

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) en Aleaciones de  
Aluminio 7075**

**Proyecto de Investigación**

**Ramiro David Pérez Enriquez**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 27 de abril de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) en Aleaciones de Aluminio 7075**

**Ramiro David Pérez Enriquez**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Edison Bonifaz Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 27 de abril de 2018

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Ramiro David Pérez Enriquez

Código:

00116951

Cédula de Identidad:

1717399420

Lugar y fecha:

Quito, 27 de abril de 2018

## RESUMEN

Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) es un proceso de unión en estado sólido relativamente nuevo, usado principalmente en la industria de manufactura por sus grandes beneficios al unir materiales difíciles de soldar convencionalmente. Los parámetros del proceso como: velocidad de avance, velocidad angular y fuerza axial desempeñan un rol crítico en las características de la junta soldada. La presente investigación utilizó una subrutina DFLUX en ABAQUS para representar el flujo de calor generado por la interacción entre la herramienta de acero AISI H13 y placas de aluminio 7075. Se comparó los resultados de temperatura máxima y ciclos térmicos teóricos con los experimentales mediante termocuplas. Se determinó las propiedades mecánicas (Esfuerzo de fluencia, esfuerzo último en tensión, dureza) y microestructura de la junta soldada. Se obtuvo que aproximadamente la resistencia máxima en tensión de la soldadura es del 90 por ciento de la resistencia del material base sin ningún post tratamiento térmico.

Palabras clave: Soldadura por Fricción; Simulación Numérica; Microestructura; Propiedades Mecánicas; Aleación Al 7075.

## ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new solid-state join process used the Manufacturing industries to weld materials that are difficult to be joined with conventional techniques. The welding parameters such as: welding speed, angular velocity and axial force play a critical role in the characteristics of the welded joint. This research used the DFLUX-ABAQUS subroutine constructed in a previous work, to capture the heat flux generated by the interaction between the tool and the plate. The tool was made of steel AISI H13 and the plate is aluminum 7075. Numerical peak temperatures and numerical thermal cycles were compared with experimental values obtained by thermocouples. Yield strength, ultimate tensile strength, hardness and microstructure of the joint were experimentally established, and it was found that the ultimate tensile strength of the weld is approximately 90 percent of the base material yield strength.

*Key words:* Friction Stir Welding (FSW), Numerical Simulations, Microstructures, Mechanical Properties, Al 7075 Alloy.

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Desarrollo del Tema .....</b>	<b>14</b>
2.1 Materiales: .....	14
2.2 Simulación de elementos finitos: .....	14
2.3 Herramienta, Placa Metálica y Equipo Experimental utilizado .....	16
<b>3. Resultados Y discusión .....</b>	<b>20</b>
3.1 Ciclos térmicos.....	20
3.2 Macro y Microestructura .....	29
3.3 Propiedades Mecánicas.....	33
<b>Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo A: Plano de taller herramienta FSW .....</b>	<b>40</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Datos usados para la simulación y experimentación .....	15
Tabla 2.- Temperaturas pico obtenidas mediante simulación y experimentación .....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de Friction Stir Welding (FSW) tomado de (Mishra & Ma, 2005) .....	11
Figura 2.- Esquema Posición Junta Soldada .....	17
Figura 3.- Posicionamiento de termocuplas .....	18
Figura 4.- Medidas para ensayo de tracción .....	18
Figura 5.- Esquema de cortes de probetas en agua para ensayos de tracción y micrografía ...	19
Figura 6.- Resultados experimentales y numéricos a 2 mm de la superficie superior.....	22
Figura 7.- Resultados termocupla a 3 mm de la superficie vs simulación.....	23
Figura 8.- Resultados termocupla a 2 mm de la superficie vs simulación.....	24
Figura 9.- Resultados experimentales y numéricos a 3 mm de la superficie superior.....	25
Figura 10.- Fotografía reverso junta soldada experimento 1 .....	25
Figura 11.- Defecto (delaminación) experimento 1 .....	26
Figura 12.- Posicionamiento placa de soporte con termocuplas incluidas, a) Placas a soldar sin placa de soporte, b) Placas a soldar junto con la placa de soporte .....	27
Figura 13.- Corte seccional correspondiente al experimento 2.....	27
Figura 14.- Corte seccional Y-X Simulado (Parámetros: ver tabla 2).....	28
Figura 15.- Corte transversal Y-Z Simulado (Parámetros: ver tabla 2).....	29
Figura 16.- Macro y microestructuras de sección transversal, perpendicular a la dirección de soldadura .....	31
Figura 17.- Micrografía SEM - "Retreating side" .....	32
Figura 18.- Micrografías SEM - "Advancing side" .....	32
Figura 19.- Perfil de Dureza.....	33
Figura 20.- Ensayo de Tracción: a) Probeta montada en la maquina universal, b) Acercamiento en la zona de ruptura de la probeta .....	34
Figura 21.- Fotografía de la junta soldada con aumento 5X.....	35
Figura 22.- Curvas esfuerzo - deformación para cada ensayo de tracción .....	36



# 1. INTRODUCCIÓN

Obtener juntas soldadas por fusión de alta resistencia en aleaciones de aluminio ha sido muy complicado a nivel industrial, debido a la gran cantidad de factores que se debe controlar. Algunos de esos factores son:

1) Preparación de la superficie: no debe existir óxido de aluminio en la superficie a soldar ya que esto impide una buena fusión entre el material base y el material de aporte.

2) Tratamiento térmico: Los ciclos térmicos deben ser controlados con pre y post tratamientos térmicos para evitar altos niveles de esfuerzo residuales. En muchos casos, por las dimensiones del conjunto soldado no es posible realizar un tratamiento térmico adecuado resultando así en componentes o estructuras mecánicas que no soportan altos niveles de esfuerzo.

3) La selección adecuada de corriente y voltaje: dependen principalmente del tipo de aleación y del espesor de la junta.

4) El flujo del gas inerte, velocidad de avance, longitud de arco son otros de los parámetros que deben ser cuidadosamente controlados para obtener una buena calidad de soldadura por fusión.

Al final, todos los parámetros que se controlan aumentan significativamente el costo de producción, provocando de esta manera que el uso de soldadura por fusión para aleaciones de aluminio sea poco utilizado (Mishra & Ma, 2005).

Por otro lado, la necesidad de diseñar y manufacturar estructuras más ligeras de lo convencional lleva inmersa la necesidad de utilizar materiales con densidades bajas pero que a la vez tengan una alta resistencia. Un ejemplo es el Aluminio, que tiene cerca de un tercio de la densidad del Acero, dependiendo de su aleación y procesamiento puede tener la misma resistencia del Acero e incluso superarla. Es por esta razón que el desarrollo de procesos de soldadura en estado sólido es muy importante, ya que se puede obtener juntas soldadas con

excelentes propiedades mecánicas, libres de defectos, con esfuerzos residuales bajos y a un costo relativamente bajo.

Soldadura por Fricción- Revolución (FSW) es uno de los procesos de soldadura en estado sólido, de hecho es considerado el avance más significativo en cuanto a uniones permanentes (soldadura) en la década (Mishra & Ma, 2005). Esta tecnología es denominada verde debido a muchos factores. Por ejemplo, su eficiencia energética, este proceso se utiliza únicamente la cantidad de energía necesaria para que el material alcance una temperatura determinada a la cual dos materiales se puedan soldar. A diferencia de la soldadura por fusión donde el gasto energético es mayor debido a que se debe alcanzar una temperatura superior al punto de fusión del material que se está soldando. Asimismo, se considera a este proceso amigable con el medio ambiente puesto que no utiliza ningún tipo de gas de protección (Mishra & Ma, 2005).

Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido relativamente nuevo inventado por The Welding Institute (TWI) en 1991. Este proceso ha sido muy efectivo en unir metales que son difíciles de soldar o en uniones de diferentes espesores o con diferentes materiales. Como se aprecia en la Fig. 1, una herramienta rotativa no consumible con un pin especialmente diseñado y un cilindro de mayor diámetro que el pin, llamado shoulder (Fig. 1), son insertados en los bordes colindantes de los materiales a ser soldados mientras giran a una determinada velocidad angular. Dicha herramienta cumple con dos funciones: primero, calienta el material a soldar y segundo, induce el movimiento de pequeñas fracciones del material base para formar la junta soldada. El pin penetra el espesor de los materiales en su totalidad o el 95 por ciento del espesor de las placas a soldar. El shoulder de la herramienta queda rasante con la superficie del material a soldar, generando así calor por la fricción entre la cara inferior del shoulder con la cara superior de las placas. Cuando se haya

alcanzado una determinada temperatura, suficiente como para que la deformación plástica sea más fácil de conseguir sin incrementar de forma drástica los esfuerzos en la herramienta, ésta avanza axialmente a lo largo de la línea de unión de soldadura. El calor localizado suaviza el material de los alrededores y junto con el movimiento angular y axial de la herramienta se arrastra material de un lado de una placa hasta el lado contrario de la otra placa. La presión ejercida por el shoulder de la herramienta forja el material arrastrado de forma que al enfriarse se genera una junta soldada libre de defectos (He, Gu, & Ball, 2014).

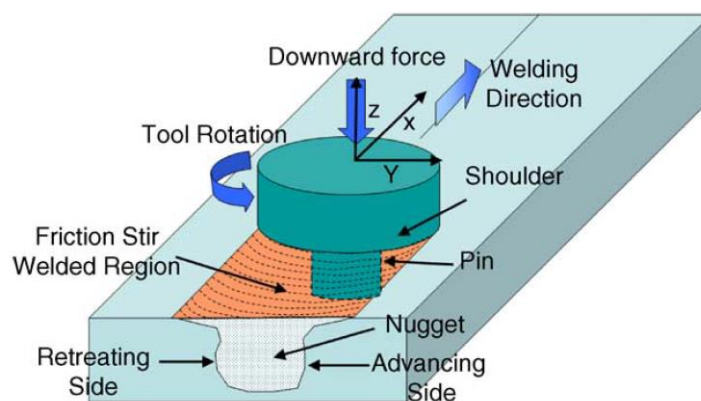


Figura 1: Esquema de Friction Stir Welding (FSW) tomado de (Mishra & Ma, 2005)

FSW es un proceso relativamente fácil de ejecutar; una vez determinados los parámetros específicos para el tipo de junta, material y espesor del mismo, es simplemente poner a punto una maquinaria y dejarla trabajar; no obstante, es más complicado entender el proceso a profundidad y determinar los parámetros correctos. Este proceso involucra varios fenómenos físicos no lineales, algunos de ellos son: grandes deformaciones plásticas a diferentes temperaturas, flujo de material arrastrado, la interacción entre superficies de la herramienta con el material, generación y transferencia de calor, entre otros (He et al., 2014).

El objetivo de esta investigación es validar la expresión de generación de calor propuesta por Bonifaz comparando los ciclos térmicos determinados mediante simulación de elementos finitos con aquellos obtenidos de manera experimental. El modelo térmico

propuesto por Bonifaz (Bonifaz,2017) relaciona los parámetros de: velocidad angular, velocidad de avance y fuerza axial necesarios para el proceso de soldadura por Fricción-Revolución en placas de acero al carbono SAE-AISI 1524. En este trabajo se extiende esa capacidad para la soldadura de placas de Aluminio 7075 . Además, caracterizar las propiedades de la junta soldada mediante el proceso de FSW.

Dentro de todos los parámetros nombrados hay algunos que se destacan por su nivel de influencia en la calidad de la junta soldada, estos son: velocidad angular, velocidad de avance, ángulo de inclinación, profundidad de penetración, tipo de herramienta (diámetros, longitud, forma, paso de rosca, etc.), material y sistema de sujeción (Węglowski, 2018).

Con la investigación numérica y experimental de este proceso de soldadura en estado sólido, se busca determinar los parámetros específicos para una junta a tope que termine en una soldadura de excelente calidad, con buenas propiedades mecánicas, y especialmente, que el esfuerzo de fluencia y el último esfuerzo en tensión sean muy cercanos a los valores del material base. Es importante denotar que los valores antes nombrados sean los resultados de probetas sin post tratamiento térmico. No se realizará ningún tratamiento térmico ni a la herramienta ni a la junta soldada.

Dado la complejidad del proceso, las simulaciones de elementos finitos disminuyen gradualmente el tiempo de experimentación, costo y, adicionalmente, ayudan a predecir la microestructura relacionada directamente con el comportamiento mecánico de la junta soldada (He et al., 2014). La simulación se basa en un modelo matemático que toma en cuenta el flujo de calor generado por la herramienta, con ello se puede determinar el perfil de temperatura y sobre todo, los ciclos térmicos que experimenta el material. La comparación de resultados

numéricos y experimentales determina cuan acertado es un modelo propuesto, a la vez que ayuda a verificar que la temperatura máxima en el material no supere su temperatura de fusión.

En la referencia ( Nelson et al, 2003) se estudió la evolución de la microestructura en varias regiones de la junta de la aleación de aluminio 7075 soldada por fricción; encontrando que la zona dinámicamente recristalizada (DXZ ó Dynamically recrystallized zone) consistía en granos equiaxiales recristalizados de aproximadamente entre 1 a 4  $\mu\text{m}$  de diámetro y contenía una gran densidad de dislocaciones (2003). Sato et. al. concluyeron que en el proceso de soldadura por fricción, la estructura de la soldadura se divide en tres regiones, 1) granos finos recristalizados alrededor de la zona de soldadura, 2) granos gruesos equiaxiales en el material base y 3) granos recuperados entre las dos regiones (1999). Mishra y Ma determinaron los siguientes beneficios metalúrgicos con este proceso de soldadura en estado sólido: baja distorsión en el material, buena estabilidad dimensional y repetibilidad, la inexistencia de pérdida de elementos aleantes, excelente propiedades mecánicas, ausencia de grietas, microestructura de granos finos, entre otros (Mishra & Ma, 2005).

## 2. DESARROLLO DEL TEMA

### 2.1 Materiales:

Placas de aluminio 7075 con dimensiones 206x106x6 [mm] con una dureza promedio de 145 HB. Estas placas luego fueron maquinadas a precisión con la fresadora “Shapeoko 3” a las dimensiones de 200x100x6 [mm] con una tolerancia general de  $\pm 0.1$  [mm]. Acero AISI H13 de 25.4 [mm] de diámetro, con una dureza de fábrica de 45 HRC. Para maquinar el acero se utilizó el torno CNC (PINACHO) de la Universidad San Francisco de Quito. La experimentación del proceso FSW se realizó en la fresadora de cabezal Universal (TOPTECH) de la Universidad San Francisco de Quito.

### 2.2 Simulación de elementos finitos:

La simulación de elementos finitos se realizó utilizando el programa desarrollado en un trabajo previo (Bonifaz, 2017). En este trabajo, una subrutina DFLUX fue construida para ingresar el flujo de calor generado por la interacción entre la herramienta y el material base. Un nuevo modelo térmico dado por la Ec. ( 1) fue propuesto en (Bonifaz, 2017), para cuantificar la cantidad de calor generado proveniente de la fricción entre la herramienta y la placa metálica.

$$q(r) = \frac{2 \eta F \omega \exp \left[ \frac{2\mu}{h_w} (R_{sh} - r) \right]}{60 (R_{sh}^2 - R_{pin}^2)} r \quad (1)$$

Aquí  $q(r)$  representa el flujo de calor en  $[W/mm^2]$ ,  $F$  es la fuerza axial aplicada sobre la herramienta en  $[N]$ ,  $\omega$  es la velocidad angular en  $[rpm]$ ,  $\mu$  es el coeficiente de fricción,  $h_w$  es el espesor del material a soldar en  $[mm]$ ,  $R_{sh}$  es el radio del shoulder de la herramienta,  $R_{pin}$  es el radio del pin,  $r$  es la distancia desde el eje de rotación de la herramienta al punto donde se desea

calcular el flujo de calor,  $\eta$  es la eficiencia del proceso que toma en cuenta la cantidad de energía mecánica transformada a calor ( $\eta_m$ ) y el porcentaje de calor que se transfiere de la herramienta a las placas de aluminio ( $\eta_h$ ). Esta relación está representada por las siguientes fórmulas propuestas por Nandan (Nandan et. al., 2007)

$$\eta = \eta_h \eta_m \quad (2)$$

$$\eta_h = \frac{[(k \rho c)_w]^{1/2}}{[(k \rho c)_w]^{1/2} + [(k \rho c)_T]^{1/2}} \quad (3)$$

donde  $k$  es la conductividad térmica [W/ m K],  $\rho$  es la densidad [kg/m<sup>3</sup>],  $c$  es el calor específico [J/kg K] y los subíndices  $w$  y  $T$  se refieren a “workpiece” y “tool” respectivamente, indicando así que se utilizan las propiedades físicas ya sea del material base o de la herramienta para determinar la eficiencia térmica del proceso. En la tabla #1 se observan las propiedades físicas utilizadas en esta investigación para el Aluminio y para el Acero.

Tabla 1.- Datos usados para la simulación y experimentación

Propiedad/ Parámetro	Valor	Referencia
Conductividad térmica Acero H13 ( $k_T$ ) a To	25 W/m K	(Bohler Uddeholm, 2013)
Conductividad térmica Al 7075 ( $k_w$ ) a To	130 W/m K	(ASM International Handbook Committee, 2001)
Densidad Acero H13 ( $\rho_T$ ) a To	7800 Kg/m <sup>3</sup>	(Bohler Uddeholm, 2013)
Densidad Al 7075 ( $\rho_w$ ) a To	2800 Kg/m <sup>3</sup>	(ASM International Handbook Committee, 2001)
Calor específico Acero H13 ( $c_T$ ) a To	460 J/Kg K	(ASM International Handbook Committee, 1990)
Calor específico Al 7075 ( $c_w$ ) a To	960 J/Kg K	(ASM International Handbook Committee, 2001)
Eficiencia mecánica ( $\eta_m$ )	0.5	(Nandan et.al, 2008)
Eficiencia térmica ( $\eta_h$ )	0.664	
To (Temperatura ambiente)	20 °C	
Espesor placa a soldar Al 7075 ( $h_w$ )	6 mm	
Radio shoulder (Rsh)	9 mm	
Radio pin (Rpin)	3 mm	
Velocidad de avance ( $v$ )	0.433 mm/s	
Velocidad angular ( $\omega$ )	1110 rpm	
Coefficiente de fricción ( $\mu$ )	0.46	(Sonora, 2013)
Presión Axial ( $P_o$ )	6.6 MPa	
Coefficiente de transferencia de calor superficie superior	10 W/m <sup>2</sup> K	

Coefficiente de transferencia de calor superficie inferior	80 W/m <sup>2</sup> K	
Emisividad a To de Al 7075	0.09	(Incropera, 2011)

Esta subrutina dependió de la geometría de la herramienta por lo que la variación de estos parámetros junto con la velocidad de avance, velocidad angular y presión permitieron llegar a una selección de parámetros de FSW que no sobrepasen la temperatura de fusión del material base.

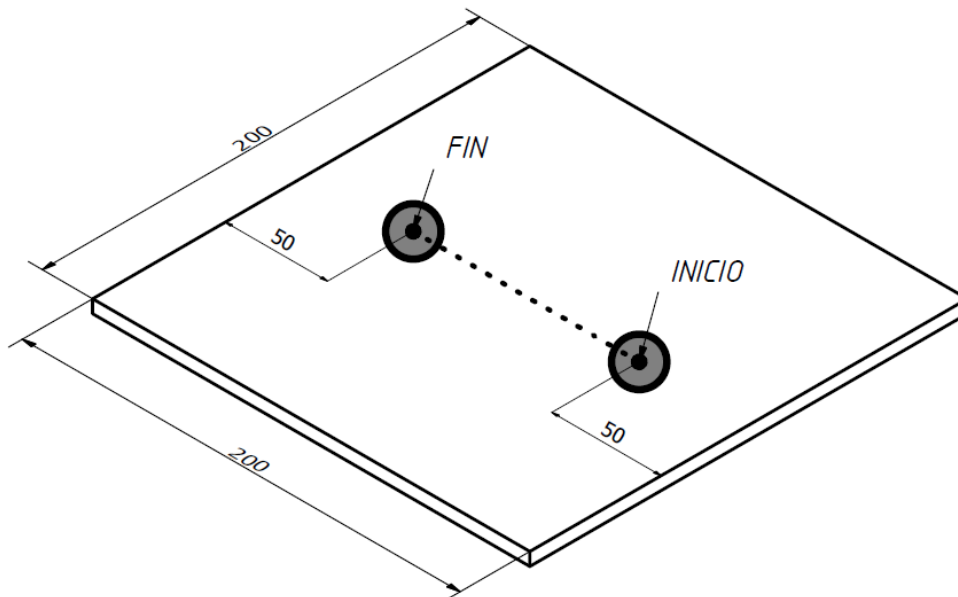
### *2.3 Herramienta, Placa Metálica y Equipo Experimental utilizado*

La herramienta rotativa se fabricó en la Universidad San Francisco de Quito de acero AISI H13 de una barra sólida de 25.4 mm de diámetro, se la maquinó en un torno CNC con insertos de carburo de tungsteno hasta llegar a las dimensiones determinadas (ver anexo A). La herramienta está formada por dos partes: 1) Shoulder: pieza de diámetro mayor con un agujero roscado, y, 2) Pin: pieza roscada de 1/3 de diámetro del shoulder. El diámetro del shoulder se determinó en el punto anterior mediante simulación, este diámetro es de 18 mm. La rosca del agujero se realizó con un machuelo M6 con paso de 1 mm y la rosca del pin se la mecanizó con el torno CNC e insertos de carburo de tungsteno de la misma dimensión que el roscado del agujero.

Dos placas de Aluminio de 200 x 100 x 6 [mm] se posicionaron de tal manera que el lado de dimensión 200 mm queden colindantes, sin ningún espacio intermedio, la dimensión de la junta soldada fue al finalizar de 200 x 200 x 6 [mm]. La sujeción de las dos placas es de vital importancia para la ejecución de una buena soldadura mediante este proceso; las dos placas aparte de estar sujetas a la mesa de trabajo de la fresadora vertical se apoyaron sobre

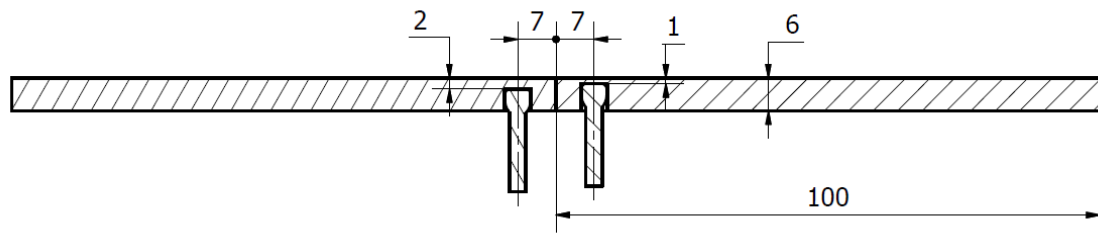


una placa del mismo material para evitar que la presión de la herramienta doble por completo las placas que se soldaron.



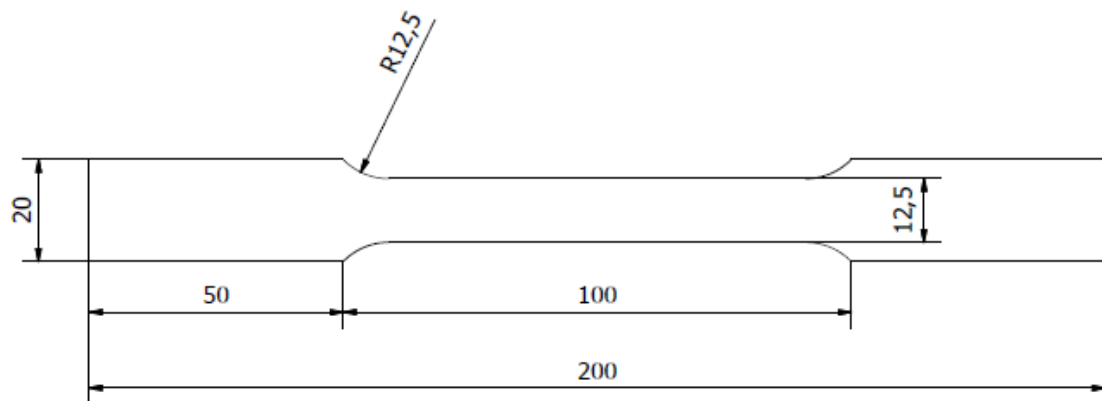
*Figura 2.- Esquema Posición Junta Soldada*

Se usaron termocuplas tipo k para obtener los valores experimentales de temperatura vs. Tiempo. Cerca de la línea de soldadura se maquinaron dos agujeros de 4.8 [mm] de diámetro y se colocaron dentro de ellas las termocuplas a presión y se selló el agujero con silicón de alta temperatura denominado “GREY 999 GASKET MAKER”. Los dos agujeros de las termocuplas se posicionaron a: 7 mm de la línea de soldadura, 100 mm del borde y, a 1 mm y 2 mm de la superficie, como se muestra en la Fig. 3. La fresadora vertical se configuró con los parámetros determinados de velocidad de avance y velocidad angular. La longitud total de soldadura fue de 100 [mm], es decir que el comienzo de la junta soldada comenzó a 50 [mm] del borde de la placa y terminó aproximadamente a 50 [mm] del extremo opuesto como se muestra en la fig. (2).

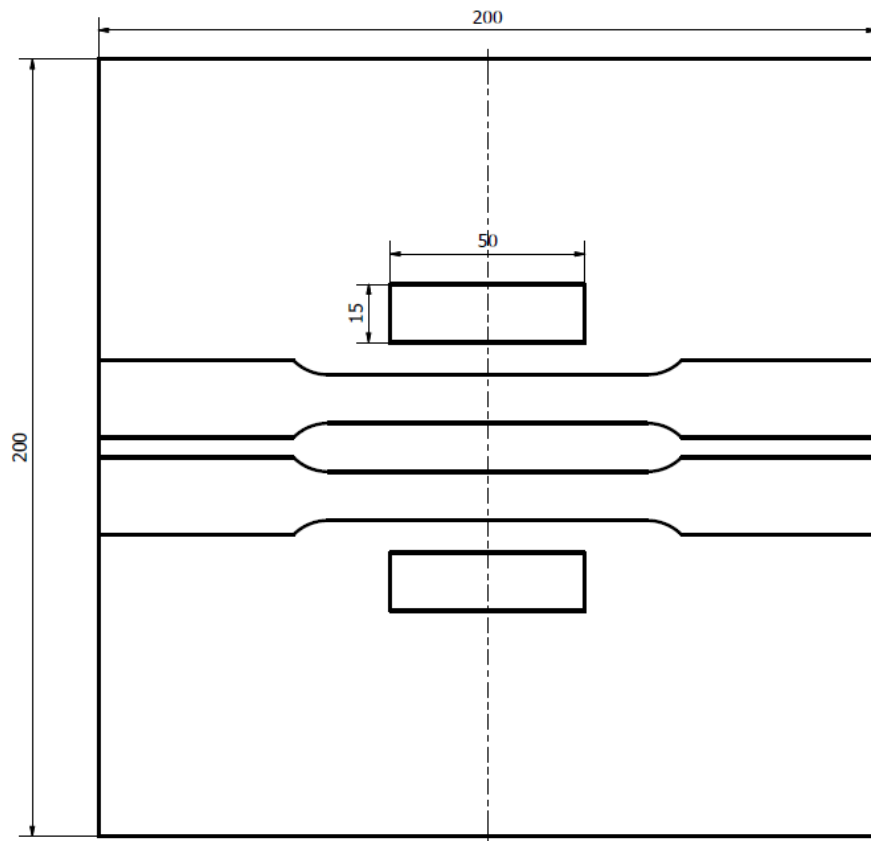


*Figura 3.- Posicionamiento de termocuplas*

De la junta soldada, utilizando el proceso de corte con agua (wáter jet) se obtuvieron probetas de dimensiones mostradas en la Fig. 4. Se cortó 2 probetas de la junta soldada para ensayos de tracción y 2 secciones transversales para micrografías como se muestra en la Fig. 5



*Figura 4.- Medidas para ensayo de tracción*



*Figura 5.- Esquema de cortes de probetas en agua para ensayos de tracción y micrografía*

Los ensayos destructivos de tracción se realizaron en la Máquina de Tracción Universal TINIUS OLSEN en concordancia con lo estipulado en la norma ASTM E8 a una velocidad de 0.015 mm/mm/min (ASTM Int., 2009) . De igual manera, se cortó pequeños trozos de sección transversal para el análisis metalográfico, se analizó la microestructura generada en el microscopio óptico luego del ataque químico. Se midió el tamaño de grano de las diferentes regiones de soldadura con el programa ImageJ y posteriormente se analizó la microestructura en profundidad con el microscopio electrónico de barrido (SEM).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Ciclos térmicos

Es bien conocido que los ciclos térmicos en cualquier método de soldadura, ya sea por fusión o en estado sólido, determinan las propiedades mecánicas de la junta soldada. Usualmente las propiedades más afectadas son la resistencia a la fluencia, resistencia máxima en tensión, dureza y ductilidad.

Se realizó 2 experimentos con las mismas variables antes mencionadas en la tabla #1. Del primer experimento se extrajo información de las dos termocuplas montadas a 2 y 3 [mm] de la superficie para graficar el ciclo térmico experimental. En la figura 6 y 7, se muestra los gráficos de los ciclos térmicos simulados en ABAQUS con la subrutina propuesta anteriormente y las temperaturas registradas experimentalmente para cada termocupla. Éstas figuras presentan pequeñas diferencias entre la realidad y la simulación. En cuanto a temperaturas máximas el error porcentual es del 1.6% para la termocupla que estuvo 2 mm por debajo de la superficie y del 1.7% para la termocupla que estuvo a 1 mm de la superficie superior (Tabla 2). Asimismo, la diferencia entre los datos experimentales y la simulación en los primeros 140 segundos se debe a que el proceso de soldadura en la realidad comienza con la penetración del pin hasta que tope el shoulder con la superficie superior de la placa de aluminio. Este paso del proceso desprende virutas y genera una pequeña cantidad de calor, en cambio, en la simulación se considera que la herramienta comienza topando directamente el shoulder de la herramienta con la superficie del aluminio.

Tabla 2.- Temperaturas pico obtenidas mediante simulación y experimentación

	T1- Experimental (1)	E: 29747
Temperatura máxima [°C]	258	262.1
Error	1.6%	
	T2- Experimental (1)	E:29647
Temperatura máxima [°C]	253	257.3
Error	1.7%	
	T1- Experimental (2)	E:29747
Temperatura máxima [°C]	240.5	262.1
Error	9.0%	
	T2- Experimental (2)	E:29847
Temperatura máxima [°C]	269.185	277
Error	2.9%	

Por otro lado, es importante destacar que la experimentación se realizó de manera semi-automática; es decir, la velocidad de avance y velocidad angular son preestablecidas por el fabricante, pero es necesario que un operador manipule algunos controles manualmente.

En las Fig. 6 y 7 en los primeros segundos se observa un cambio de pendiente en la curva de la realidad porque toma unos pocos segundos cambiar el avance vertical de la herramienta del paso de la inserción de la herramienta en el Aluminio a un avance horizontal, esos segundos se ven reflejados en una disminución en la tasa de calor generado, que luego se compensa cuando ya se activa el movimiento horizontal.

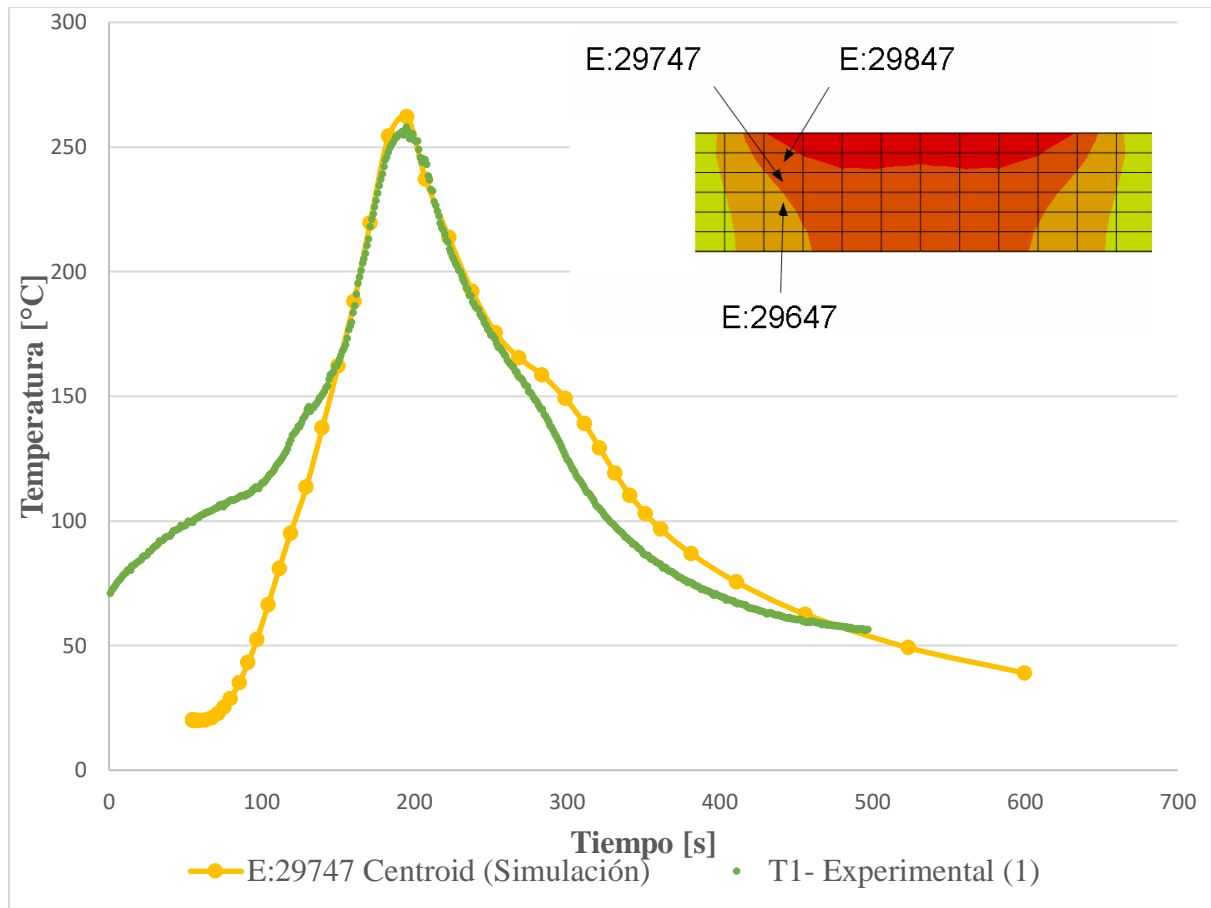


Figura 6.-Resultados experimentales y numéricos a 2 mm de la superficie superior.

Es preciso destacar que las figuras 6 y 7 fueron tomadas en el experimento número 1 y las figuras 8 y 9 fueron registradas en el experimento número 2. En el experimento 1 ocurrió muchos detalles que sirvieron para mejorar la ejecución del experimento 2. Primero, el paso de inserción de la herramienta en la placa de aluminio fue realizado muy lentamente, de ahí el aumento relativamente lento en la temperatura; de igual manera, al cambiar el avance vertical a horizontal en la fresadora tomo mucho tiempo y por ello se nota más pronunciado la disminución de la tasa de calor suministrada entre los 50 y 130 segundos de las figuras 6 y 7.

El error porcentual en cuanto a temperaturas máximas simuladas se muestra en la tabla #2 con las respectivas temperaturas máximas registradas para cada termocupla con respecto a cada experimento.

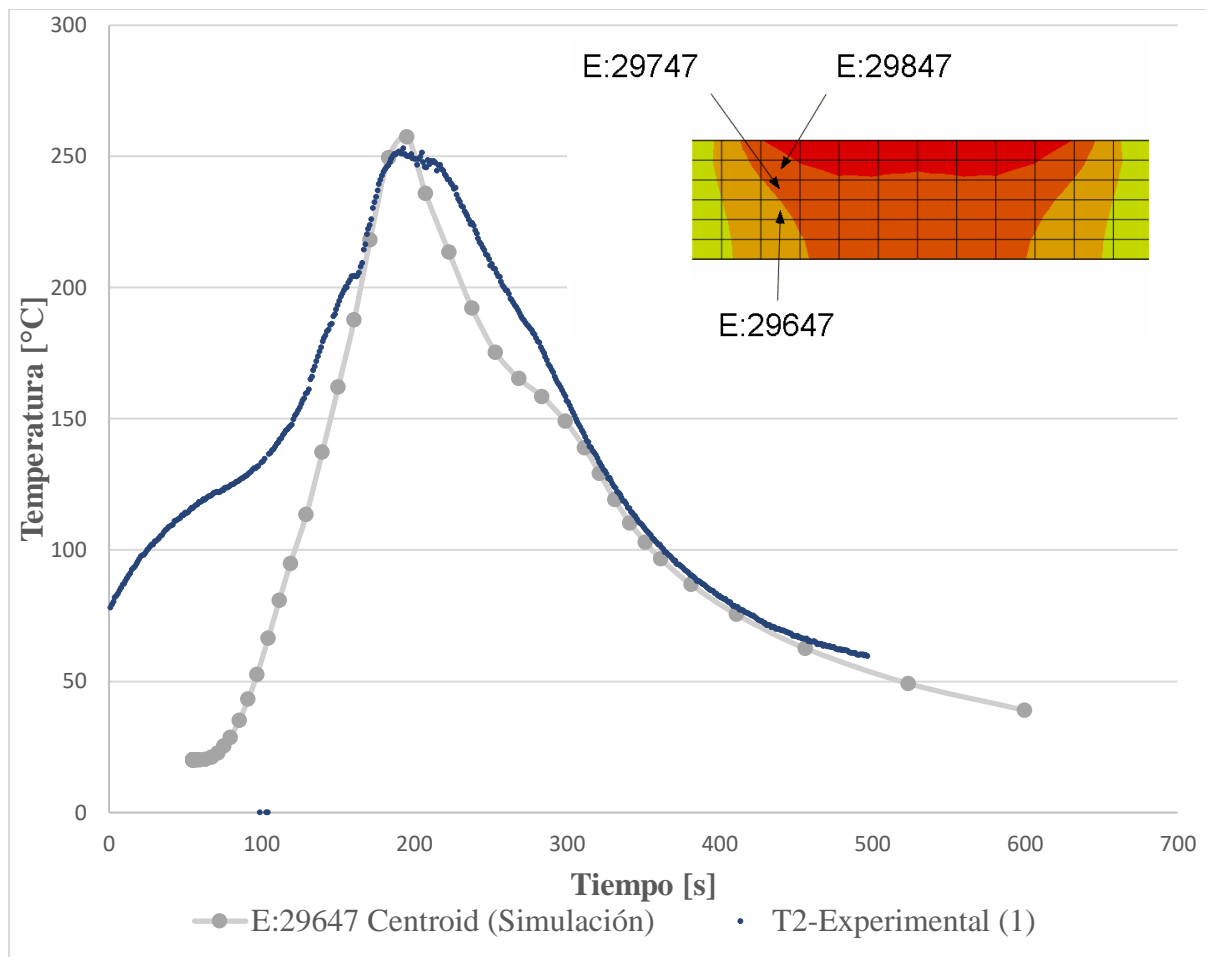


Figura 7.- Resultados termocupla a 3 mm de la superficie vs simulación

En la anterior figura la diferencia entre la simulación y la realidad entre los 240 y 330 segundos, se cree que se debió a un incorrecto posicionamiento de la termocupla, el agujero de la termocupla estuvo muy grande y se lo rellenó con el silicón de alta resistencia; por consiguiente, la termocupla no registro con alta precisión las temperaturas.

Del experimento 1 se aprendió que es necesario una placa de soporte para evitar una deformación permanente debajo de la línea de soldadura. En la figura 10 se evidencia la parte posterior de la junta soldada del experimento 1. Claramente se observa como el pin de la herramienta al no tener una placa de soporte justo por debajo de la línea de unión de cierta manera delaminó el material, y no se logró una penetración completa debido a ello, como se observa en la Fig. 11.

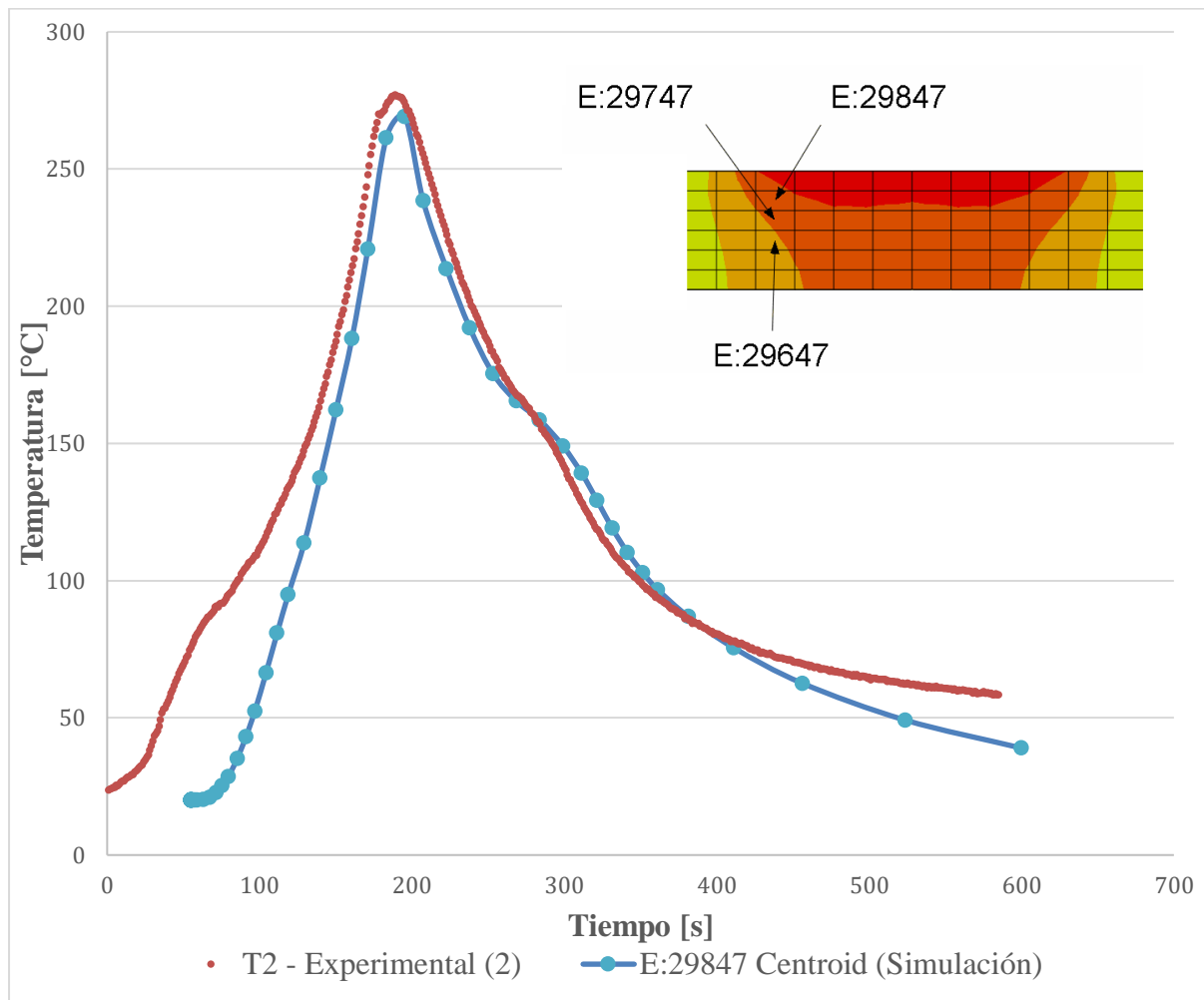


Figura 8.- Resultados termocupla a 2 mm de la superficie vs simulación

Sin embargo, continuando con los ciclos térmicos de la fig. 8 y 9 se puede observar que las curvas son muy idénticas hasta los 400 segundos, donde se cree que el coeficiente de convección en la realidad cambia debido a una disminución de la temperatura de la superficie; mientras que en la simulación se utilizó un coeficiente de transferencia de calor constante. En otras palabras, el enfriamiento acelerado a partir de los 400 segundos en la simulación se debe a que se utilizó un coeficiente de transferencia de calor constante de  $80 \text{ [W/ m}^2 \text{ K]}$ , mientras que en la realidad este coeficiente si es del valor mencionado a altas temperaturas, pero al disminuir la temperatura dicho valor disminuiría, y por ello la tasa de enfriamiento en la realidad es menor.



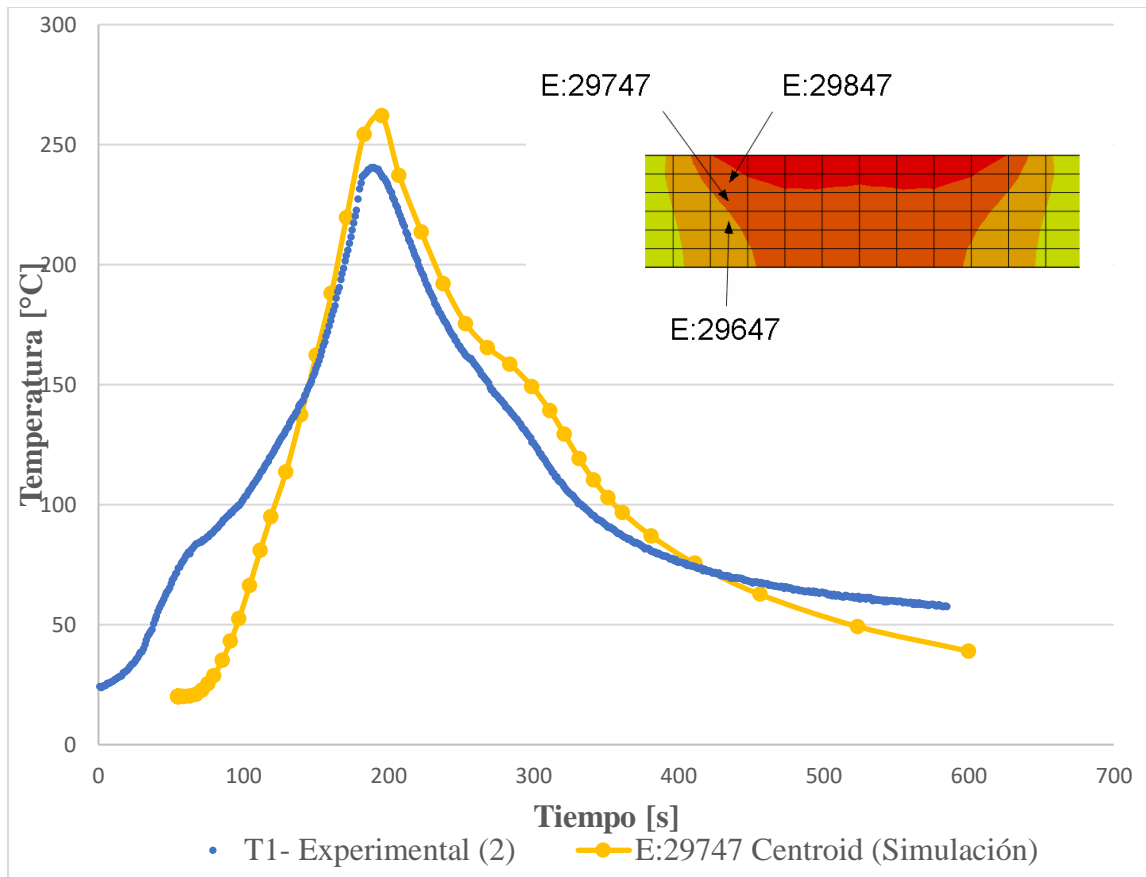


Figura 9.- Resultados experimentales y numéricos a 3 mm de la superficie superior.

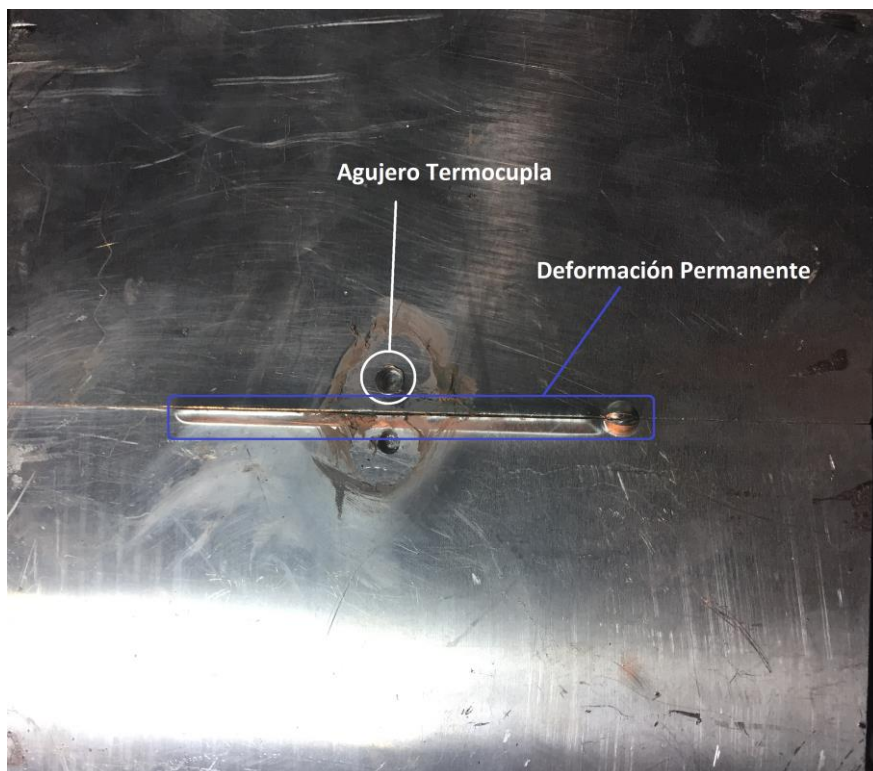
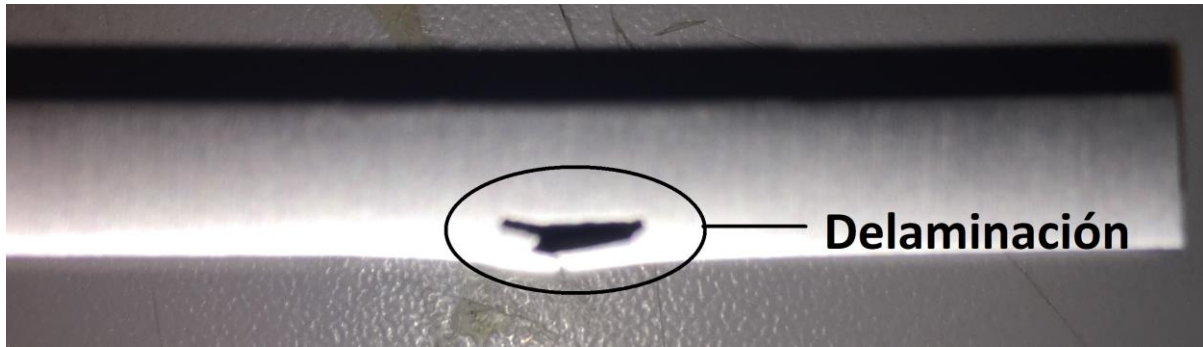
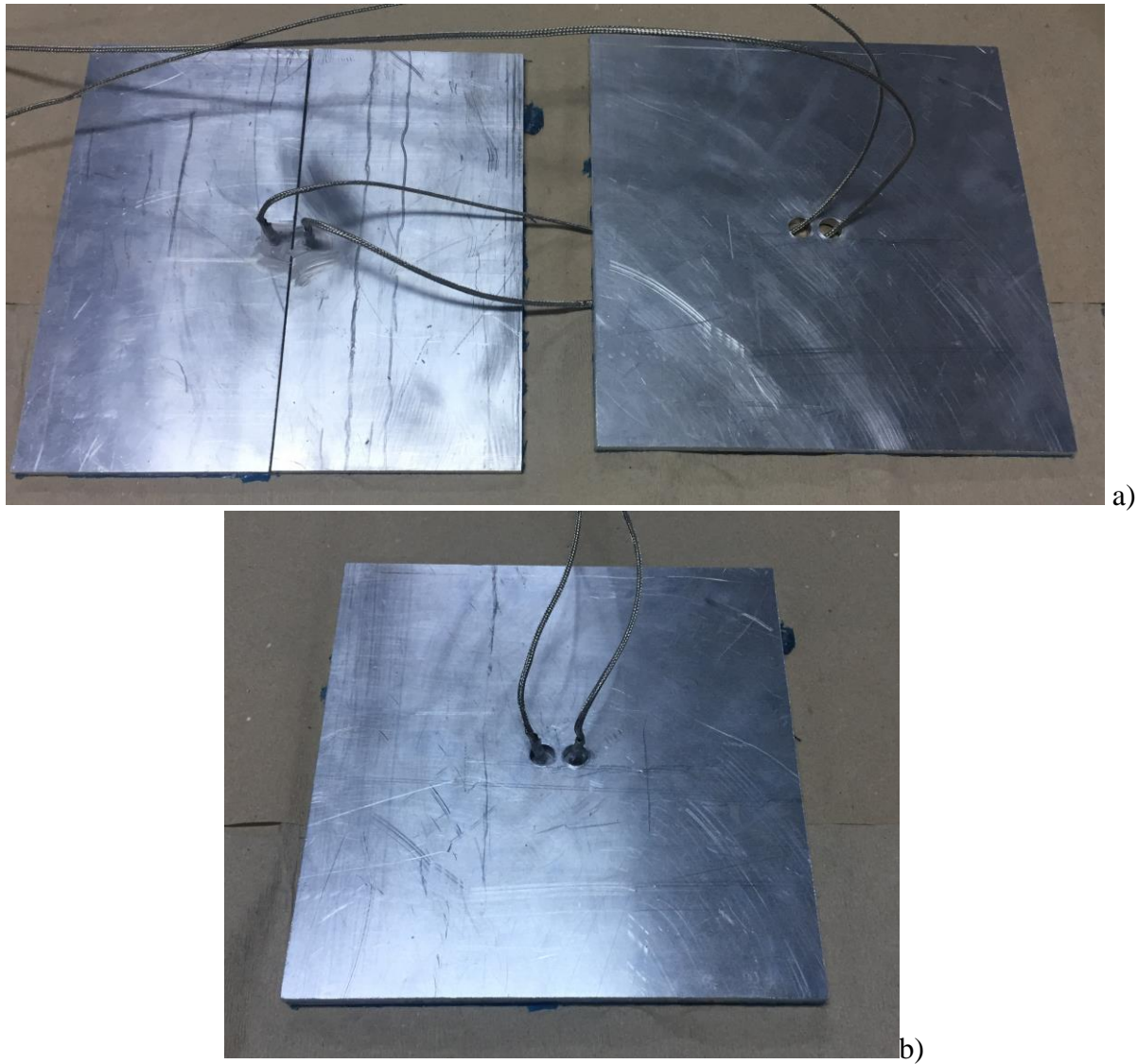


Figura 10.- Fotografía reverso junta soldada experimento 1

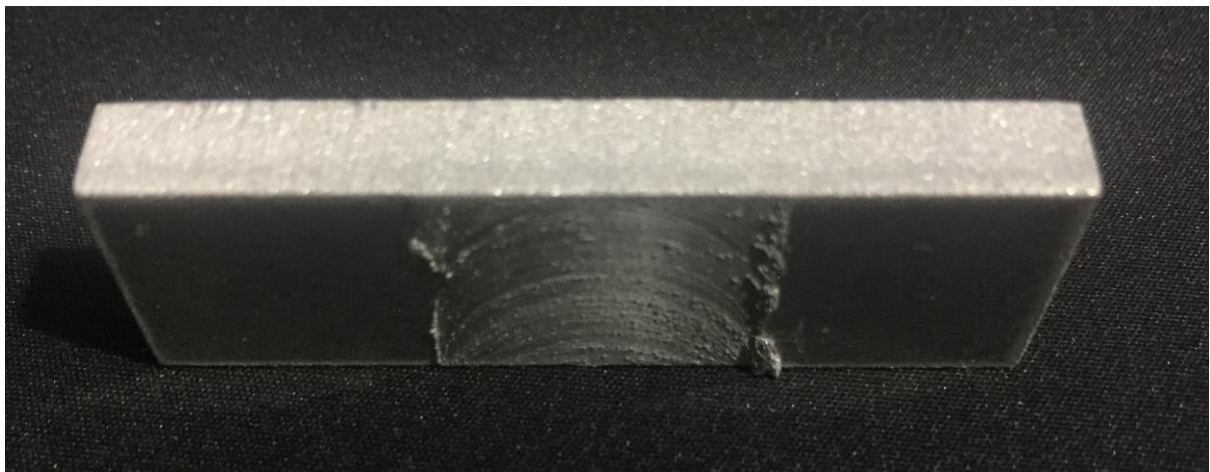


*Figura 11.- Defecto (delaminación) experimento 1*

Para el experimento 2, se maquinó una placa de 200x200x6 [mm] con una tolerancia general de  $\pm 0.1$  mm y dos agujeros de 10 mm de diámetro justo en la posición donde irían las termocuplas con la finalidad de proporcionar soporte bajo la línea de unión, Fig.(12). Con ello se consiguió que exista penetración completa como se demuestra en la figura 13; no obstante, en el otro corte seccional del experimento 2 se encontró penetración incompleta en ciertos puntos. Probablemente el roscado del pin se saturó de material y por ende dejó en ciertos puntos huecos.



*Figura 12.- Posicionamiento placa de soporte con termocuplas incluidas, a) Placas a soldar sin placa de soporte, b) Placas a soldar junto con la placa de soporte*



*Figura 13.- Corte seccional correspondiente al experimento 2*

La figura 14 y 15 registran una parte de la simulación de soldadura por fricción revolución. Esta figura presenta las relativamente altas temperaturas dentro del área de presión de la herramienta. Al realizar un corte seccional, un corte Y-X donde Z es el eje donde avanza la soldadura (Fig.14) se puede denotar como la mayoría del calor generado esta únicamente bajo la zona donde se ejerce presión y se puede decir que el perfil de temperaturas generado es relativamente simétrico. En la Fig. 15, corte transversal de la junta, claramente es visible la generación de calor por parte del shoulder de la herramienta y no se incluye la mínima contribución del pin de la herramienta. Se cree que el pin de la herramienta tiene como propósito principal arrastrar el material del lado de retirada y depositarlo en el lado de avance.

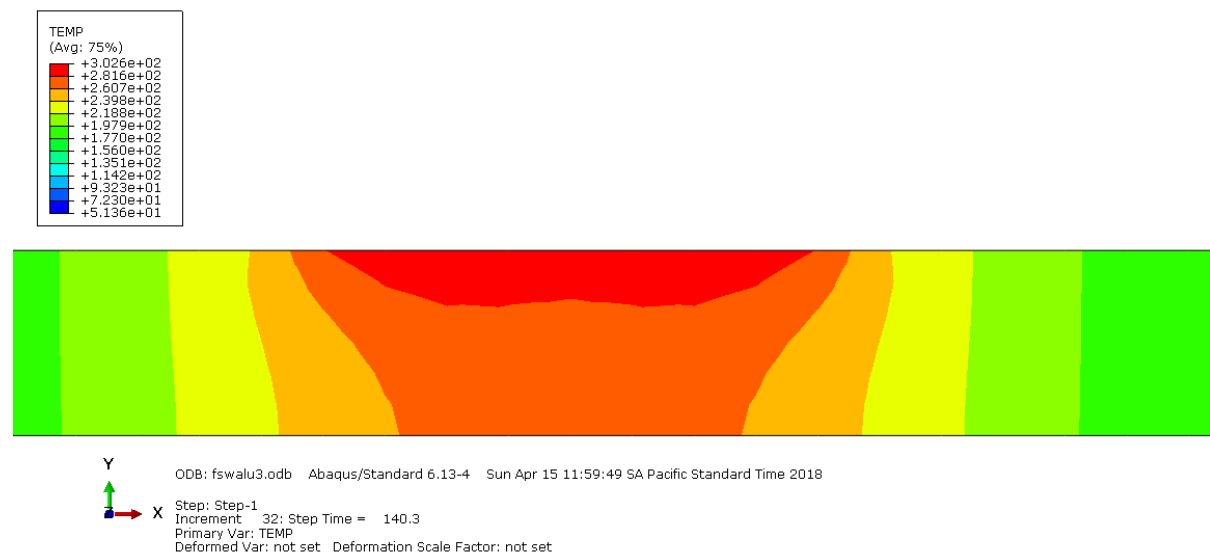


Figura 14.- Corte seccional Y-X Simulado (Parámetros: ver tabla 2)

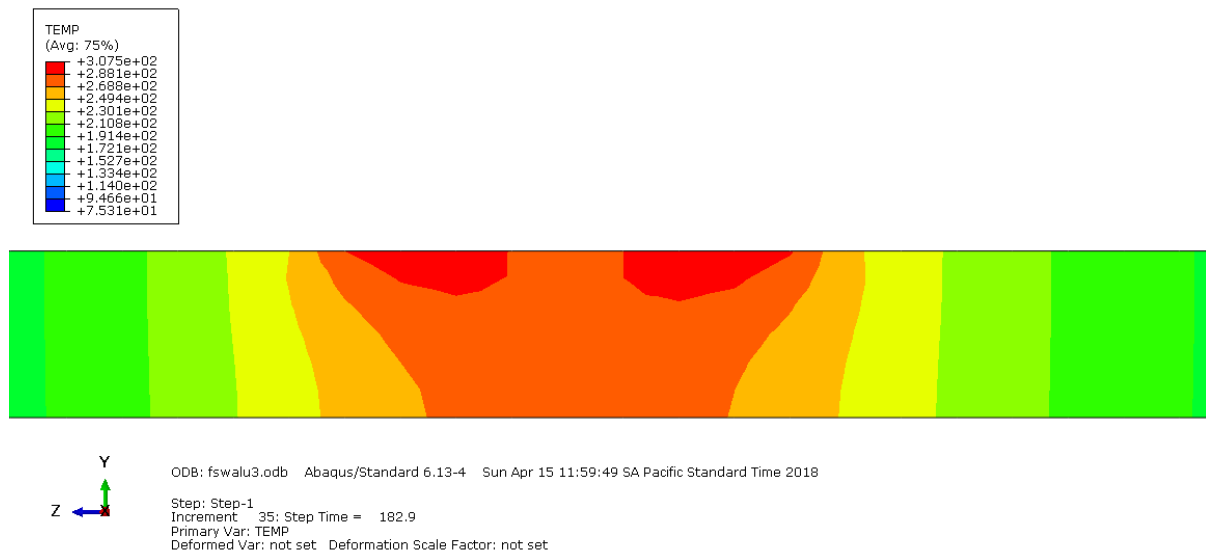


Figura 15.- Corte transversal Y-Z Simulado (Parámetros: ver tabla 2)

### 3.2 Macro y Microestructura

La macroestructura encontrada en las juntas soldadas con FSW se muestran en la figura 16. Las etiqueta (NZ) significa “Nugget zone”, (TMAZ) es “Thermo-mechanical affected zone”, (HAZ) es “Heat affected zone” y (BM) es el material base. La (NZ) se ensancha a medida que se acerca a la superficie superior, la superficie que está en contacto con la herramienta rotativa. Esto se debe a que la superficie superior experimenta calor por fricción significativamente alto y flujo de material debido al contacto con el shoulder de la herramienta durante el proceso de FSW. En las dos pruebas, la forma y tamaño de la zona soldada son idénticas.

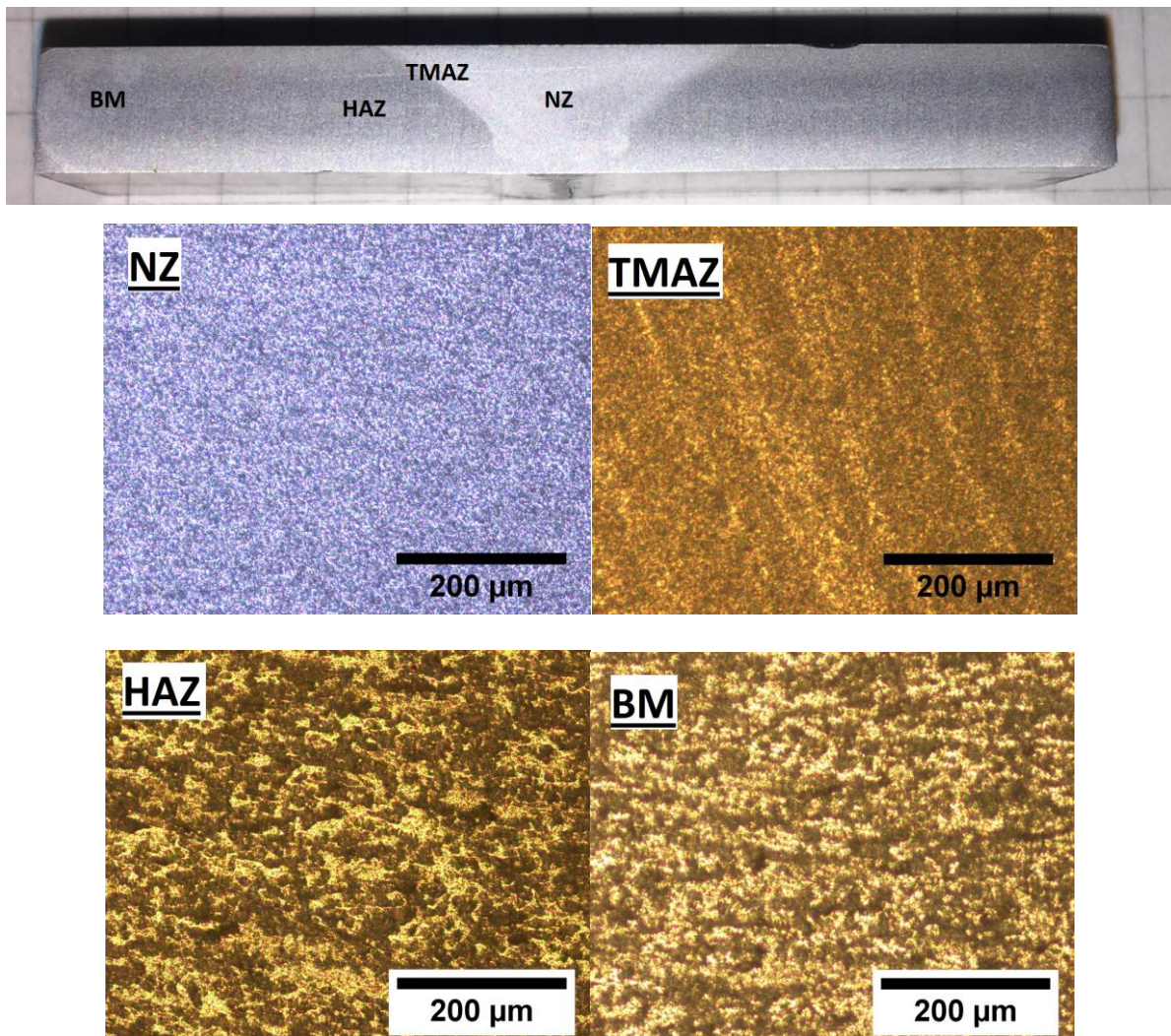
En la “Nugget zone” (NZ), la gran deformación plástica experimentada resulta en una microestructura de granos muy finos equiaxiales recrystalizados. En esta parte no se encuentra los usuales defectos; por ejemplo: incrustaciones, fisuras, cavidades y demás.

La zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ), es caracterizada por una estructura altamente deformada. En esta zona los granos están alargados en el mismo sentido de rotación de la herramienta como se observa en la Fig.16. En esta zona, de acuerdo con Mishra, a pesar de

experimentar deformación plástica, no ocurre recristalización debido a la insuficiente deformación (Mishra & Ma, 2005).

La zona afectada por el calor (HAZ), inmediatamente después del TMAZ, únicamente experimenta afectación por el calor, pero no experimenta deformación plástica. Tiene una microestructura muy similar al material base, pero los precipitados aumentan de tamaño y con ello se reduce los valores de esfuerzo de fluencia( $S_y$ ) y el último esfuerzo en tensión de la junta soldada(UTS). Es importante destacar que se necesito realizar un sobre ataque químico debido a que el material analizado genera una capa de Alúmina rápidamente. El ataque químico reveló la microestructura de la sección transversal, pero produjo un efecto colateral en el material, el material al estar con un sobre ataque, no permitió una excelente visualización de los límites de grano, por ello no se pudo cuantificar el tamaño de grano de las diferentes zonas antes mencionadas; no obstante, es posible observar a simple vista como el tamaño de grano varía en cada zona.

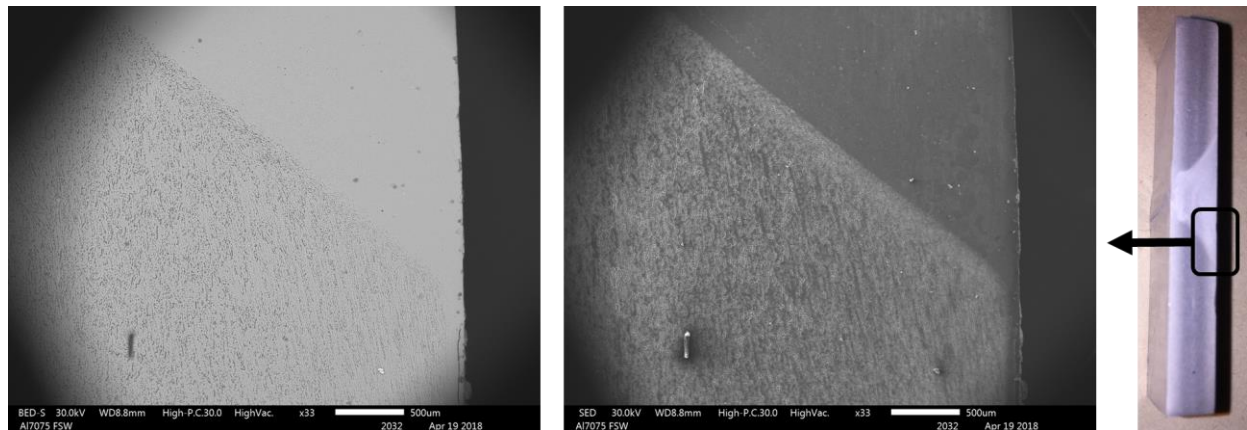




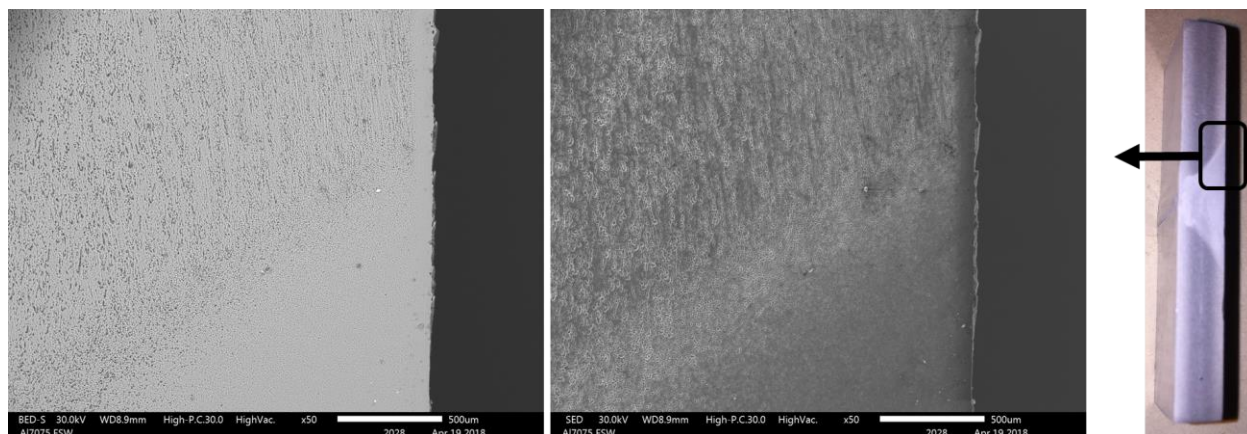
*Figura 16.-Macro y microestructuras de sección transversal, perpendicular a la dirección de soldadura*

En la figura 17 se puede apreciar dos micrografías de la junta soldada, y está enfocando el “Retreating side” de la junta soldada. En este caso se puede observar como las 3 zonas antes mencionadas (NZ, TMAZ, HAZ) difieren en su microestructura, además, la línea de separación entre “Nugget zone” y “Thermo-Mechanical affected zone” es muy clara. Esto se debe a que en el “Retreating side” únicamente se está depositando el material y la afectación mecánica es mínima. En cambio, en la Fig. 18 se aprecia como en el “Advancing side” la afectación mecánica es mucho mayor, se nota como las 3 zonas (NZ, TMAZ y HAZ) son mucho más difusas a comparación con la Fig.17. Se cree que, en este lado, donde la dirección de rotación

de la herramienta coincide con la dirección de la velocidad de avance experimenta una mayor cantidad de calor y afectación mecánica. En otras palabras, en este lado ("Advancing side") se está generando la mayor cantidad de calor y se desprende material hacia el "Retreating side" donde se deposita el material en estado plástico.



*Figura 17.- Micrografía SEM - "Retreating side"*



*Figura 18.- Micrografías SEM - "Advancing side"*



### 3.3 Propiedades Mecánicas

Como se observa en la figura 19, el perfil de durezas es relativamente homogéneo; sin embargo, se nota una disminución muy pequeña en los puntos cercanos al centro de la soldadura. Toktas asegura que en diferentes aleaciones de Aluminio en la zona de WN el perfil de dureza disminuye. Asimismo, explica que dicho efecto se atribuye a las diferentes variables manejadas en el proceso de FSW, que incluye: los parámetros de proceso, métodos de medición de dureza, ejecución de la junta y condición inicial de temple del material base (Toktaş & Toktaş, 2011). Por ejemplo, una aleación de Al 6063 -T5 mostrará una región de dureza menor en la zona WN, mientras que la misma aleación, pero T4 mostrará un perfil de dureza homogéneo.

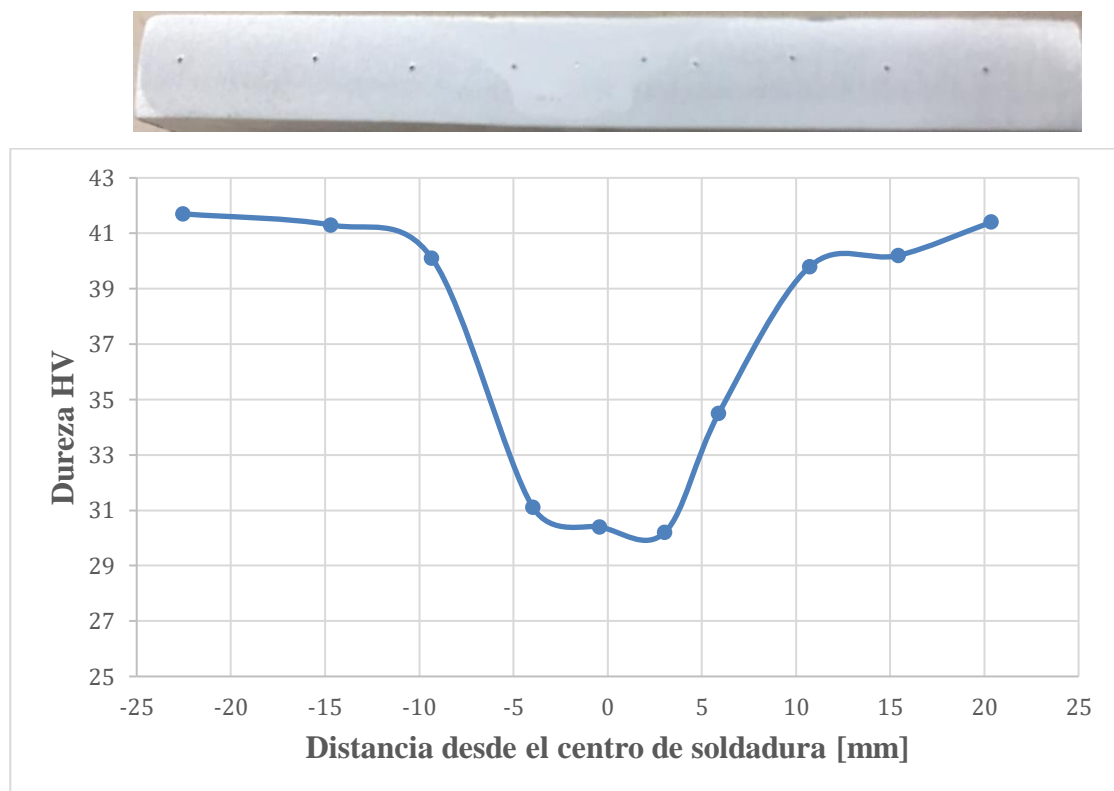
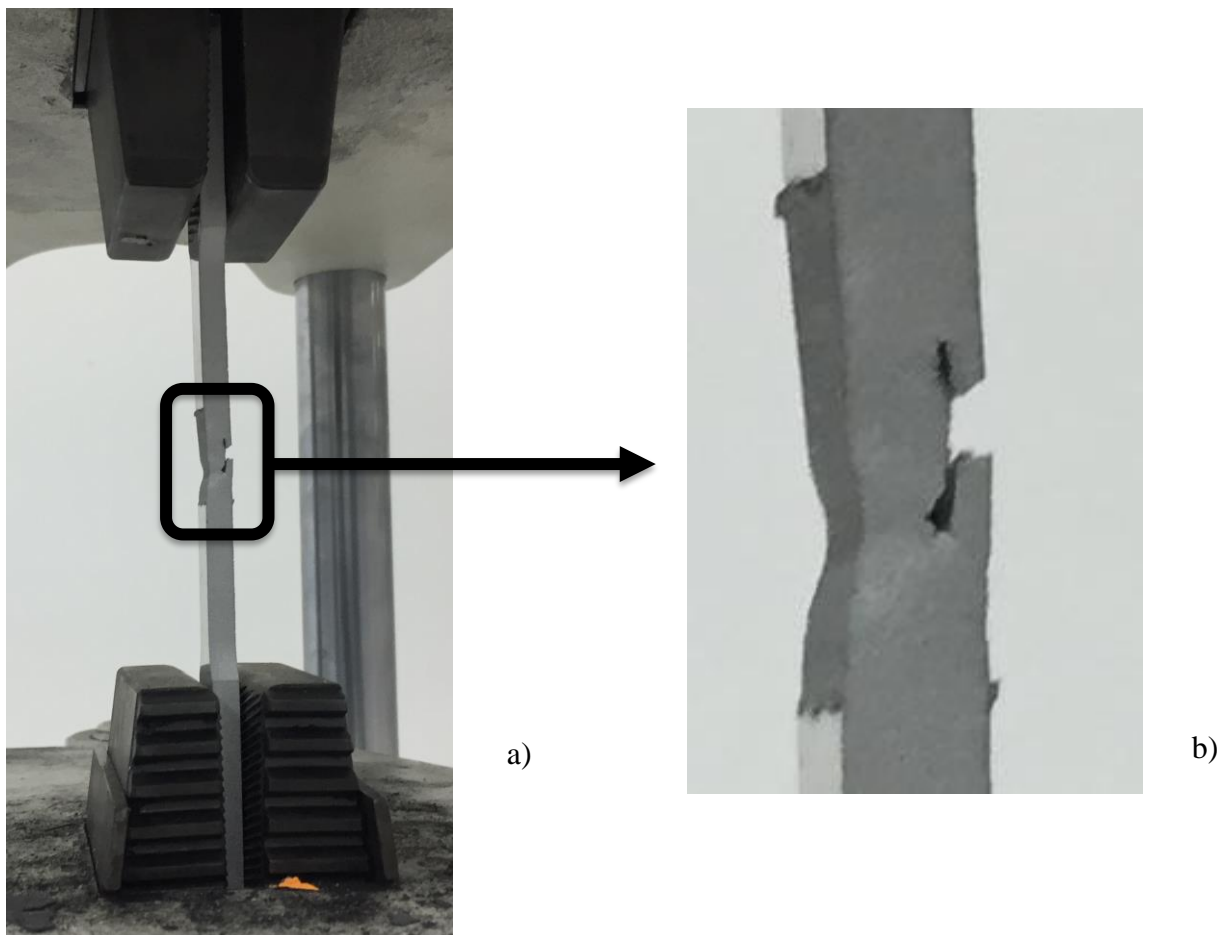


Figura 19.- Perfil de Dureza

La figura 22 muestra presenta 3 curvas esfuerzo – deformación para cada ensayo de tracción realizado. Las etiquetas: (FSW1) se refiere a la curva ensayada del primer experimento, (FSW

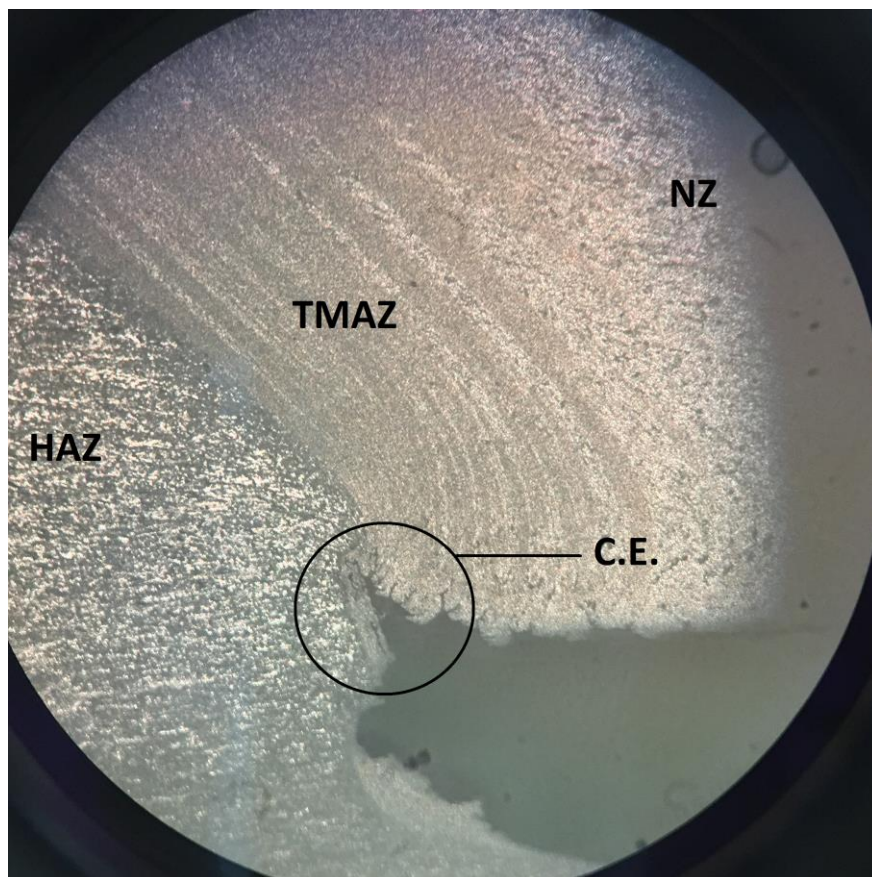
2 y FSW3) se refieren a las dos probetas ensayadas del experimento número 2. En el primer experimento no se pudo obtener otra gráfica porque una de las probetas que se cortó al realizar el ensayo de tracción la maquina no registró ningún dato. En esta misma figura, se observa como el esfuerzo de fluencia( $S_y$ ) para el ensayo FSW2 y FSW3 fue de 104 [MPa] aproximadamente y el esfuerzo último en tensión (UTS) fue de alrededor de 108 [MPa]. En cambio, para el ensayo FSW 2, el esfuerzo último en tensión (UTS) fue de 146 [MPa]. La diferencia de los valores de esfuerzo (UTS) entre los tres ensayos se debe a que en algunas secciones de la junta soldada hubo penetración completa y en otras partes hubo pequeñas cavidades, como consecuencia, tales pequeñas cavidades disminuyeron la resistencia de la junta soldada.



*Figura 20.- Ensayo de Tracción: a) Probeta montada en la maquina universal, b) Acercamiento en la zona de ruptura de la probeta*

Otro de los factores que influenciaron en los resultados de la resistencia mecánica de la junta soldada en tensión fue la penetración incompleta. En la Fig. (18) se observa claramente puntos concentradores de esfuerzo como resultado de la penetración incompleta del experimento 1. Este punto de concentración de esfuerzos (C.E.) al ensayar la probeta en tensión actuó como una fisura microscópica que disminuye significativamente la resistencia de la junta (Fig. 21), fue en esa locación donde ocurrió la fractura en todas las probetas ensayadas.

Por otro lado, el porcentaje de elongación de las probetas ensayadas (Fig.22) estuvo entre el 7.5 % y 8.4 %.



*Figura 21.- Fotografía de la junta soldada con aumento 5X*

Tomando en cuenta que el (UTS) del material sin soldar es de 120 MPa, se alcanzó el 87.5%, 90% y 93.3% del UTS del material sin soldar para los ensayos FSW1, FSW2 y FSW3 respectivamente. En este caso, es preciso denotar que las probetas no tuvieron post tratamiento

térmico y se cree que con un post tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación se podrá alcanzar el 100% de los valores de resistencia del Aluminio 7075. Asimismo, se observa en la Fig. 22 como el porcentaje de deformación para la junta soldada disminuye aproximadamente 6 por ciento.

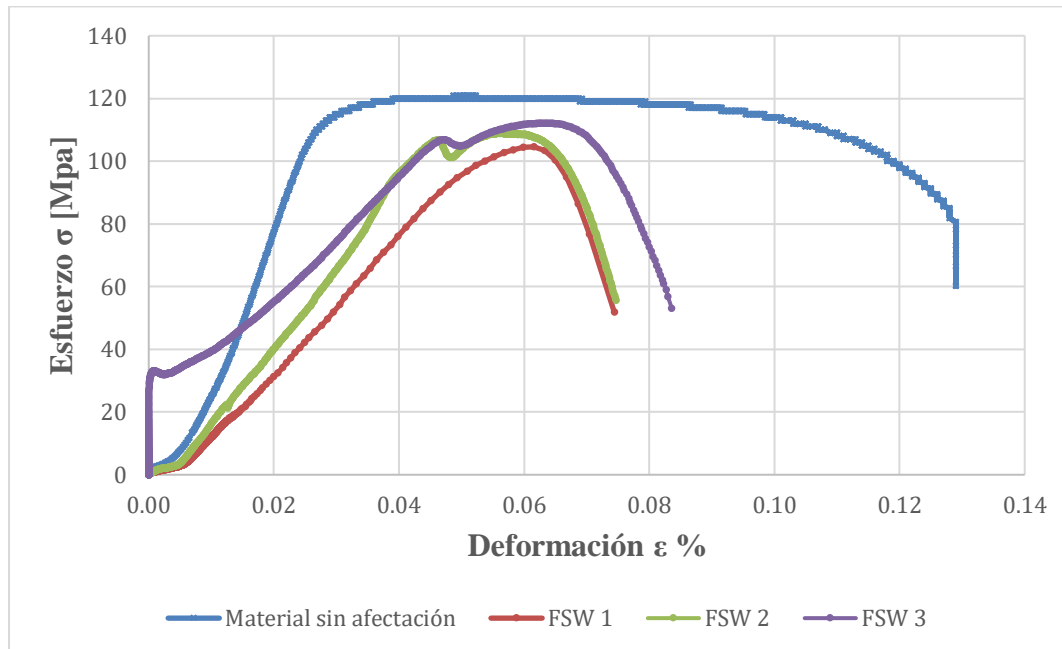


Figura 22.- Curvas esfuerzo - deformación para cada ensayo de tracción

## CONCLUSIONES

En conclusión, con el modelo térmico implementado en ABAQUS se obtuvo los parámetros de proceso como: velocidad angular, velocidad de avance y fuerza axial. Dichos parámetros permitieron obtener: primero, que la temperatura máxima registrada sea menor a la temperatura de fusión del material base. Segundo, la resistencia máxima en tensión (UTS) de la junta soldada sea del 90 por ciento en promedio de la resistencia del material base. Las Temperaturas registradas experimentalmente estuvieron muy cercanas a las temperaturas obtenidas en la simulación, el error en promedio fue del 3.8 por ciento. Con ello, podemos concluir que el modelo térmico presentado en (Bonifaz,2017) es lo bastante cercano a la realidad y puede ser utilizado para futuros estudios en diferentes materiales y espesores de placa. En cuanto a la microestructura de la unión soldada, se encontró que el tamaño de grano disminuye significativamente en las zonas más cercanas a la línea de soldadura, el “Nugget zone” (NZ) tuvo el tamaño de grano más pequeño, luego en la zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) este tamaño de grano aumentó y en la zona afectada por el calor(HAZ) el tamaño de grano es muy similar al tamaño de grano del material base.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM International Handbook Committee. (1990). Vol.1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. In *Metals Handbook* (10th Ed.).
- ASM International Handbook Committee. (2001). The Materials Information Company. *Technology*, 2, 3470. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(03\)90166-8](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(03)90166-8)
- ASTM Int. (2009). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1. *Astm*, (C), 1–27. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Bohler Uddeholm. (2013). Bohler-Uddeholm H13 tool steel.
- Bonifaz, E. A. (2017). A NEW THERMAL MODEL IN FRICTION STIR WELDING IN SAE-AISI 1524 CARBON STEEL.
- He, X., Gu, F., & Ball, A. (2014). A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*, 65, 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.003>
- Incropera, Frank; Dewitt, D. P. . (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50(1–2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
- Nandan, R., Roy, G. G., Lienert, T. J., & Debroy, T. (2007). Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*, 55(3), 883–895. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.09.009>
- Sato, Y. S., Kokawa, H., Enomoto, M., & Jogan, S. (1999). Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(9), 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0251-1>
- Sonora, U. de. (2013). Coefficients of Friction, 1. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90166-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90166-2)
- Su, J. Q., Nelson, T. W., Mishra, R., & Mahoney, M. (2003). Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium. *Acta Materialia*, 51(3), 713–729. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00449-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4)
- Toktaş, A., & Toktaş, G. (2011). Effect of Welding Parameters and Aging Process on the Mechanical Properties of Friction Stir-Welded 6063-T4 Al Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(June), 936–945. <https://doi.org/10.1007/s11665->

011-9994-0

Węglowski, M. S. (2018). Friction stir processing – State of the art. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.06.002>

## ANEXO A: PLANO DE TALLER HERRAMIENTA FSW

