, la velocidad de desplazamiento y la composición del material de relleno, afectan la calidad de la unión. (Shi et al, 2021).

Además, la microdureza de las uniones soldadas varía significativamente a lo largo de la sección transversal del cordón de soldadura. En general, se observa que la microdureza es más baja en la zona de fusión, aumentando hacia las zonas afectadas térmicamente y el material base. Esta variación se debe a la diferencia en la composición y la microestructura en estas áreas, donde la ZAC presenta granos más gruesos y menos homogéneos, lo que contribuye a una menor resistencia mecánica (Shi et al, 2021)

Incidencia de calor en la formación de microestructuras y características mecánicas de la aleación 6061

La soldadura por arco de tungsteno con gas (TIG) es un proceso ampliamente utilizado para unir aleaciones de aluminio, como el AL6061, debido a su capacidad para producir uniones de alta calidad. La microestructura resultante de la soldadura TIG tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas del material soldado. Durante el proceso de soldadura, se generan diferentes zonas: el metal base (BM), la zona afectada por el calor (HAZ) y el metal de soldadura (WM). En particular, el tamaño de grano en la zona de soldadura es un factor crítico; se ha observado que en el proceso de soldadura TIG de una sola pasada, el tamaño de grano promedio es de aproximadamente 45 μm , mientras que, en el proceso de soldadura completa, este tamaño aumenta a 55 μm , lo que resulta en una distribución de cristales más uniforme (Ji et al, 2023)

El efecto del calor aplicado durante la soldadura es fundamental para la evolución de la microestructura. En el caso del AL6061, el tratamiento térmico posterior a la soldadura, como el envejecimiento artificial T6, puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas al promover la precipitación de fases que obstaculizan el movimiento de dislocaciones, aumentando así la resistencia del material (Haryadi et al, 2020). Sin embargo, un aporte de calor excesivo puede llevar a la formación de estructuras de grano grueso, lo que puede degradar las propiedades mecánicas (Al Kareem et al, 2023)

Los estudios han demostrado que la resistencia a la tracción y la dureza de las uniones soldadas varían según el proceso de soldadura utilizado. En general, el proceso de soldadura completa TIG tiende a ofrecer mejores propiedades mecánicas en comparación con la soldadura de una sola pasada, debido a la mayor homogeneidad en la microestructura y la distribución de temperatura durante el proceso (Ji et al, 2023). Además, la microdureza en la zona afectada por el calor y el metal de soldadura también muestra diferencias significativas, lo que indica que el control de los parámetros de soldadura es crucial para optimizar las propiedades mecánicas del material soldado (Ji et al, 2023)

La elección del proceso de soldadura, el control del aporte de calor y el tratamiento térmico posterior son factores determinantes que afectan la calidad de la unión y las propiedades mecánicas del material. (Ji et al, 2023); (Haryadi et al, 2020)

Discusión

La zona HAZ presenta un crecimiento de grano debido al calor, con lo cual, disminuye su dureza y tenacidad, alcanzando valores de 58 HV en comparación al metal base que puede tener 90HV (Ji et al, 2023)., sin embargo, un tratamiento térmico posterior a la soldadura mejora significativamente las propiedades mecánicas, similar al proceso realizado por Aljezi, et (2022), donde, la adición de fundentes activos como el óxido de titanio (TiO_2) y el óxido de silicio (SiO_2) mejora la granularidad de la HAZ, lo que a su vez afecta las propiedades mecánicas de la soldadura, principalmente en las pruebas de tracción y dureza, las cuales muestran que la adición de fundentes activos presentan mayor resistencia.

Además, durante el estudio se ha mencionado que las temperaturas elevadas afectan la distribución de la microestructura y propician la generación de granos gruesos, en este punto un estudio realizado por Hu et al, (2024) menciona que una temperatura adecuada para reducir dichas situaciones y reducir efectos como porosidad y grietas va aproximadamente de 1000 a 1300 oC, en procesos de soldadura de pared delgada, con lo cual la aleación puede alcanzar una resistencia a la tracción de 290MPa.

Adicional, el calor puede provocar la formación de fases intermetálicas que son responsables del endurecimiento por precipitación. Esto se debe a que la adición de elementos como el silicio y el magnesio en la aleación influye en la formación de estas fases, mejorando así la resistencia mecánica (Labuda et al, 2024). Sin embargo, el calor aplicado durante la soldadura puede afectar la zona afectada por el calor (ZAT), lo que puede resultar en una disminución de la resistencia mecánica en esa área si no se controla adecuadamente (Labuda et al, 2024)

El aporte de calor durante la soldadura afecta la micromorfología del área de soldadura. Es decir, un aporte de calor bajo (70 A), se forma una capa de reacción interfacial delgada, mientras que al aumentar el calor 80 A y 90 A, el espesor de esta capa aumenta y su morfología cambia a estructuras más complejas, como dentadas o aglomeradas (Xu et al, 2020), de la misma manera el exceso de calor 100 A puede llevar a la formación de grietas y a una disminución de la resistencia (Xu et al, 2020). Ya que, A medida que aumenta el aporte de calor, el ancho de la ZAT se ensancha y el tamaño del grano se vuelve más grueso, lo que puede llevar a una disminución de la resistencia a la tracción y de la dureza en la zona de fusión de la soldadura (Samiuddin et al, 2021). Pero, los procesos de soldadura no están exceptos de la presencia de calor y, en las zonas de fusión, el refinamiento de Mg es primordial para que contribuya a una microestructura más fina y uniforme, con lo cual, se logre mejorar las propiedades mecánicas como las deformaciones plásticas (Liu et al, 2022) ya que,

Otro elemento que considerar también son, las pruebas de impacto que han mostrado que las muestras soldadas a baja velocidad (bajo aporte de calor) tienen una mayor energía absorbida en comparación con aquellas soldadas a alta velocidad (alto aporte de calor), debido a la menor porosidad y a la formación de granos equiaxiales que mejoran la tenacidad (Samiuddin et al, 2021)

La cantidad de calor introducido en la unión durante la soldadura afecta la cristalización y las transiciones de fase en la zona afectada por el calor (ZAC). Esto es crucial para asegurar que la microestructura resultante proporcione propiedades mecánicas adecuadas (Mróz et al, 2022)

Conclusiones

El principio fundamental e inherente a todos los procesos de soldadura, es la aplicación de calor, ya que, es esencial para la unión, pero su gestión inadecuada constituye la principal fuente de degradación de las propiedades mecánicas en la unión soldada, particularmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC o HAZ).

La calidad final de una soldadura no depende únicamente de la ejecución del depósito, sino de un enfoque integral que comprende el control preciso del aporte térmico, la posible modificación de la química mediante fundentes y la aplicación de tratamientos térmicos posteriores, todo ello dirigido a mitigar los efectos perjudiciales del ciclo térmico. Por el hecho de que, uno de los inconvenientes es el crecimiento de grano en la ZAC debido a la exposición a temperaturas elevadas.

Este fenómeno, claramente cuantificado por la caída de dureza, conlleva una reducción simultánea de la tenacidad y la resistencia, creando una zona potencialmente frágil y crítica en la estructura. La literatura revisada coincide en que este efecto es función directa del aporte de calor total. Un calor excesivo de 100 A no solo amplía y agrava la ZAC de grano grueso, sino que promueve defectos como porosidad, grietas y la formación de fases intermetálicas indeseables o capas de reacción interfacial demasiado gruesas y complejas, comprometiendo la integridad mecánica.

Sin embargo, existe una ventana operativa óptima con un aporte de calor controlado y moderado con corrientes de 70-90 A y temperaturas en el rango de 1000-1300 °C para procesos específicos, con lo cual, se minimiza el crecimiento del grano y los defectos. Esto se traduce en mejores propiedades, como una mayor resistencia a la tracción ~290 MPa y, crucialmente, una mayor tenacidad al impacto, debido a una microestructura más refinada y con menor porosidad.

La soldadura de calidad es un equilibrio termo-metalúrgico. Por el hecho de que el calor, herramienta indispensable, es también el principal antagonista. La evidencia presentada conduce a la conclusión de que no existe una solución única, sino un sistema de compensación.

Referencias

- Ajezi-Sardroud, R., Mostafapour, A., Ajezi-Sardroud, F., & Mohtadi-Bonab, M. A. (2022). Effect of Active Flux on Aluminum 6061 and its Mechanical Properties by Gas Tungsten Arc Welding Process. *International Journal of Engineering Transactions C: Aspects*, 35(8). Scopus.
<https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.08b.06>
- Al Kareem, S. S. A., Mahdi, B. L., & Hussein, H. K. (2023). Impact of TIG Welding Parameters on the Mechanical Properties of 6061-T6 Aluminum Alloy Joints. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(5), 114-129. Scopus.
<https://doi.org/10.12913/22998624/171489>
- Antony Prabu, D., Jayakumar, K. S., Madhavan Pillai, E., & Kumaresan, G. (2023). OPTIMIZATION OF GTAW PROCESS PARAMETERS OF DISSIMILAR AL-MG ALLOYS FOR ENHANCED JOINT STRENGTH - TAGUCHI APPROACH. *Archives of Metallurgy and Materials*, 68(2), 599-606. Scopus.
<https://doi.org/10.24425/amm.2023.142440>
- Cheng, J., Song, G., Zhang, Z., Khan, M. S., Dong, X., & Liu, L. (2022). Investigating the multiscale effects of a novel post-weld composite processing treatment on minimizing weld softening in AA6061-T6 Al-alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4392-4408. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.020>
- Ferreira González, I., Urrútia, G., & Alonso-Coello, P. (2011). Systematic Reviews and Meta-Analysis: Scientific Rationale and Interpretation. *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, 64(8), 688-696.
<https://doi.org/10.1016/j.rec.2011.03.027>
- Fracchia, E., Bidulská, J., Bidulský, R., & Grande, M. A. (2022). MIG and TIG Joining of AA1070 Aluminium Sheets with Different Surface Preparations. *Materials*, 15(2). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/ma15020412>
- Goriparthi, V., Nallu, R., Chebolu, R., Indupuri, S., & Rudrapati, R. (2023). Experimental Studies on Mechanical Behavior of TIG and Friction Stir Welded AA5083 -AA7075 Dissimilar Aluminum Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023. Scopus.
<https://doi.org/10.1155/2023/8622525>
- González-González, C., Los Santos-Ortega, J., Fraile-García, E., & Ferreiro-Cabello, J. (2023). Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes. *Metals*, 13(6). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/met13061094>

- Habba, M. I. A., Alsaleh, N. A., Badran, T. E., El-Sayed Seleman, M. M., Ataya, S., El-Nikhaily, A. E., Abdul-Latif, A., & Ahmed, M. M. Z. (2023). Comparative Study of FSW, MIG, and TIG Welding of AA5083-H111 Based on the Evaluation of Welded Joints and Economic Aspect. *Materials*, 16(14). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/ma16145124>
- Haryadi, G. D., Dewa, R. T., Ekaputra, I. M. W., & Suprihanto, A. (2020). Investigation of post-weld heat treatment (T6) and welding orientation on the strength of TIG-welded AL6061. *Open Engineering*, 10(1), 753-761. Scopus.
<https://doi.org/10.1515/eng-2020-0084>
- Hu, Y., Pei, W., Ji, H., Yu, R., & Liu, S. (2024). Tungsten Inert Gas Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy Frame: Finite Element Simulation and Experiment. *Materials*, 17(5). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/ma17051039>
- Ji, H., Hu, Y., Yu, R., Liu, S., Pei, W., & Wang, B. (2023). Experimental study on TIG full welding and single pass welding quality of 6061-T6 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 5965-5976.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.043>
- Kaba, L., Djeghlal, M. E., Ouallam, S., & Kahla, S. (2022). Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3-4), 937-948. Scopus.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07888-5>
- Kumar, R., Kumar, G., Roy, A., Sinha, R. S., Hasnain, S. M. M., Prakash, O., & Ahmad, A. (2022). A comparative analysis of friction stir and tungsten inert gas dissimilar AA5082-AA7075 butt welds. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, 74-80. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.12.002>
- Labuda, W., Wieczorska, A., & Charchalis, A. (2024). The Influence of the Burnishing Process on the Change in Surface Hardness, Selected Surface Roughness Parameters and the Material Ratio of the Welded Joint of Aluminum Tubes. *Materials*, 17(1). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/ma17010043>
- Liu, H., Ma, J., Liu, W., Wu, G., Sun, J., Tong, X., & Chen, P. (2022). Influence of TIG welding process parameters on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4114-4129. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.157>

- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., & Claros, N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía Española*, 91(3), 149-155.
<https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2011.07.009>
- Mehdi, H., & Mishra, R. S. (2021). Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075. *Defence Technology*, 17(3), 715-727. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.014>
- Mróz, M., Orłowicz, A. W., Lenik, M., Trytek, A., & Tupaj, M. (2022). Calorimetric Method for the Testing of Thermal Coefficients of the TIG Process. *Materials*, 15(20). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/ma15207389>
- Omprakasam, S., Marimuthu, K., Raghu, R., & Velmurugan, T. (2022). Statistical Modelling and Optimization of TIG Welding Process Parameters Using Taguchi's Method. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 68(3), 200-209. Scopus.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2021.7414>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799.
<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Raj, R. A., Chanakyan, C., Prabu, D. A., & Prabakaran, S. (2024). Surface enhancement on TIG welded dissimilar Al-Mg alloy with ER5356 and scandium composites filler rod. *Materials Research Express*, 11(8). Scopus.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad71a2>
- Rajendran, C., Srinivasan, K., Balasubramanian, V., Balaji, H., & Selvaraj, P. (2021). Feasibility study of FSW, LBW and TIG joining process to fabricate light combat aircraft structure. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(4), 480-490. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.07.001>
- Samiuddin, M., Li, J.-L., Taimoor, M., Siddiqui, M. N., Siddiqui, S. U., & Xiong, J.-T. (2021). Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization. *Defence Technology*, 17(4), 1234-1248. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.012>

- Shi, C., Liu, C., & Zhu, K. (2021). Effect of friction stir processing on microstructures and mechanical properties of TIG cladding layer on AA7075. *Materials Research Express*, 8(12). Scopus.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac3e95>
- Tandel, K. D., & Menghani, J. V. (2022). Effect of Friction Stir Processing on Fusion Welded Joint of Al-5083. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 35(9), 1735-1743. Scopus.
<https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.09c.09>
- Toma R. B. (2021) Problemas de validez y fiabilidad en los cuestionarios ROSE: revisión sistemática de la producción española. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 18(3), 3102.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i3.3102
- Wan, Z., Zhao, Y., Wang, Q., Zhao, T., Li, Q., Shan, J., Wu, A., & Wang, G. (2022). Microstructure-based modeling of the PMZ mechanical properties in 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint. *Materials and Design*, 223. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111133>
- Wan, Z., Yi, Z., Zhao, Y., Zhang, S., Li, Q., Lin, J., & Wu, A. (2024). Prediction and optimization of tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint by machine learning. *Materials and Design*, 245. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113274>
- Wang, Y., Li, H., Li, Z., Zhang, Y., Qin, J., Chen, G., Qi, B., Zeng, C., & Cong, B. (2023). Refining microstructure of medium-thick AA2219 aluminium alloy welded joint by ultrasonic frequency double-pulsed arc. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3048-3061. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.174>
- Wang, Z., Zhang, Z., Cheng, J., Song, G., & Liu, L. (2023). Simultaneously increased strength and plasticity of TIG-welded 7075-T6 aluminum alloy joints via a novel post-weld composite treatment process. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 542-555. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.228>
- Xu, C., & Peng, C. (2020). Mechanical properties and microstructure analysis of welding-brazing of Al/ti butt joint with Zn foil additive. *Materials Research Express*, 7(2). Scopus.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5de5>
- Zhao, T., Zhao, Y., Wan, Z., Shang, P., Wu, A., Li, Q., & Yan, D. (2023). “Anneal” softening effect of 2219-T8 aluminum alloy joint during welding and its influence on prediction of welding residual stresses. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 5202-5214. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.093>