

# CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO

L.N. Tufaro<sup>(1)</sup>, H.G. Svoboda<sup>(2)</sup>

ltufaro@inti.gov.ar

<sup>(1)</sup>Dto. Soldadura-DT Procesos Industriales-SOMyL-GOSI - INTI,

<sup>(2)</sup>GTSyCM3-INTECIN-Facultad de Ingeniería - UBA

Palabras Clave: FSW; Propiedades Mecánicas; Calificación de Procedimiento de Soldadura

## **INTRODUCCIÓN**

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso en estado sólido desarrollado en 1991, el cual ha generado un fuerte impacto en la soldadura de aleaciones de aluminio, debido a las ventajas que presenta en comparación a otros procesos convencionales de fusión. En los últimos 30 años ha sido un tema relevante de investigación y desarrollo, evidenciado por la gran cantidad de publicaciones y patentes sobre este tema. Asimismo, se ha observado un creciente número de aplicaciones en diversas industrias.

Una medida de la madurez de una tecnología puede asociarse al desarrollo de normativa y códigos de fabricación, que establecen criterios de diseño y validación para su correcta aplicación. En el caso de FSW, se destacan dos documentos. En primer lugar, la norma AWS D17.3/D17.3M "Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications", cuya primera es del año 2010, seguida por otra del 2016 [1]. En segundo lugar, la norma ISO 25239, "Friction stir welding – Aluminium", la cual presenta cinco partes y su primera versión es del año 2011 [2]. Ambas normas son para soldadura por FSW de aleaciones de aluminio. Si bien la AWS D17.3 tiene un alcance definido para aplicaciones aeroespaciales, en realidad brinda lineamientos que pueden aplicarse en otras industrias. Cabe notar que ambas normas tienen versiones recientes, del 2021 y 2020, respectivamente, considerando en este trabajo las ediciones previas.

Las publicaciones sobre el estudio de este proceso se han realizado con diferentes objetivos, asociados a la comprensión y optimización del mismo y a la caracterización de las uniones obtenidas. Los criterios de las normas mencionadas no son usualmente aplicados en las uniones analizadas en estas publicaciones. Sin embargo, es importante verificar como condiciones mínimas los requerimientos de estas normas, en primer

lugar, para favorecer la aplicación de esta tecnología y en segundo para aportar información que enriquezca la discusión de dichos requerimientos [3].

## **OBJETIVOS**

Analizar comparativamente ambos documentos, presentando y discutiendo sus coincidencias y diferencias. Analizar, a la luz de estos documentos, diversos procedimientos de soldadura desarrollados por estos autores, para uniones soldadas por FSW de distintas aleaciones de aluminio, en el marco de proyectos de investigación de los últimos 10 años.

## **DESARROLLO**

En consecuencia con los objetivos, se analizaron ambas normas comparando los requerimientos para la calificación de procedimientos de soldadura por FSW de uniones a tope. Luego, se aplicaron estos criterios a diversos procedimientos de soldadura desarrollados en los últimos 10 años. El análisis presentado se se presentó en el congreso CADI 2021, el cual además presenta el caso de uniones soldadas a solape [3].

## **RESULTADOS**

Para la calificación de procedimientos de soldadura por FSW de uniones a tope, para ambas normas deben realizarse la inspección visual, examinación macroestructural y ensayos de tracción. Sin embargo, solo para la ISO 25239 es mandatorio realizar ensayos de plegado, estando contemplados en la AWS D17.3 para realizarse si son especificados [3].

La inspección visual y la examinación macroestructural deben realizarse con el fin de evaluar las discontinuidades presentes en la unión soldada [1, 2]. En la Figura 1 se muestra un esquema con las discontinuidades más relevantes en FSW: la penetración incompleta (pi), la indentación (h, underfill) y las cavidades internas, indicándose su dimensión máxima en la sección transversal (d). También se indica la

zona agitada (WN), el espesor del material base (t) y el espesor de la WN (s).

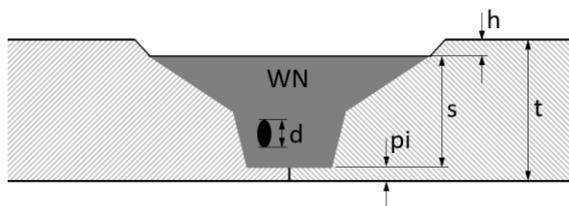


Figura 1: Discontinuidades más relevantes en FSW [3]

En la Tabla 1 se muestran los límites de aceptación establecidos para las discontinuidades más relevantes [1, 2]. Para el caso de la indentación y las cavidades, la AWS D17.3 establece una clasificación de tres clases con diferentes límites de aceptación. Puede observarse que en este punto la norma AWS D17.3 es más exigente que la ISO 25239 [3].

Tabla 1: Límites de aceptación para las discontinuidades más relevantes.

	AWS D17.3	ISO 25239
Fisuras	No permitidas	No permitidas
Penetración Incompleta	No permitida (salvo especificación)	No permitida
Indentación (Underfill)	$h < 0,05t$ (Clase A); $h < 0,075t$ (Clase B); $h < 0,10t$ (Clase C).	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1t$ (para $t \geq 2 \text{ mm}$ ); $h \leq 0,15t$ (para $t < 2 \text{ mm}$ ).
Cavidades	No permitidas (Clase A y B); Se rechazan cavidades abiertas a la superficie (Clase C).	$d \leq 0,2s$ o $4 \text{ mm}$ (la que sea menor).

En relación a la resistencia a la tracción, ambas normas establecen los mismos requerimientos de eficiencia de junta, aunque existen algunas diferencias. En la tabla 2 se muestra la eficiencia requerida de acuerdo al tipo de material, condición (temple) del material base y condición post-soldadura de la unión: como soldada (AW), envejecimiento natural (EN) y envejecimiento artificial (EA) [1, 2].

Tabla 2: Eficiencia de junta requerida.

	Condición (temple) del material base	Condición post-soldadura	$f_e$
Aluminio Puro y Aleaciones No Termotratables	Todas las condiciones	AW	1,0
Aleaciones Termotratables	T4 y T6	EN y EA	0,7
		EN	0,6
		EA	0,7

Los ensayos de plegado son mandatorios solo para la ISO 25239. Las probetas ensayadas no deben mostrar ninguna fisura mayor a 3 milímetros. El objetivo del ensayo de plegado es exponer discontinuidades, no demostrar la ductilidad del material, por lo que el resultado de estos ensayos para aleaciones de baja ductilidad puede ser cuestionable, lo que podría estar asociado a que la AWS D17.3 no establezca la obligatoriedad de los mismos [3].

En la Tabla 3 se muestra si los procedimientos desarrollados para distintas variantes del proceso, aleaciones y espesores pueden considerarse calificados.

Tabla 3: Calificación de Procedimientos de Soldadura.

	Material Base	AWS	ISO
FSW Convencional	AA5052-H32 (3 mm)	No	Sí
	AA6061-T6 (3 mm)	Clase A	Sí
	AA7075-T651 (4 mm)	Clase A	-
	AA5052-H32 (3 mm) / AA6061-T6 (3 mm)	Clase B	Sí
BT-FSW	AA1050-H14 (4 mm)	Clase A	Sí
	AA6063-T6 (3 mm)	No	Sí
$\mu$ FSW	AA5052-H32 (1 mm)	Clase C	Sí

Todos los procedimientos analizados podrían calificarse por al menos una de las normas consideradas, debido a que todas las uniones cumplen el requerimiento de eficiencia de junta. Para dos tipos de uniones, no se pudo alcanzar el límite para la indentación de acuerdo con la AWS D17.3, lo cual se podría mejorar optimizando la herramienta FSW utilizada. En general, se verificó el requerimiento de los ensayos de plegado. Solo para el caso de las uniones de AA7075-T651 los ensayos de plegado por flexión en tres puntos no se implementaron debido a la baja ductilidad del material base. Sin embargo, para futuros trabajos este aspecto podría resolverse implementando el plegado por rodillo guiado.

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de los criterios de las normas analizadas al desarrollo de procedimientos de soldadura FSW en el marco de proyectos de investigación favorece la transferencia de los mismos y la discusión de los requerimientos.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AWS D17.3/D17.3M. "Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications". American Welding Society, 2016.
- [2] ISO 25239. "Friction stir welding – Aluminium". International Organization for Standardization, 2011.
- [3] Tufaro, L.N.; Svoboda, H.G. "Calificación de procedimientos de soldadura por fricción agitación de aleaciones de aluminio". CADI 2021 - 5º Congreso Argentino de Ingeniería. CABA, 2021.