

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO  
EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN FSW APLICADO EN  
ALEACIONES DE ALUMINIO**

**POR**

**ZAYRA LORETTA LÓPEZ BUSTOS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**18 SEPTIEMBRE DE 2012**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO  
EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN FSW APLICADO EN  
ALEACIONES DE ALUMINIO**

**POR**

**ZAYRA LORETTA LÓPEZ BUSTOS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**18 SEPTIEMBRE DE 2012**

# AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), en especial a la Coordinación de Posgrado y a las personas que lo integran, por permitirme ser parte de esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por ser el proveedor de los recursos económicos para la manutención durante el desarrollo de esta monografía.

A mi tutor académico el Dr. Felipe de Jesús García Vázquez y al Dr. Gregorio Salazar por compartir su conocimiento y hacer posible el trabajo presente.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por los conocimientos adquiridos durante la estancia en la universidad, en especial a la Dra. Patricia Zambrano por integrarme en su equipo de trabajo.

# DEDICATORIAS

A mis padres el hombre que más me ama y a la mamá más mala del mundo, con mucho cariño les dedico esta monografía que representa un escaloncito más de lo que hemos logrado juntos, les amo.

A mis hermanas Alejandra mi mejor amiga por compartir momentos inolvidables al caminar juntas, a Charbeli por ser el motor que me motiva a seguir adelante, a Azul y Natalia los rayitos de sol.

A Alejandro Vargas mi mejor amigo por apoyarme en todo momento, además de alentarme a dar lo mejor de mi durante el desarrollo de la monografía.

# ÍNDICE

<b>SÍNTESIS</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específico	4
1.3 Justificación	5
1.4 Planteamiento del problema	5
1.5 Aportación tecnológica	6
1.6 Alcance	6
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE</b>	
2.1 Aleaciones de aluminio	7
2.1.1 Propiedades de las aleaciones de aluminio	8
2.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio	10
2.1.2.1 Aleaciones para forja	11
2.1.2.2 Aleaciones para fundición	11
2.1.3 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio	13
2.1.4 Aleación 6061 T6	14
2.2 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio	14

<b>2.3</b>	<b>Proceso de soldadura por fricción agitación FSW</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Equipo</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Parámetros del proceso FSW</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Ventajas y desventajas del proceso FSW</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Proceso FSW aplicada a aleaciones de aluminio</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1</b>	<b>La recristalización en aleaciones de aluminio</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Desarrollo microestructural de las aleaciones de aluminio unidas mediante FSW</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Propiedades mecánicas en las aleaciones de aluminio unidas mediante el proceso FSW</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3.1</b>	<b>Propiedades de tensión</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3.2</b>	<b>Fatiga</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3.3</b>	<b>Esfuerzos Residuales</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3.4</b>	<b>Corrosión</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Distribución de temperatura y flujo de metal</b>	<b>31</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Generación de calor</b>	<b>32</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Presión de la herramienta</b>	<b>33</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Flujo de material</b>	<b>34</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Trabajo termomecánico</b>	<b>37</b>
<b>2.5</b>	<b>Simulación del proceso de soldadura FSW en programas de cómputo que emplean el método de elementos finitos</b>	<b>39</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Modelación</b>	<b>39</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Método analítico</b>	<b>42</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Método numérico</b>	<b>43</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Método de elementos finitos (FEM)</b>	<b>45</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Programas de cómputo para la simulación del proceso FSW</b>	<b>49</b>
<b>2.5.5.1</b>	<b>ANSYS</b>	<b>50</b>
<b>2.5.5.2</b>	<b>ABAQUS</b>	<b>53</b>

<b>2.6 Método de elementos finitos (FEM) aplicado al proceso de soldadura FSW en aleaciones de aluminio</b>	<b>57</b>
<b>2.6.1 Formulación arbitraria</b>	<b>57</b>
<b>2.6.2 Modelo constitutivo del material</b>	<b>58</b>
<b>2.6.3 Descripción del experimento</b>	<b>60</b>
<b>2.6.4 Modelo de elementos finitos</b>	<b>62</b>
<b>2.6.5 Análisis preliminar de la fricción</b>	<b>62</b>
<b>2.6.6 Formulaciones</b>	<b>63</b>
<b>2.6.7 Fricción</b>	<b>65</b>
<b>2.6.8 Calibraciones y velocidades</b>	<b>67</b>
<b>2.6.9 Resultados de la simulación en FSW</b>	<b>67</b>

### **CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA**

<b>3.1 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio y las ventajas del proceso FSW sobre los procesos convencionales</b>	<b>73</b>
--	-----------

<b>3.2 Importancia de programas computacionales de simulación en el proceso FSW aplicados en las aleaciones de aluminio</b>	<b>74</b>
---	-----------

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
---------------------	-----------

<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>78</b>
--------------------------	-----------

<b>LISTADO FIGURAS</b>	<b>79</b>
------------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>
---------------------	-----------

# SÍNTESIS

El presente documento es la recopilación de información sobre las herramientas de simulación empleada en el proceso de soldadura FSW, específicamente para aleaciones de aluminio.

Hoy en día el aluminio suele ser un material altamente aplicable aleado con otros elementos, es por eso que surgió la necesidad de observar su desempeño después de haber sido soldado. Algunos procesos convencionales como el proceso de soldadura por arco protegido por gas (GMAW por sus siglas en inglés) y el proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW por sus siglas en inglés), ofrecen buenos resultados, sin embargo se quedan por debajo de procesos relativamente nuevos como lo son el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW por sus siglas en inglés).

Debido a que este proceso es prácticamente nuevo se ha estudiado por medio de simulación para lograr entender por completo su principio de funcionamiento, además de tratar de encontrar los parámetros adecuados para lograr una soldadura satisfactoria según la aleación a utilizar.

En el campo de simulación existen gran variedad de paquetes computacionales que ofrecen ciertas características, ventajas unos sobre otros según el trabajo que se requiera desempeñar, facilitando la experimentación y ahorrando costos para las empresas de manera significativa, estos programas de cómputo suelen trabajar por medio del método de elemento finito para realizar los cálculos necesarios y resolver el problema como una aproximación del resultado real.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En la actualidad los materiales para construcción de aviones, automóviles y estructuras requieren la combinación de diferentes propiedades como resistencia, ligereza y alta conductividad eléctrica y térmica, tales propiedades son características del aluminio y sus aleaciones. El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza sin embargo su aplicación industrial es reducida; a cien años de ser sintetizado y aleado con otros materiales es ampliamente utilizado sobre todo por su resistencia a la corrosión en diferentes ambientes.

La unión de las aleaciones de aluminio se realiza fácilmente por medio de soldadura pero requieren precauciones con la entrada y el flujo de calor por su alta conductividad térmica. La mayoría de las aleaciones son soldadas con los procesos convencionales de soldadura con arco protegido por gas (GMAW por sus siglas en inglés) y soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW por sus

siglas en inglés). El GTAW se limita a espesores delgados, se logra una buena calidad pero se requiere soldadores capacitados en este proceso; mientras que el GMAW ofrece zonas menores afectadas por el calor, se puede soldar en toda posición y remoción del óxido durante la soldadura es por lo anterior el proceso más utilizado en la soldadura de aluminio.

Sin embargo se presentan algunos defectos que afectan las propiedades de la soldadura en aleaciones de aluminio destacando:

- Porosidad.
- Inclusiones de óxido.
- Fisuración en caliente en la solidificación.
- Falta de fusión.
- Reducida resistencia a la corrosión.
- Reducida resistencia eléctrica.

Se puede conseguir soldadura de alta calidad en varios tipos de aleaciones de aluminio empleando soldadura por fricción agitación (FSW por sus siglas en inglés), las ventajas sobre los procesos convencionales es que no requiere de material de aporte o gas de protección, soldando con penetración total y sin porosidad. El proceso FSW es empleado para unir piezas consideradas no soldables con otros procesos tradicionales, a partir de esto se han desarrollado proyectos sobre simulaciones numéricas para identificar las principales variables del proceso con el fin de predecir la viabilidad del mismo. En las simulaciones, el modelado numérico del proceso, permite predecir el comportamiento sin necesidad de ensayos específicos pudiendo acelerar los procesos de diseño, bajando los costos y optimizando las variables tecnológicas a utilizar. Además los modelos numéricos son útiles para el análisis de la microestructura, las tensiones residuales y distorsión.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estudiar el estado del arte de la aplicación de programas de cómputo de simulación por elemento finito en el proceso FSW aplicado en la unión de aleaciones de aluminio.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Obtener información relevante del estado del arte en la aplicación del proceso FSW en aleaciones de aluminio.
- Investigar las herramientas de simulación aplicadas al proceso FSW (viabilidad del proceso).
- Estudiar el impacto de las principales variables del proceso FSW, como son ciclos de temperatura, velocidad de deformación, diseño de herramientas, entre otros.
- Obtener información del desarrollo de las características microestructurales y mecánicas de las zonas de unión mediante FSW de aleaciones de aluminio.

### **1.3 Justificación**

La aplicación de las herramientas de simulación es importante, en este caso para conocer el comportamiento termo-mecánico en el proceso FSW aplicado a aleaciones de aluminio. El uso de estas herramientas permite simular un ambiente de modo que se determinen de antemano los resultados, ventajas, desventajas y consecuencias de los cambios en nuestro entorno sin afectar el proceso.

La simulación proporciona una alternativa práctica y analiza problemas complejos permitiendo la toma de decisiones en los procesos sin implementar la técnica de “prueba y error”. Es decir, al implementar un modelo de simulación en los procesos de soldadura se reduce el tiempo, además de ser una práctica económica y confiable. Una simulación por computadora puede ser intuitivamente comprensible.

### **1.4 Planteamiento del problema**

En la actualidad existen diversas aleaciones de aluminio utilizadas para usos específicos, dependiendo las características necesarias, estas características se modifican al unir las piezas mediante soldadura según la aleación utilizada. En los procesos de soldadura convencionales se generan defectos producidos por el calor afectando la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión además de producir fisuras en el material.

Un proceso de soldadura que minimiza los defectos anteriores es el proceso FSW una de las más recientes tecnologías de unión, este proceso de estado sólido es capaz de soldar los materiales considerados difíciles de soldar. Es conveniente conocer los diferentes parámetros de operación que afectan las uniones soldadas. Por lo antes mencionado es importante la aplicación de

programas de cómputo para realizar la simulación y obtener mayores conocimientos sobre cómo se puede llevar a cabo el proceso FSW y así mejorar las variables de operación.

## **1.5 Aportación tecnológica**

La aleación de aluminio a utilizar en este proyecto es la denominada 6061 T6 esta aleación es dúctil y ligera, tiene gran resistencia y sus características de acabado son excelentes, es empleada en piezas maquinadas. En la actualidad el consumo de esta serie de aluminios ha ido incrementando para emplearlo en la industria automotriz ya que cada vez se exigen automóviles más livianos, que consuman menos combustible y tengan un mejor desempeño.

El proceso de Soldadura por Fricción Agitación es apto para emplearlo en la aleación AA6061 T6 ya que disminuye algunos defectos producidos en los procesos convencionales. La principal ventaja de este proceso sobre los convencionales es que permite unir piezas con simetría de revolución.

En el presente documento se estudiarán las herramientas de simulación aplicadas al proceso FSW, que emplean el método de elemento finito, para determinar la viabilidad del proceso y predecir las variables del proceso más importantes.

## **1.6 Alcance**

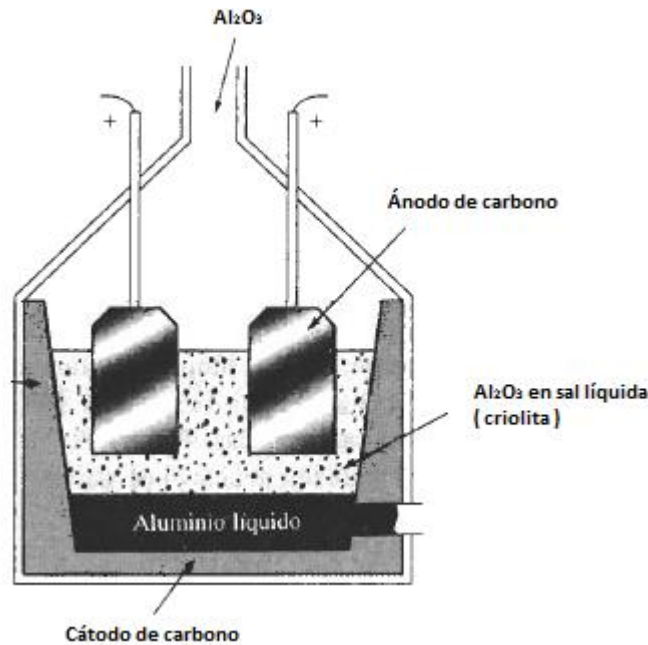
El alcance de este proyecto es analizar información científica y tecnológica sobre el estado del arte en la aplicación de herramientas de simulación por elemento finito en el proceso FSW aplicada a uniones de aluminio.

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es el metal no ferroso más utilizado en el planeta, el desarrollo de la energía eléctrica y el proceso Hall- Herault permitió obtener el mineral líquido, como se muestra en la figura 2.1,convirtiéndose en uno de los materiales más utilizados, actualmente con un consumo anual de 24 millones de toneladas, este elemento tiene propiedades únicas, su peso es ligero y tiene excelente resistencia a la corrosión, que lo convierte en un material ideal para diversas aplicaciones nuevas y convencionales, por ejemplo en la producción de automóviles, envasado de alimentos, estructuras para la construcción de edificios, transmisión de electricidad, uso aeroespacial, maquinaria y equipo duradero. El aluminio ha tenido desarrollo gracias a la demanda de productos tecnológicamente complejos [1].



**Figura 2.1** Representación esquemática de una celda electrolítica para la producción de aluminio [2].

### 2.1.1 Propiedades de las aleaciones de aluminio

El aluminio puro se caracteriza por su baja resistencia mecánica lo cual lo limita a ser utilizado en aplicaciones donde se requiere resistencia a la deformación y fractura. Otra propiedad importante es la alta resistencia a la corrosión pudiéndose utilizar en diversos ambientes; las propiedades del aluminio puro son moderadas, por lo tanto tienen poca aplicación industrial, pero al ser aleado con otros elementos estas propiedades se mejoran, consiguiendo ser ampliamente utilizado en más aplicaciones. Algunas de estas propiedades se mencionan a continuación [3] [4]:

Propiedades físicas,

- Baja densidad (  $2.7 \text{ g/cm}^3$  )
- Conductividad térmica elevada (80 - 230 W/m.K)

- Conductividad eléctrica elevada (resistividad 28 - 60 nΩ.m)
- Calor específico elevado (865 - 905 J/kg.K)
- Dilatación térmica elevada (20 - 25 μm /m.k)

Propiedades mecánicas (temperatura ambiente).

- Resistencia a la tracción (150 - 450 Mpa)
- Límite elástico (100 - 300 Mpa)
- Módulo de elasticidad (69 - 73 Gpa)

Las propiedades físicas y mecánicas dependen de la composición química y características microestructurales desarrolladas durante la solidificación, tratamientos térmicos y proceso de deformación [1]. La concentración de aleaciones e impurezas permiten mejorar las propiedades del aluminio. Los principales elementos de aleación son el cobre, silicio, magnesio y zinc, y manganeso, hierro, cromo y titanio se presentan como impurezas. Existen aleaciones especiales con los elementos níquel, Cromo, plata, litio, plomo, bismuto, pero de cualquier manera todos los elementos afectan la estructura cambiando las propiedades de cada aleación [5].

Los principales efectos de los elementos de aleación son los siguientes <sup>[4]</sup>:

- Magnesio (Mg): Incrementa la resistencia a través de solución sólida y mejora la capacidad de endurecimiento por trabajado en frío.
- Manganeso (Mn): Incrementa la resistencia a través de solución sólida y mejora la capacidad de endurecimiento por trabajado en frío.
- Cobre (Cu): Provee un incremento sustancial de la resistencia, facilita el endurecimiento por precipitación, reduce la resistencia a la corrosión, ductilidad y soldabilidad.
- Silicio (Si): Incrementa la resistencia y la ductilidad, en combinación con magnesio facilita el endurecimiento por precipitación.
- Zinc (Zn): Incrementa sustancialmente la resistencia, facilita endurecimiento por precipitación, puede causar corrosión bajo tensión.



- Hierro (Fe): Incrementa la resistencia en el aluminio puro, generalmente elemento residual.
- Cromo (Cr): Incrementa la resistencia a la corrosión bajo tensión.
- Níquel (Ni): Mejora la resistencia a altas temperaturas.
- Titanio (Ti): Usado como refinador de grano, principalmente en aleaciones a utilizar para rellenar.
- Circonio (Zr): Usado como refinador de grano, principalmente en aleaciones a utilizar para rellenar.
- Litio (Li): Incrementa sustancialmente la resistencia y el módulo de Young, facilita el endurecimiento por precipitación, disminuye la densidad.
- Escandio (Sc): Incrementa sustancialmente la resistencia mediante endurecimiento por envejecimiento, refinador de grano particularmente en metales de soldadura.
- Plomo (Pb) y Bismuto (Bi): Propician a la formación de viruta en aleaciones sin maquinar.

### **2.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio**

La clasificación de las aleaciones se dispone en dos grandes grupos para forja y para fundición, que a su vez se clasifican dependiendo de los elementos de aleación que contengan, para finalmente agruparse según el tratamiento térmico. En la tabla 2.1 se puede observar la clasificación de las aleaciones, según el sistema de numeración de Normas AA (Aluminium Association), en donde el primer número define el elemento de aleación, el segundo las modificaciones de la aleación y los dos últimos números se refieren a la composición específica que contienen de aluminio, puede que incluya una letra seguida de número que indica el tratamiento térmico o mecánico, se muestra también en la tabla 2.2 dicha clasificación. El sistema empleado para clasificar

las aleaciones es muy similar tanto para aleaciones forjadas y para las aleaciones de fundición, se distinguen por el uso del punto decimal en las aleaciones de fundición.

### **2.1.2.1 Aleaciones para forja**

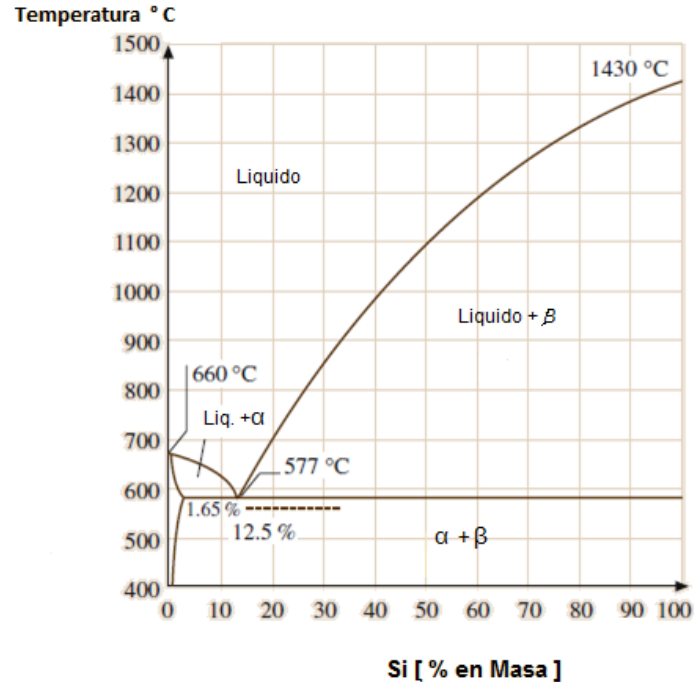
Las aleaciones para forja se conforman mediante deformación plástica. Sus propiedades quedan controladas por endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control de tamaño de grano. El grado de solución sólida resulta limitado ya que a temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación y de aluminio es pequeña [2]. Las aplicaciones comunes de estas aleaciones son productos laminados o extruidos en forma de planchas, láminas, tubos, perfiles diversos, etc.

### **2.1.2.2 Aleaciones para fundición**

Algunas aleaciones para fundición contienen silicio que causa una reacción eutéctica, observe la figura 2.2, como consecuencia tienen puntos de fusión bajos. Las características de estas aleaciones son fluidez y la facilidad para hacer una buena fundición, así como contracción pequeña para tener poca formación de fisuras [2]. Gracias a su bajo punto de fusión se pueden emplear moldes metálicos además de los moldes de arena, y en los moldes metálicos el proceso se realiza por gravedad o por inyección. Este es un método costoso pero permite obtener piezas precisas y excelentes acabados [3].

**Tabla 2.1 Sistema de clasificación para las aleaciones de aluminio según el método de manufactura [2]**

Aleaciones para forja		
1xxx	Aluminio comercialmente puro >99% Al	No es endurecible por envejecimiento
2xxx	Al- Cu y Al-Cu- Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al- Mn	No es endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg- Si	Endurecible por envejecimiento si esta presente el magnesio
5xxx	Al-Mg	No es endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al- Li, Sn, Zr o B	Endurecible por envejecimiento
Aleaciones para fundición		
1xx	Aluminio comercialmente puro	No es endurecible por envejecimiento
2xx	Al- Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx	Al- Si-Cu o Al-Mg- Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4xx	Al-Si	No es endurecible por envejecimiento
5xx	Al-Mg	No es endurecible por envejecimiento
7xx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento



**Figura 2.2** Diagrama Al- Si, este sistema de aleación es la base de una parte importante de las aleaciones de fundición [5].

### 2.1.3 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio

Gracias a sus características, las aleaciones de aluminio son más ventajosas que los aceros en ciertas aplicaciones como en aeronáutica y en la industria automotriz, logrando mejorar tres aspectos importantes para la producción de artículos de calidad ya que ofrecen reducción en el costo del combustible, aumentando el rendimiento del producto y teniendo un impacto ambiental considerable [6]; convirtiendo a las aleaciones de aluminio el segundo grupo de materiales más empleados actualmente [3].

**Tabla 2.2 Clasificación para las aleaciones de aluminio según el tratamiento térmico [2]**

<b>F</b>	Tal como se fabricó (trabajo en caliente, forja, fundición, etc.)
<b>O</b>	Recocido (en el estado más blando posible)
<b>H</b>	Trabajado en frío
<b>H1x</b>	Trabajado en frío solamente (La x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento)
H12	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H14
H14	Trabajado en frío que aporta una resistencia a la tensión intermedia entre 0 y H18
H16	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión intermedia entre H14 y H18
H18	Trabajado en frío que resulta en una reducción de aproximadamente de 75%
H19	Trabajado en frío que proporciona una resistencia a la tensión superior a los 2000 psi de la obtenida mediante el H18
<b>H2X</b>	Trabajado en frío y parcialmente recocida
<b>H3X</b>	Trabajado en frío y estabilizada a una temperatura baja, para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura
<b>W</b>	Tratada por solución
<b>T</b>	Endurecida por envejecimiento
T1	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente
T2	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T3	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T4	Tratada por solución y envejecida naturalmente
T5	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T6	Tratada por solución y envejecida naturalmente
T7	Tratada por solución, estabilizada por sobre envejecimiento
T8	Tratada por solución, tratada en frío y envejecida artificialmente
T9	Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y artificialmente envejecida

### 2.1.4 Aleación 6061 T6

En este proyecto se estudiará la aleación 6061 T6 actualmente es ampliamente utilizada en la industria automotriz y aeroespacial, también en la construcción de barcos y marcos de bicicletas. Las características mecánicas se pueden observar en la tabla 2.3, además tiene un excelente acabado, es maquinable, tiene excelente resistencia a la corrosión y fácil de soldar. Los elementos que contiene esta aleación son silicio, hierro, cobre, magnesio, cromo, zinc, titanio y el tratamiento térmico al que se somete es Envejecido artificialmente [7].

**Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de la aleación 6061 T6 [8]**

Aleación	Tensión				Dureza	Corte	Fatiga	Módulo
	Resistencia (Ksi)		Elongación en 2 pulg.		Brinell	Último de Corte	Límite a la Fatiga	Módulo de elasticidad Ksi x 10 <sup>3</sup>
	Último	Cedencia	1/16" Espesor	1/2" Diámetro	500Kg	Resistencia Ksi	Ksi	
<b>6061-T6</b>	<b>45</b>	<b>40</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>95</b>	<b>30</b>	<b>14</b>	<b>10</b>

### 2.2 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio

La soldabilidad es la facilidad con que un metal se puede conformar por soldadura de sus partes, así como la habilidad de la unión soldada para resistir las condiciones de servicio [9]. Idealmente la soldadura debe tener las mismas

propiedades del metal base, pero existen dificultades que afectan la soldadura de las aleaciones de aluminio.

Por su alta conductividad térmica el aluminio puede transferir el calor rápidamente sobre el metal en donde se está realizando la soldadura, por lo tanto se debe aplicar el calor rápidamente para conducir el aluminio a la temperatura de soldadura. Cuando la soldadura se solidifica se puede encoger hasta un 6% creando deformaciones excesivas como grietas, la forma de soldadura, la cantidad de cordones afectan la cantidad de deformación en la soldadura [10]. Los defectos típicos se observan en la tabla 2.4.

Los procesos de soldadura más utilizados para aplicarse en estas aleaciones son GMAW y GTAW, son procesos de protección gaseosa utilizando Ar y He, estos gases cubren el baño de fusión de la soldadura evitando que el aluminio se oxide, ya que a temperaturas de 2038° C, el óxido encargado de evitar la corrosión se derrite y si no se elimina no permite una buena unión en la soldadura. Las desventajas de utilizar estos procesos son [11]:

- El óxido perjudica el establecimiento del arco.
- La soldadura necesita limpieza previa.
- El aluminio no cambia de color cuando se calienta, dificultando el control de la soldadura.
- Por su elevada expansión térmica, aparecen defectos en la soldadura como: porosidad, inclusiones de óxido, grietas, reducción de la resistencia en la soldadura, falta de fusión, reducida resistencia a la corrosión y reducida resistencia eléctrica.

Un proceso que puede disminuir las desventajas antes mencionadas, de los procesos convencionales por arco es el proceso FSW, este proceso es de fase sólida apto para unir aleaciones de aluminio, además de soldar piezas de diferentes longitudes y formas. El FSW se basa en unir los materiales utilizando

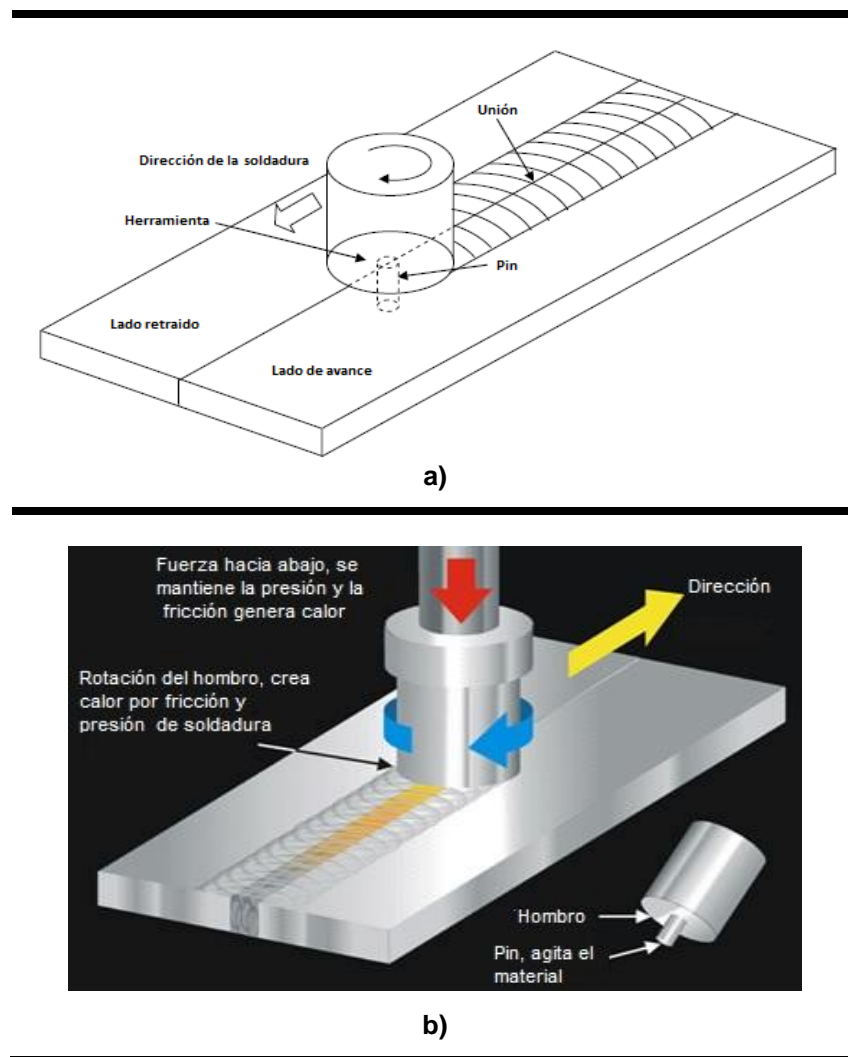
una herramienta que se inserta en la junta, con cierta velocidad de rotación y con una fuerza determinada [12].

**Tabla 2.4 Problemas típicos en la soldadura de aleaciones de aluminio [13]**

<b>PROBLEMAS TÍPICOS</b>	<b>TIPO DE ALEACIONES AFECTADAS</b>	<b>SOLUCIONES</b>
<b>Porosidad</b>	Frecuente en aleaciones Al-Li	Desbaste o tratamiento superficial a las piezas de trabajo Tratamiento térmico al vacío Utilizar el proceso de soldadura por plasma (PAW) con la técnica de agujero calado (keyhole)
	Frecuente en aleaciones fabricadas por metalurgia de polvos	Tratamiento térmico al vacío Minimizar la oxidación e hidratación de los polvos durante el proceso de fabricación de los metales base
	Menos frecuente en el resto de las aleaciones	Limpieza de la pieza de trabajo Limpieza del metal de aporte (en caso de usar alguno) Utilizar el proceso de soldadura por plasma (PAW) con la técnica de agujero calado (keyhole)
<b>Agrietamiento en la zona de fusión</b>	Aleaciones de alta resistencia (p.ej. 2014, 6061, 7075)	Utilizar metal de aporte apropiado y diseños de unión que propicien dilución correcta entre el metal de aporte y la pieza de trabajo En soldadura GTAW sin aporte, realizar oscilaciones de arco, o utilizar una aleación menos susceptible, como la 2219.
<b>Agrietamiento y baja ductilidad en la zona parcialmente fundida</b>	Aleaciones de alta resistencia	Aplicar bajo calor de entrada Utilizar metal de aporte apropiado Aplicar oscilaciones de arco con baja frecuencia
<b>Pérdida de resistencia mecánica en la zona afectada por el Calor</b>	Aleaciones endurecidas con trabajo mecánico	Aplicar bajo calor de entrada
	Aleaciones tratables térmicamente	Aplicar bajo calor de entrada Aplicar un tratamiento térmico después de soldar

## 2.3 Proceso de soldadura por fricción (FSW)

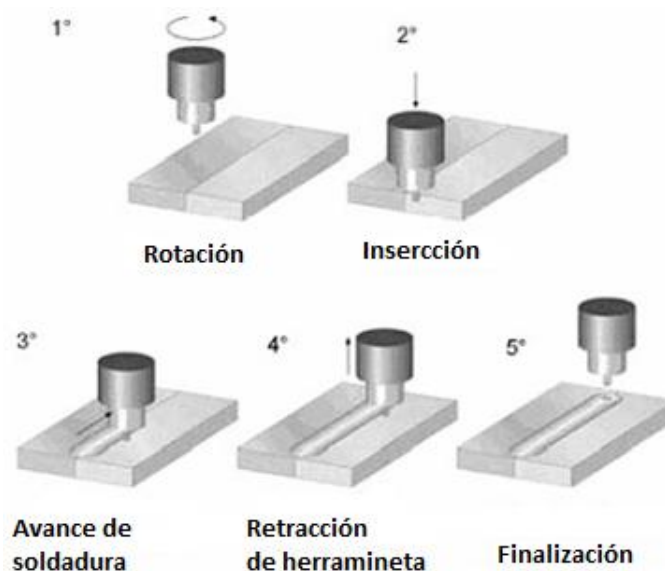
En 1997 surgió el proceso de soldadura por fricción- agitación (FSW) creado por el Instituto de Soldadura de Inglaterra (TWI), es un método de estado sólido de unión aplicado principalmente a las aleaciones de aluminio. El proceso es muy sencillo consiste en una herramienta que sostiene a un tornillo sin cabeza (pin), se inserta en la placas a unir y se mueve a lo largo de las superficies mientras la herramienta está rotando como se puede observar en la figura 2.3 [14].



**Figura 2.3** Esquema de soldadura por fricción agitación. a) Esquema del Proceso b) Funciones de la herramienta [15].



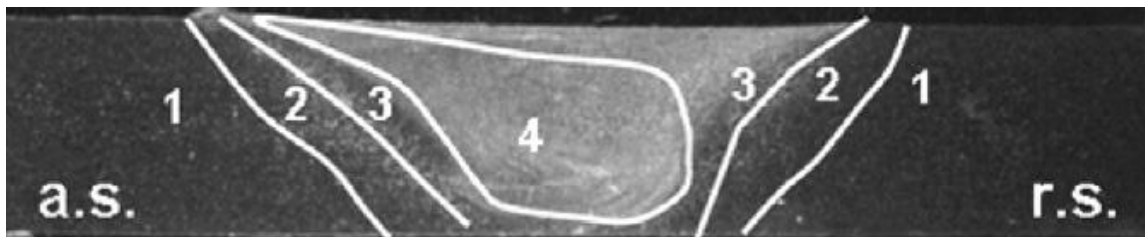
La herramienta tiene tres funciones importantes: el calentamiento de la pieza, el movimiento del material para producir la unión y detener el metal caliente debajo del hombro de la herramienta [16]. La fricción entre el hombro y las placas generan calor, ablanda el material produciendo deformación plástica severa pero sin llegar al punto de fusión, el flujo de material plastificado se transfiere desde adelante hacia la parte posterior del pin. De esta manera se llena el hueco entre las piezas, al enfriarse deja una fase sólida de unión entre las piezas, en la figura 2.4 se puede observar este proceso. La herramienta restringe el flujo del material a un nivel equivalente a la posición del hombro. La geometría de la herramienta determina el movimiento del material alrededor del pin estableciendo los gradientes de tensión, la temperatura y la velocidad de deformación. Como consecuencia la microestructura obtenida en la unión es un reflejo de los períodos termomecánicos que experimenta. Sin embargo, una de las ventajas del proceso FSW es que la junta es recristalizada totalmente obteniendo microestructura equiaxial de grano fino. Como es conocido la microestructura de grano fino produce excelentes propiedades mecánicas [14].



**Figura 2.4** Representación del Proceso FSW [16].

La presión, fricción, y agitación que genera dicha herramienta une las piezas al estar en estado pastoso, en la figura 2.5 se identifican zonas microestructurales después de FSW. Las zonas de soldadura se dividen en distintas regiones de la siguiente manera [14]:

- **Metal base o material no modificado:** Es la zona más alejada de la soldadura, no se deforma, experimenta ciclos térmicos de soldadura y no se afecta por el calor en términos de la microestructura y propiedades mecánicas.
- **Zona afectada por el calor:** Está más cerca al centro de soldadura, experimenta ciclo térmico que afecta la microestructura y las propiedades mecánicas, no ocurre deformación plástica.
- **Zona afectada termomecánicamente (TMAZ):** Se deforma plásticamente el material. En el aluminio se obtiene la deformación plástica significativa sin recristalización.
- **Botón de soldadura:** En esta área está completamente recristalizado, también llamada zona de agitar que se refiere a la zona anteriormente ocupada por el pin de la herramienta.

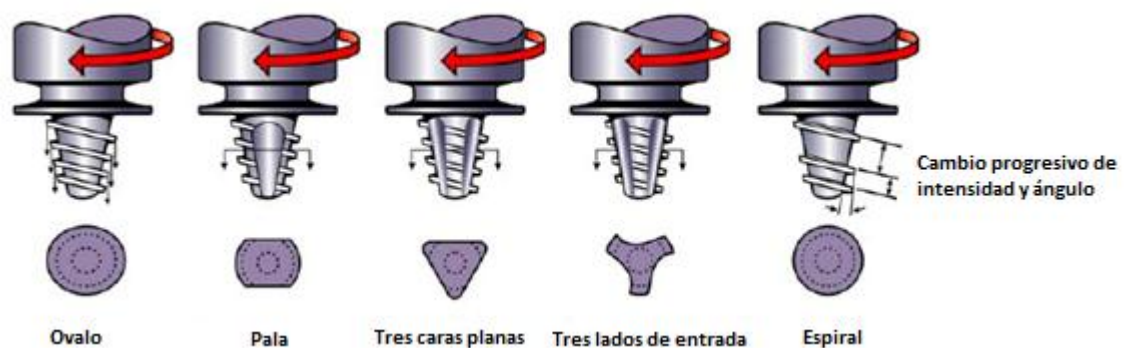


**Figura 2.5** Zonas microestructurales en la sección transversal de AA7075- T6 soldado con el proceso FSW. 1 metal base, 2 zona afectada por el calor, 3 zona afectada termomecánicamente, 4 botón de soldadura [6].

### 2.3.1 Equipo de FSW

El equipo debe tener la habilidad para realizar las operaciones principales de: avanzar a lo largo de la pieza, ajustar el pin de la herramienta, girar el pin sobre su eje y tener cierta inclinación. Además debe tener la capacidad de operar a rangos suficientemente amplios de velocidades de giros y traslación; ya que se producen grandes esfuerzos durante la soldadura, también debe tener rigidez estructural [12]. La herramienta a utilizar debe ser diseñada con precisión ya que determina el flujo de material y regula la velocidad de desplazamiento, en la figura 2.6 se observan algunas herramientas estándar empleadas en la soldadura de las aleaciones de aluminio.

En algunas ocasiones se utilizan máquinas fresadoras, pero actualmente se fabrican máquinas desarrolladas para este proceso, es importante verificar la sujeción de la pieza para el desarrollo efectivo del proceso FSW.

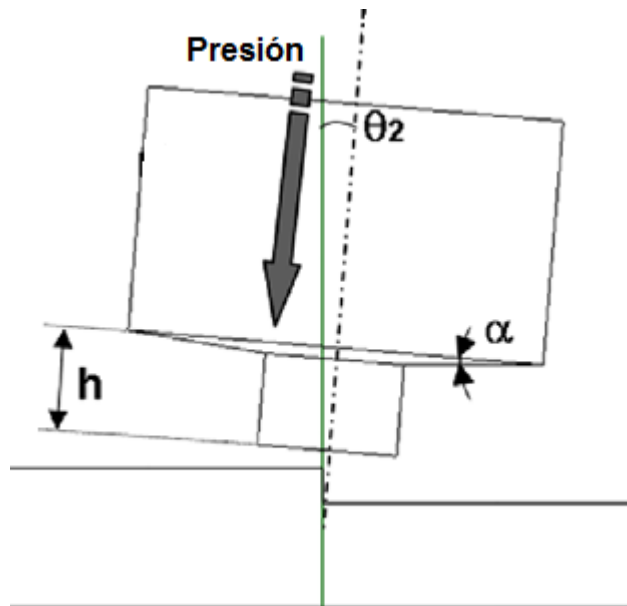


**Figura 2.6** Algunas de las formas de herramientas básicas para la soldadura por fricción. © TWI [16].

### 2.3.2 Parámetros del proceso FSW

La dimensión nominal de los granos recristalizados puede alcanzar de 3 a 7  $\mu\text{m}$ . Destacando que la eficacia en la unión es afectada por los parámetros de funcionamiento considerando la altura y forma del pin además la superficie del hombro de la herramienta, se controla el flujo de material y la generación de calor por la fricción durante el proceso. Por otra parte la presión ejercida por la herramienta y la velocidad de rotación determinan la generación de calor durante el proceso [6].

El parámetro principal del proceso FSW es el control de la fuerza en el eje Z ya que es el que permite ablandar el material y controlar la velocidad de soldadura [17]. También debe controlarse la rotación de la herramienta y el ángulo de inclinación, que suele ser bastante pequeño pudiéndose observar en la figura 2.7 [6]. En la tabla 2.5 se pueden observar los parámetros antes mencionados.



**Figura 2.7** La herramienta del proceso FSW y sus parámetros [6].

**Tabla 2.5 Principales parámetros del proceso FSW [17]**

PARAMETRO	EFFECTOS
Velocidad de rotación	Calor por fricción "agitación", rompimiento de la capa de óxido.
Angulo de inclinación	Apariencia del cordón (adelgazamiento)
Velocidad de recorrido	Apariencia, control del calor
Presión	Calor y fricción

### 2.3.3 Ventajas y desventajas del proceso FSW

El proceso de soldadura por fricción al igual que los demás procesos posee ventajas en diferentes áreas de investigación como son: metalúrgicas, ambientales y energéticas mostradas en la tabla 2.6, sin embargo también presenta algunas limitaciones importantes a considerar en la tabla 2.7.

**Tabla 2.6 Ventajas del proceso FSW [14]**

<b>METALÚRGICAS</b>	<b>AMBIENTALES</b>	<b>ENERGÉTICAS</b>
Proceso en fase sólida	No requiere gas protector	Se optimiza el uso de los materiales permitiendo la reducción de peso
Baja distorsión	Limpieza mínima de la superficie	Ahorro energético (2,5% de la energía necesaria para soldadura láser)
Buena estabilidad dimensional y la repetitibilidad	No tiene residuos	Ahorro de combustible debido a componentes más livianos en industrias aeronáutica, automotriz y naval
No hay pérdida de elementos de aleación	No requiere disolventes para desengrasar	
Excelentes propiedades mecánicas de la articulación área	Ahorro de los consumibles, tales como alfombras, cables, o cualquier otro gas	
Microestructura fina recristalizada	No emisiones nocivas	
Ausencia de grietas en la solidificación		
Suelde todas las aleaciones de aluminio		
Formabilidad		

**Tabla 2.7 Desventajas del proceso FSW [14] [18]**

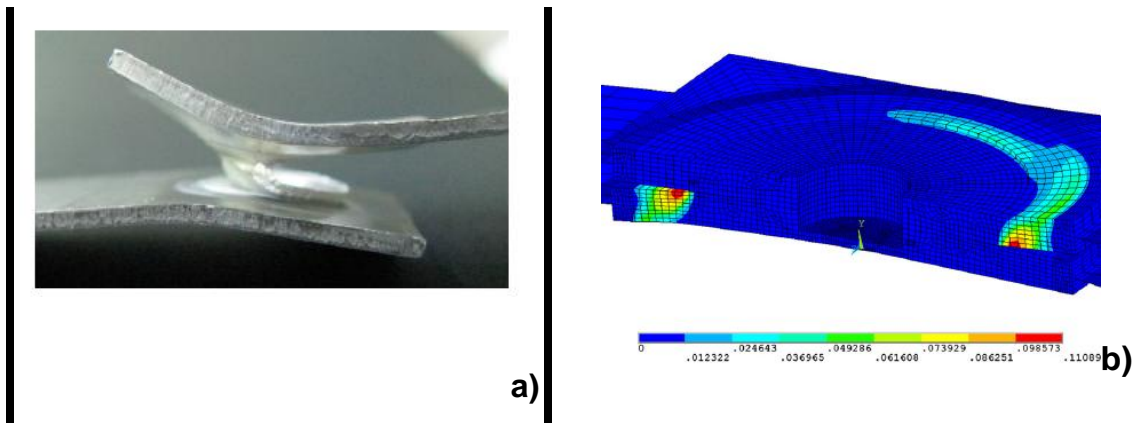
<b>DESVENTAJAS</b>
Cuando la herramienta se retira queda un orificio de salida
Requiere medios de sujeción de alta resistencia en las piezas
Menos flexible que los procesos de arco manual
Dificultades con las variaciones de espesor y lineales de las piezas a soldar
Los costos de capital por equipo y herramental son elevados
La preparación y alineación de las piezas de trabajo
La velocidad de desplazamiento es más lento que otras técnicas de soldadura por fusión
Las aleaciones de maquinado libre son difíciles de soldar.

## **2.4 Proceso FSW aplicada a aleaciones de aluminio**

El proceso FSW es un proceso de estado sólido ideal para las aleaciones de aluminio reduciendo significativamente los problemas metalúrgicos que aparecen con procesos de soldadura de arco eléctrico por alcanzar temperatura de fusión de los materiales; el FSW experimenta temperaturas relativamente menores permitiendo la producción de microestructuras y propiedades que no se pueden alcanzar con procesos convencionales [14].

La microestructura producida por FSW depende de factores como son la composición del material, parámetros de soldadura y la geometría de la

herramienta. La composición del material es importante ya que es la que determina el crecimiento de los granos conforme se ve afectada por la temperatura. En la figura 2.8 se muestra la unión en un punto por el proceso FSW, en este caso es la probeta después de haber realizado la prueba de tensión. En la imagen a) se observa la probeta que falló la prueba de tensión, y en b) es la representación equivalente del contorno de la deformación plástica durante la prueba [20]. Por lo anterior resulta favorable el aplicar simulación para determinar la combinación de los parámetros adecuados y así obtener buena soldadura.



**Figura 2.8** Unión mediante el proceso de FSW [20].

### 2.4.1 La recristalización en aleaciones de aluminio

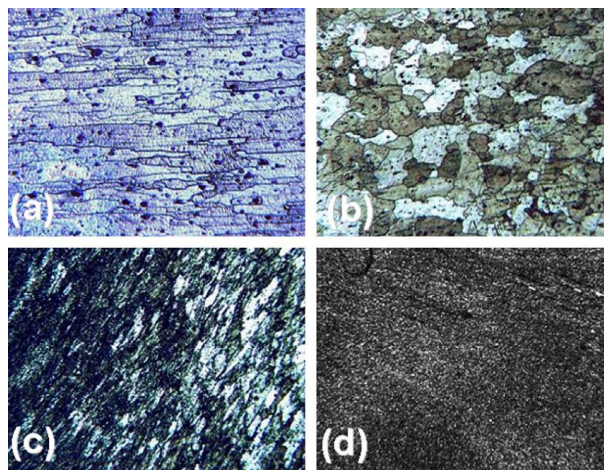
El aluminio debido a sus composiciones y la forma del producto posee una variedad en el tamaño de grano y en su forma. En el proceso de unión FSW la estructura se recristaliza completamente, esto es debido que en las placas de aluminio el deslizamiento transversal de la herramienta se facilita. Los granos se crean por la deformación gradual provocada por la rotación del material; existe la recristalización dinámica que produce pequeños granos equiaxiales, mientras que en la recristalización estática se forman nuevos granos después



de detener la deformación. La temperatura máxima alcanzada en el proceso y la velocidad de enfriamiento es importante ya que dependiendo que tan mayor sea el pico de temperatura, mayor será el tamaño de grano, de esta manera se observa que la temperatura es la que tiene mayor influencia. Es importante aclarar que la recrystalización dependerá íntimamente de la aleación a utilizar [14].

En el estudio realizado por Kim D. (2009) en las aleaciones de aluminio AA5083-H18, determinó que el control de algunos parámetros como los campos de temperatura y las historias de deformación proporciona información útil para el crecimiento de grano anormal, este fenómeno produce menor resistencia y ductilidad durante el tratamiento térmico después de la soldadura específicamente en esta zona [21].

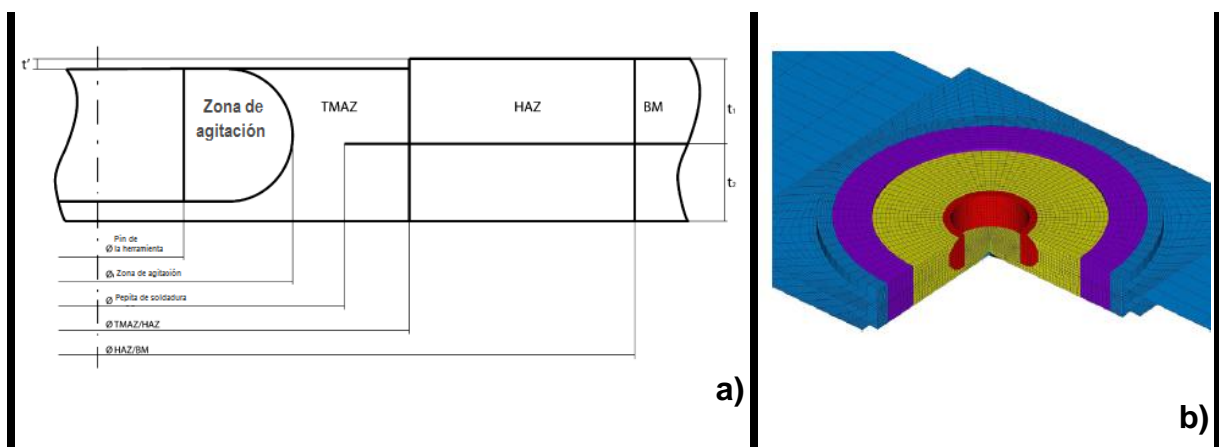
Además Buffa G. (2007) experimentó sobre el proceso FSW aplicado a una aleación AA7075-T6 en la figura 2.9 se puede observar el tamaño de grano promedio del material original aproximadamente de 80  $\mu\text{m}$  en la figura a, la zona afectada por el calor en la figura b con un grano promedio ligeramente agrandado, la zona afectada termomecánicamente en la figura c y finalmente la pepita de soldadura en la imagen observando el área recrystalizada con granos finos [6].



**Fig. 2.9** Zonas de soldadura en AA7075-T6 [6].

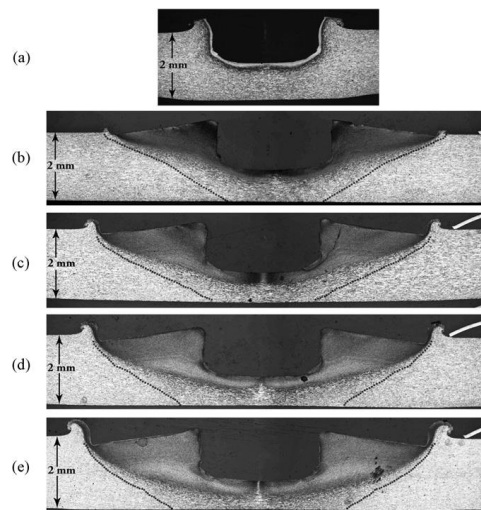
## 2.4.2 Desarrollo microestructural de las aleaciones de aluminio unidas mediante FSW

Como se ha estado mencionando a lo largo de este documento el flujo plástico y el calor producido en la rotación de la herramienta determina la microestructura resultante en la unión de las piezas, en la figura 2.10 se pueden describir zonas de deformación con diferentes características para recrystalizar desde el límite de la herramienta hasta llegar al pin. Más alejado al pin está el material base el cual no es afectado metalúrgicamente, hacia el centro se encuentra la zona afectada por el calor (HAZ) donde el material modifica las propiedades y la microestructura empieza a ser modificada, la zona siguiente se deforma plásticamente ya que es termomecánicamente afectada (TMAZ) por la agitación de pin, generando un aumento en el tamaño de grano, finalmente se encuentra la zona donde se recrystalizan los granos de tamaño fino y uniforme [21]. La geometría de la unión se determina por la penetración de la herramienta y la carga aplicada sobre la unión, entre otras, estas características establecen la profundidad de la marca del hombro y el pin de la herramienta así como sus diámetros, en la figura 2.11 se puede observar un estudio realizado sobre la evolución de la microestructura en una aleación de aluminio 7075, la figura a) es antes de que la herramienta tenga contacto, b) a 0.2 mm de penetración, c) después de 5s, d) después de 1s, e) después de 2s [22].

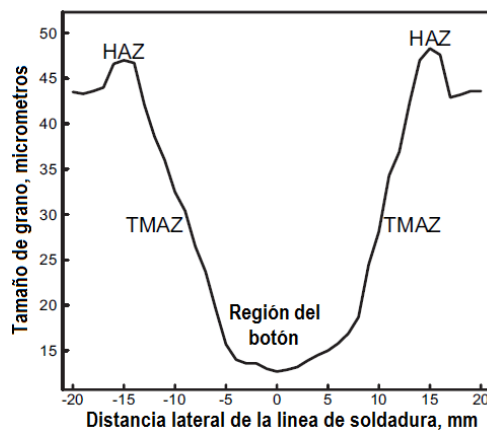


**Figura 2.10** Zonas de deformación con diferentes características a) Descripción desde la zona de agitación b) Modelo de las zona en con el método de elementos finitos [20].

La evolución de la microestructura se estudió por M Grujicic (2009) agrupando las características microestructurales como son el tamaño de grano, densidad de dislocaciones, densidad numérica de dispersión; en un solo parámetro mencionado como la deformación plástica efectiva equivalente como se muestra en la figura 2.12 las variaciones del tamaño de grano respecto a la distancia desde de la línea de soldadura, mostrando una microestructura de tamaño firme en la zona de agitación y una microestructura de grano más grande en la zona afectada por el calor [23].



**Figura 2.11** Evolución microestructural en una aleación 7075, a) es antes de que la herramienta tenga contacto, b) a 0.2 mm de penetración, c) después de 5s, d) después de 1s, e) después de 2s [22].



**Figura 2.12** La variación espacial del tamaño de grano en el proceso FSW [23].

### 2.4.3 Propiedades mecánicas en las aleaciones de aluminio unidas mediante el proceso FSW

Las ventajas del proceso de FSW sobre los procesos convencionales, en la unión de las aleaciones de aluminio son: una zona estrecha afectada por el calor, microestructura de grano forjado, no existe porosidad y no se utiliza material de aporte. Si el proceso se realiza correctamente la microestructura resultante permitirá que la zona de soldadura tenga alta resistencia a la fatiga y a la tensión y será dúctil, por los parámetros del proceso existen condiciones que se deben controlar como las que se muestran en la tabla 2.8 los cuales determinan las propiedades posteriores a la soldadura [14]:

**Tabla 2.8 Parámetros que determinan las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio [14]**

Velocidad de rotación herramienta	Gradientes de temperatura
Velocidad de desplazamiento de la herramienta	Velocidad de enfriamiento
El diseño de la herramienta	PWHT
Diámetro del hombro	Conjunto de diseño
Inclinación de la herramienta	Superficie de óxidos
Espesor del material	Prueba de tamaño de la muestra, la ubicación y orientación
Composición de la aleación	Disipador de calor

### **2.4.3.1 Propiedades de tensión**

El ensayo de tensión es la prueba común con la que puede observarse la calidad de la soldadura en el proceso FSW después de la inspección visual. En el aluminio la soldadura es más blanda por lo tanto la deformación no es uniforme, sin embargo, existen técnicas para medir límites de elasticidad del material y se ha observado que las soldaduras son generalmente bastante dúctiles [24].

### **2.4.3.2 Fatiga**

Este punto es de importancia si la estructura soldada con el proceso FSW está diseñada sobre la base de la tolerancia al daño. El comportamiento de estas soldaduras está regulado por la concentración de esfuerzos geométricos o por las zonas afectadas térmicamente, la primera puede desaparecer al mecanizar la pieza pero el segundo es inevitable pero puede ser reducido modificando los parámetros del proceso, la fatiga de una estructura puede estar relacionada totalmente con la tensión residual [24].

### **2.4.3.3 Esfuerzos residuales**

Los esfuerzos residuales se presentan en menor cantidad en este proceso que en los de fusión, tiene gran influencia con el crecimiento de las grietas [24].

### **2.4.3.4 Corrosión**

La información referente de este punto es limitado sin embargo se pueden presumir algunos resultados, generalmente se ha observado que el comportamiento de la corrosión es equivalente al metal base empleado en este proceso [24].

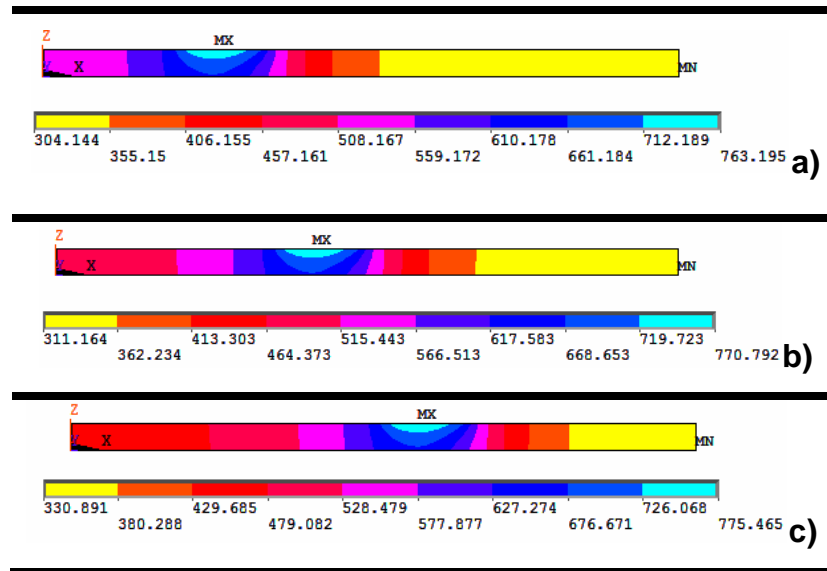
#### 2.4.4 Distribución de temperatura y flujo de metal

El proceso FSW es relativamente nuevo, es por eso que en la actualidad se realizan exámenes experimentales y modelaciones analíticas para emplearlo exitosamente en cada una de las diferentes aplicaciones. Por lo cual se pretende comprender los parámetros que afectan el proceso de soldadura, determinando que se necesita especial atención en los mecanismos de formación de la junta ya que están íntimamente relacionados.

En los mecanismos de formación de la junta se estudia la temperatura en la soldadura refiriéndose a la generación de calor producido entre la herramienta y la pieza de trabajo, y el flujo de los materiales poniendo especial atención a la disipación plástica dentro de la pieza de trabajo; es de importancia atender estos mecanismos para así lograr considerar los efectos de los parámetros del proceso y determinar la plasticidad y el flujo necesaria en el proceso de FSW para obtener una soldadura eficaz [14].

En un estudio realizado por N. Rajamanickam, V. Balusamy (2007) se determinó que el comprender la transferencia de calor, aunque es un tema complicado, ayudará a predecir la calidad de la soldadura obtenida y otras cuestiones como la duración de la herramienta, este estudio indicó que la temperatura alcanzada durante el proceso FSW es de un 80% al 90% de la temperatura del punto de fusión, tomándose en cuenta solo la entrada de calor desde el hombro de la herramienta y tomando como constante el calor generado por la fricción entre la herramienta y el metal base, este modelo se elaboró con la intención de predecir los ciclos térmicos durante la soldadura, utilizando la simulación por el método de elementos finitos con un programa de cómputo comercial Ansys. En la figura 2.13 se pueden observar las temperaturas en diferentes intervalos de tiempo de 18.9s, 27.9s y 36.9s a lo largo de la línea de soldadura, también se demuestra en este estudio que la temperatura calculada para el 27.9 s es similar a 36.92 lo que determina que la

transferencia de calor es constante durante el proceso FSW, definiendo el campo de temperatura se puede determinar los esfuerzos residuales en las placas soldadas [19].



**Figura 2.13** Temperaturas simuladas en intervalos de tiempo de a) 18.9, b) 27.9 y c) 36.9s, sobre la línea de soldadura [19].

#### 2.4.4.1 Generación de calor

La generación de calor en el proceso FSW es por la fricción de la herramienta sobre la junta a unir y la disipación de la zona plástica durante la agitación del material, los parámetros que dominan la generación de calor son la conductividad térmica de las piezas de trabajo, el pin de la herramienta y la geometría de la herramienta de soldadura, comprobando de esta manera que las soldaduras con mas alta velocidad de rotación en la herramienta y baja velocidad de desplazamiento generan más calor que las soldaduras con rotación de la herramienta más bajas a velocidades de desplazamiento más altas [14].

La generación de calor se produce hombro– pieza. La cantidad de entrada de calor de la herramienta y el pin se estima que desde el 2% al 20% [25]. Conforme la temperatura del material de soldadura aumenta, éste se ablanda, reduciendo el par y produciendo menos calor al material por trabajo mecánico [26].

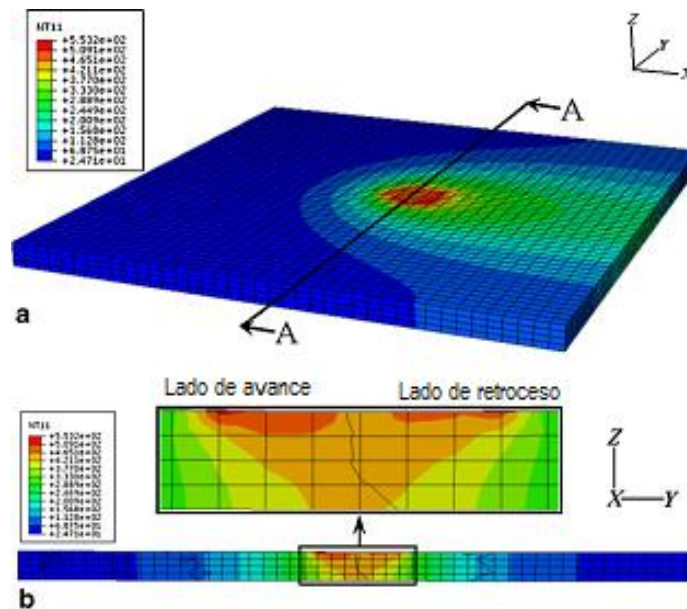
#### **2.4.4.2 Presión de la herramienta**

En la temperatura generada por la fricción la presión tiene gran influencia ya que controla el gradiente de temperatura en la zona de soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial [27]. Esta presión debe ser constante y adecuada para mantener las superficies de unión en contacto, de esta manera la fricción permanece y la calidad de soldadura será satisfactoria de lo contrario se podrían presentar efectos de la herramienta sobre el material resaltando que la presión específica dependa de los materiales que se van a unir y de la geometría de la unión [16].

El impacto que tiene la herramienta por su velocidad en la distribución del calor y de las tensiones que esto genera se ha estudiado por Mohammad Riahi & Hamidreza Nazari (2010) con la ayuda de la simulación numérica por el método de elemento finito. El estudio se realizó en dos etapas, en la primera se enfocó a estudiar el comportamiento térmico de la pieza al ser sometido por el proceso FSW, determinando que el calor se genera por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Mientras que en la segunda etapa el estudio se enfocó hacia la generación de esfuerzos residuales. El trabajo de la herramienta comienza después de un calentamiento previo entre la placas, se mueve hacia adelante forjando el material y de esta manera se realiza la unión de las placas, según el material la herramienta puede estar con cierto ángulo de inclinación. La diferencia entre la velocidad de la herramienta y la fricción determinará la distribución de calor generado, siendo este entre el 79% en la



herramienta y 21% en el pin de la herramienta. En este estudio se determinó que las propiedades de soldadura no están dadas por la deformación mecánica sino por la potencia térmica, concluyendo de esta manera que las temperaturas más altas están en la región debajo del hombro y no tienen simetría respecto a la línea de soldadura esto se puede observar en la figura 2.14 [27].



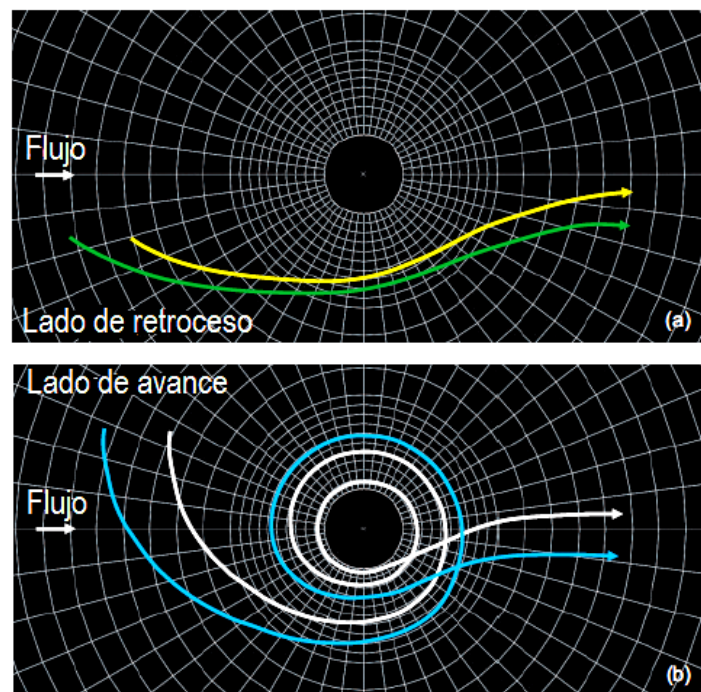
**Figura 2.14** Distribuciones de temperatura en la pieza de trabajo [27].

#### 2.4.4.3 Flujo de material

Los parámetros de soldadura, los materiales y las herramientas empleadas controlan el flujo del material, al insertar el pin y empezar a girar, la temperatura se eleva ablandando la zona por donde pasa, arrastrando el material mecánicamente durante el proceso, transportándolo alrededor de la herramienta en sentido del giro para después ser depositado sobre el lugar de

la soldadura [14]. El calor generado determina el tamaño del cordón de soldadura.

Según la intersección del pin y el sentido de giro el material se dividen en dos zonas el lado de avance y el lado de retroceso como se puede observar en la figura 2.15, la fricción y la rotación durante el proceso impulsan el material que puede penetrar en el espesor o girar varias veces alrededor del pin, de la zona trasera el material es llevado en la parte delantera de la herramienta y depositado [16].

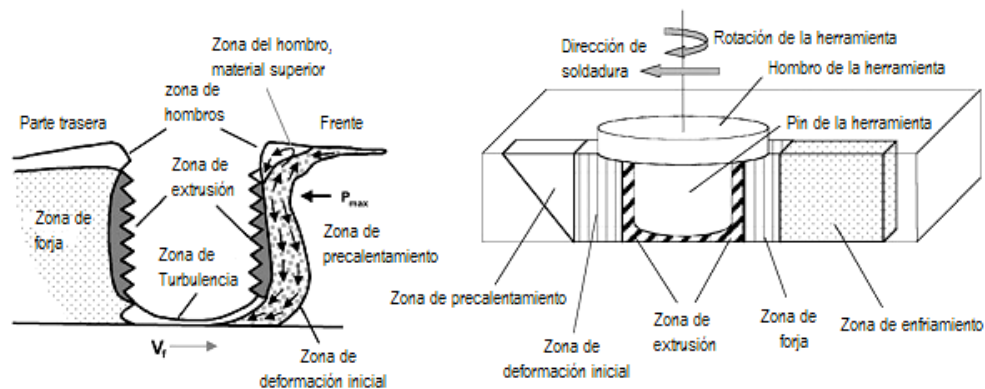


**Figura 2.15** Trayectorias del avance (a) Lado de retirada y (b) Lado de avance [23].

En el estudio realizado por Arbegast (2003) elaboró un modelo el cual explicaba el flujo del material con 5 períodos, los cuales se mencionan a continuación y se pueden observar en la figura 2.16 [14]:

- **Pre calentamiento:** La herramienta rotativa genera el calor y precalienta el material antes del avance.
- **Deformación inicial:** El movimiento de rotación genera esta zona en el metal ablandado.
- **Extrusión:** El metal es deslizado alrededor de la herramienta y forzado hacia arriba y hacia abajo, dejando libre el pin al ir avanzando.
- **Forja:** Al salir de la zona de extrusión, la parte trasera del pin pasa por encima del material garantizando la consolidación.
- **Enfriamiento posterior a la soldadura:** Al ir avanzando la herramienta el material se enfría por medios pasivos o forzados.

Además el modelo permite explicar la soldadura resultante, determinando las diferencias microestructurales en el botón de soldadura las cuales se refieren a procesos asimétricos de flujo que ocurren alrededor de la línea central de la soldadura, también describen algunos defectos comunes por la falta de flujo relacionado totalmente con los parámetros del proceso, como un “agujero o efecto túnel” a lo largo de la soldadura por la presión insuficiente bajo el hombro de la herramienta.



**Figura 2.16** Flujo de material descrito por Arbegast [14].

El material se puede percibir en tres estados: por delante de la herramienta deformada, debajo de la herramienta extruido y por detrás de la herramienta forjado. Por lo anterior se podría decir que existe una simetría en los dos lados de avance del material. Por el flujo que lleva el materia en forma de anillos se dice que tiene características de “cebolla” ya que el material se transporta de adelante hacia atrás sobre la herramienta. Las condiciones en las que está sometido el material son de deformación plástica por lo que en la línea de soldadura ocurre una alta recristalización de la microestructura. Para realizar este experimento se tomaron en cuenta ciertos puntos como la posición de la herramienta, la velocidad de rotación y la presión de la herramienta sobre el metal base, con esto se logró un flujo constante del material. De esta manera se puede deducir que el 30% del calor es generado por la deformación plástica del material y aumenta según el viaje y la velocidad de la herramienta, además se prueba que existe una asimetría en la distribución de la deformación plástica por las diferencias en el flujo de material del lado de avance y retroceso [23].

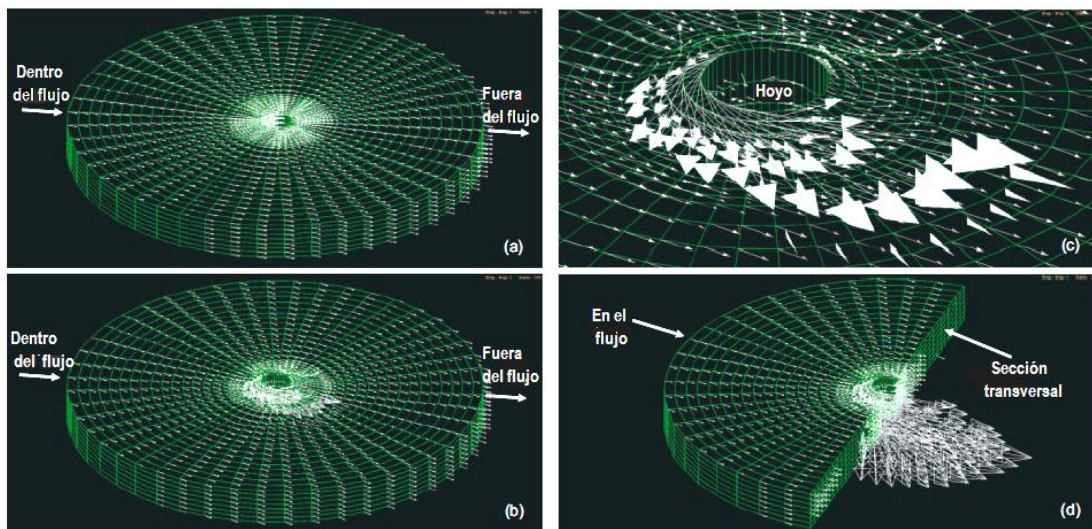
#### **2.4.4.4 Trabajo termomecánico**

Para unir los materiales el FSW depende de la deformación mecánica de los materiales de soldadura en caliente, dependiendo de la geometría de la herramienta usada, el comportamiento de la temperatura del material, el refinamiento microestructural y el flujo del material. El campo de investigación se refiere a entender el nivel de plasticidad necesaria para obtener un proceso FSW efectivo y la mezcla de parámetros necesarios para la obtención de una soldadura satisfactoria [14].

La región que se afecta termomecánicamente es el botón de soldadura en la cual la alta temperatura la somete a deformación hasta alcanzar recristalización, esta región depende de la resistencia del material, las más

resistentes tiene una región estrecha. Las variables que determinan las propiedades de las pepitas de soldadura son la temperatura máxima y la velocidad de enfriamiento, destacando que el tamaño de grano es determinado principalmente por la temperatura máxima en la soldadura. Al manipular los parámetros del proceso de soldadura se pueden obtener diferentes tamaños de granos en la pepita [22].

En la figura 2.17 se puede observar el trabajo termomecánico que se desarrolla durante el proceso de FSW en diferentes tiempos, se basa en la velocidad de la herramienta en la figura a) se observa el estado inicial del proceso  $t=0s$ , en el b) en esta imagen el proceso se muestra en desarrollo  $t=0.5s$ , observando estas figuras se determina que el campo inicial se transforma rápidamente en un campo de velocidad que produce la región de agitación justo debajo de la herramienta, en la figura c) se puede observar un plano de la misma región; en el cual se aprecia el flujo del material producido por la agitación de la herramienta y la dirección de avance, la figura d) es la misma sección vista desde una sección transversal [23].



**Figura 2.17** Trabajo termomecánico en la pieza [23].

## **2.5 Simulación del proceso de soldadura FSW en programas de cómputo que emplean el método de elemento finito**

El realizar simulaciones matemáticas de procesos ha provocado una gran evolución en la industria, sobre todo en las diferentes ramas de la ingeniería, ya que por este método se han desarrollado la mayoría de los procesos industriales con la ventaja de reducir costos.

En lo que se refiere al FSW se ha empleado la simulación para comprender los mecanismos que dan lugar a la manifestación de los fenómenos tales como transformaciones de fase y morfología de estas [28].

Para llevar a cabo la simulación es importante desarrollar un proceso de modelación y tomar en cuenta las variables de entrada, de salida y el entorno en el cual se desarrollará el proceso. La modelación puede realizarse por diferentes métodos según la complejidad del problema a resolver y de la solución que se requiera de este, pudiendo emplear dos métodos diferentes: el analítico o el matemático, expuestos más adelante [29]. El método matemático es de complejo desarrollo pero la mayoría de los trabajos en lo que se refiere a FSW lo aplica, desarrollando modelos idealizados y despreciando ciertos factores que carecen de importancia, según el resultado a obtener. Esta idea es válida en la simulación del proceso FSW por su enorme número de factores o variables que intervienen en el desarrollo de los fenómenos estructurales de los materiales usados para la unión [28].

### **2.5.1 Modelación**

La modelación es de gran ayuda para estudiar sistemas complejos que son imposibles de estudiar por medio de la experimentación directa, por lo tanto es

posible estudiar el proceso FSW desarrollando gran variedad de modelos para entenderlo y mejorarlo [14].

Según Aracil (1983) “Un modelo constituye una representación abstracta de un cierto aspecto de la realidad, y tiene una estructura que está formada por los elementos que caracterizan el aspecto de la realidad modelada y por las relaciones entre estos elementos” [29], haciendo posible estudiar el comportamiento del sistema original.

Existen diversos tipos de modelos que se clasifican según su aplicación [29]:

- **Mentales:** Son las representaciones que se utilizan para explicar cómo funciona el mundo real, basándose en las creencias sobre el sistema
- **Semánticos:** Es la formalización lingüística de un modelo mental
- **Físicos:** Modelos tangibles a pequeña escala, teniendo una similitud entre el modelo y el sistema real
- **Analógicos:** Son modelos que se plantean utilizando sistemas afines. Por ejemplo el flujo de electricidad puede simular en flujo del agua en algunos casos
- **Numéricos:** Su representación está basado en las matemáticas. La modelación matemática es empleada ya que describe los fenómenos de las ciencias aplicadas, además de actividades técnicas e industriales, y mediante relaciones matemáticas se obtienen las características esenciales de un sistema para predecir o controlar su evolución. En general la construcción de un modelo matemático se basa en dos ingredientes principales: Leyes generales y relaciones constitutivas, la combinación de ambos es una ecuación diferencial parcial o un sistema de ellas [30].

Esta clasificación ha avanzado según las investigaciones y la complejidad de los sistemas, teniendo en cuenta que las conclusiones arrojadas por los

modelos dependen en gran medida de la validez del modelo empleado, además se consideran como hipótesis científica hasta ser aprobadas por evidencias empíricas de acuerdo al diseño del autor ya que la naturaleza es muy compleja para captarse por un modelo simple [29].

En la actualidad los modelos ampliamente utilizados son los modelos matemáticos ya que son los más versátiles, se aplican a programas de cómputo y pueden realizarse cambios fácilmente según las variables del sistema a modelar [31].

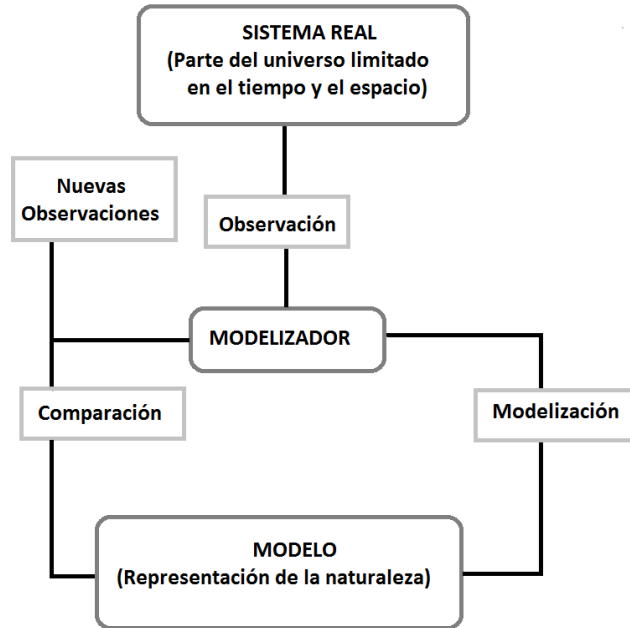
Para desarrollar la solución de un modelo se observaran los siguientes puntos [29]:

- **Tamaño del problema:** Determina qué y cuantas variables o ecuaciones se tendrán en cuenta para formular el modelo
- **Tipo de problema:** El tipo de problema es definido por el tipo de ecuación constitutiva. Si esta es de un comportamiento lineal, donde la variable principal es función de otras variables, o no lineal donde la variable importante ajusta sus valores de cambio como una función de dichos cambios [28].
- **Tipo de instancias utilizadas:** Existen métodos que determinan el comportamiento del sistema en un estado realista, y considera las probabilidades de ocurrencia de los eventos que conducen al cambio final del sistema o a los resultados posibles de solución [28].

Las fases de la modelación nos permiten conceptualizar el problema definiéndolo y seleccionando los datos del proceso, con esto se puede realizar la formulación matemática del modelo y/o del programa computacional logrando analizar los datos, evaluarlos y validando el modelo del sistema a estudiar. En la figura 2.18 se puede observar el proceso ideal de modelación, en el cual se muestra las fases antes mencionadas. Haciendo énfasis en que los modelos deben realizarse de la manera más simple posible y tener identificadas las



variables más significativas que pertenecen al sistema y al medio que lo rodea [29].



**Figura 2.18** Proceso ideal de modelización [29].

### 2.5.2 Método analítico

El método analítico consiste en aislar el problema que se desea resolver de manera tal que se pongan de manifiesto aquellos factores más importantes que influyen en los resultados de los fenómenos micro y macroestructurales. Hacer esto, nos permite simplificar un tanto el problema y amplia nuestra capacidad de percepción y comprensión de los eventos que ocurren en el proceso [32].

## 2.5.2 Método numérico

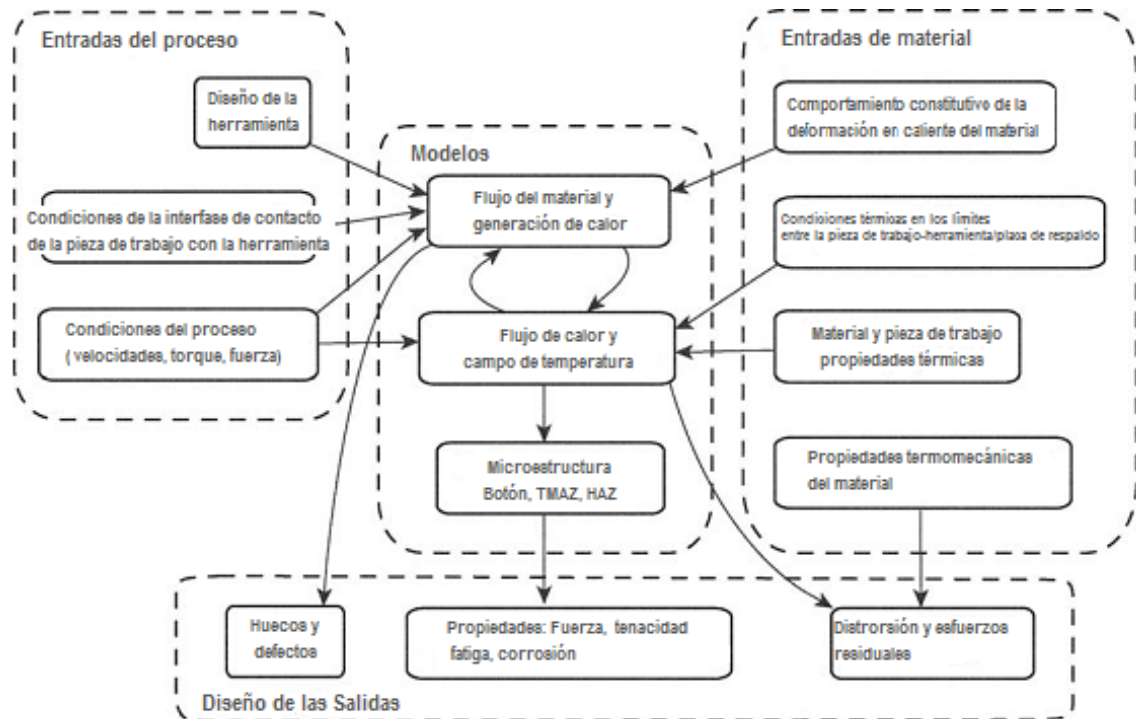
Los métodos numéricos son técnicas para resolver problemas con cálculos aritméticos y lógicos, se precisa una lista finita de instrucciones dependiendo totalmente del algoritmo implementado. Para el proceso FSW es común emplear el método numérico ya que es más ventajoso que el método analítico [14]. En estudios realizados se emplean el método de elemento finito y el de volumen finito según se requiera. La justificación para realizar el análisis de este proceso por medio del método de elemento finito es el resolver el sistema sin tener que construirlo físicamente.

Debemos tomar en cuenta que un modelo matemático ofrece una solución aproximada al problema, donde dicha aproximación es función de la carga matemática y computacional que se desarrolla [31]. Esta carga matemática y computacional son a su vez función de la exactitud de la ecuación constitutiva que describe al fenómeno [28].

Para el caso particular de esta monografía se analizó la modelación empleada en el estudio de materiales donde se toma en cuenta el flujo plástico, el estado general de esfuerzos y deformaciones en el material.

Descansando en los fundamentos termodinámicos y de la mecánica del medio continuo, donde se excluyen los efectos de discontinuidades en el material, lo cual hace más efectiva la comprensión de la selección del modo de trabajar materiales tales como aleaciones complejas y otros materiales especiales, destacando la importancia de conocer el comportamiento de los materiales y su respuesta a las diferentes técnicas de unión, particularmente del proceso FSW [30], En la figura 2.19 se pueden observar un modelo a grandes rasgos, el cual contiene los parámetros del proceso y la interacción que existe entre ellos, de esta manera se pueden apreciar los fenómenos físicos que participan en este proceso [14].

En el desarrollo de modelación dinámica de los materiales es necesario formular ecuaciones constitutivas, son importantes ya que describen la relación existente de las variables en el proceso como lo son: la temperatura a diferentes niveles de deformación, velocidad efectiva de deformación y esfuerzo efectivo [28].



**Figura 2.19** Modelo general del proceso FSW [14].

Las ecuaciones constitutivas son únicas para el material y puede emplearse en condiciones diferentes del proceso, por lo anterior son desarrolladas por datos empleados en experimentos simples pudiéndose ampliar a modelos más complejos empleando hipótesis, por lo anterior se pueden analizar diferentes procesos con diferentes materiales mediante el método de elemento finito [30].

## 2.5.4 Método de elemento finito

El análisis por elemento finito (FEM por sus siglas en inglés) un método numérico relativamente nuevo, es un modelo aproximado el cual contiene las variables básicas, permitiendo modificar el prototipo ahorrando tiempo y costos. En la actualidad los avances informáticos permiten crear variedad de programas que desarrolla los cálculos con elementos finitos, pero es importante resaltar que se debe tener un amplio conocimiento sobre los principios del elemento finito y los materiales a trabajar para obtener un análisis real [32]. En esta sección se abordan los conceptos básicos del método para conocer su fundamento y los programas computacionales que lo utilizan para desarrollar experimentaciones en el proceso FSW en aleaciones de aluminio.

El FEM consiste en discretizar un espacio mediante subdominios llamados elementos. Algunos modelos requieren una discretización en el tiempo la cual se lleva a cabo a través de una ecuación iterativa en el tiempo y no mediante un espacio elemental. En cada elemento existen puntos de cálculo llamados nodos, que son los puntos en los cuales se determinan los valores de la variable o variables del modelo. La distribución de los nodos está definida por un aspecto matemático conocido como lineal o cuadrático. Para emplear el FEM se deben tomar en cuenta los siguientes puntos [32]:

- **Dominio:** Es un espacio geométrico limitado por las fronteras del sistema.( lineal, bidimensional, tridimensional)
- **Condiciones de entorno:** Conocidas como condiciones de frontera. Estas condiciones imponen los valores de la variable o variables en los límites del sistema y tienen una influencia absoluta sobre las variables en el interior del sistema. Debemos notar que las variables impuestas influyen mediante el tipo de frontera del sistema, ya que esta permite tener una variable impuesta o de valores fluctuantes sin intervención sobre los valores internos del sistema

- **Incógnitas:** Son variables del tipo como desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.

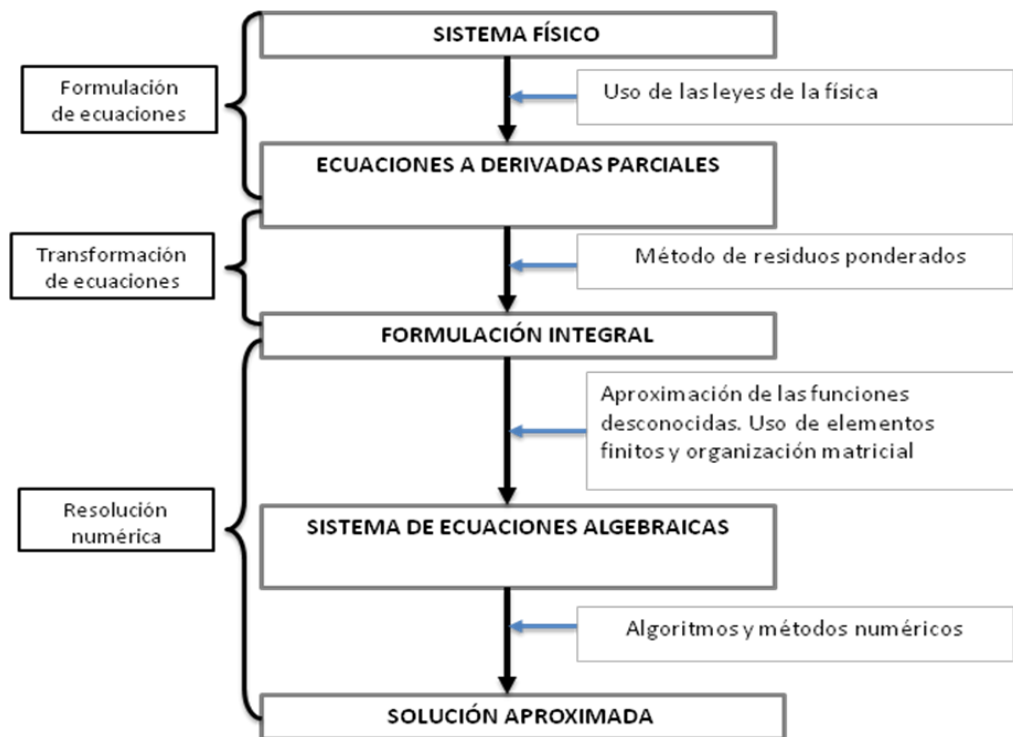
De acuerdo con Salazar G. (2011) “El método de Elemento Finito es una técnica numérica para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales con valores iniciales y valores a la frontera”, para realizar este método se describen y se formulan los conceptos básicos [30].

Se divide el dominio de solución según sea conveniente en un número de polígonos llamados elementos, en estos se describe el comportamiento de las variables del dominio definiendo un adecuado número de parámetros, los elementos se conectan entre sí por nodos que son los puntos de cálculo ubicados en las fronteras [30].

En los nodos se observan las incógnitas fundamentales del problema, los nodos se dividen en grados de libertad y estas son las variables que determinan el estado de los nodos en el objeto, por ejemplo desplazamiento en dirección  $x$  desplazamiento en dirección  $y$  y giro según  $z$ . El sistema evoluciona hasta un estado final por las condiciones de contorno y conociendo los valores de los grados de libertad se pueden predecir incógnitas de salida como tensión, deformación y la evolución de la temperatura. Con los valores que tomen los grados de libertad se puede interpolar o relacionar el valor de la variable nodal dentro del elemento [32].

Después de identificar los nodos se realiza un ensamble matemáticamente en un sistema de referencia global combinando los modelos de cada uno de los elementos y tratando de que se cumplan simultáneamente en todos los elementos las restricciones que se les ha impuesto; es importante señalar que el comportamiento de todo el sistema se toma en cuenta al ensamblar todos los elementos. El ensamble antes mencionado lleva a un sistema de ecuaciones algebraicas que al ser resueltas nos proporcionan una solución

aproximada. En la figura 2.20 se muestra el esquema que describe de manera general la aplicación del método de elemento finito para algún sistema físico que se desee estudiar [33].



**Figura 2.20** Esquema general de la metodología que se emplea para aplicar FEM, a la solución de un problema físico [30]

La metodología del esquema general sigue los pasos mencionados a continuación [30]:

1. Observar el sistema físico de estudio
2. Aplicando las leyes de la física necesarias, realizar las ecuaciones a derivadas parciales que rijan el sistema
3. Emplear el método de residuos ponderados para transformar las ecuaciones obtenidas en el paso anterior a una formulación integral

4. En la formulación integral, se aproximan las funciones desconocidas de tal manera que la solución aproximada se acerque lo más estrechamente posible a la solución continua verdadera
5. Al emplear este método se tiene que considerar, puntos mencionados anteriormente como:
  - El continuo se divide imaginariamente en un número finito de elementos
  - Los elementos finitos se conectan entre sí mediante nodos
  - Las variables fundamentales del problema son los grados de libertad
  - Se toman un conjunto de funciones que definan de manera única el comportamiento del sistema discreto dentro de cada elemento finito
  - Estas funciones, junto con las condiciones iniciales del sistema y las propiedades constitutivas del material, definirán el comportamiento en todo el elemento y por consiguiente también en sus contornos

Los elementos que se necesitan para desarrollar el FEM son [32]:

- **Ecuaciones de equilibrio:**

Se realizan aproximaciones mediante ecuaciones, por la dificultad o por si no se llega a resolver el sistema.
- **Funciones de interpolación:**

Determinar el conjunto de funciones que precisen el campo de desplazamiento dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos del mismo.
- **Síntesis de las características globales:**

Las matrices se realizan para cada nodo, transformando a coordenadas unitarias, estas matrices quedan en función de los parámetros geométricos, facilitando de esta manera a la integración numérica. Las matrices deben de estar formuladas respecto al mismo sistema por lo tanto es necesario realizar la transformación a coordenadas globales,

después se puede realizar el acoplamiento del sistema sumándolos en nodos el estado de cada elemento.

- **Imposición de condiciones de frontera. Solución:**

Para resolver un sistema se debe de asignar las variables que sean conocidas, para facilitar el sistema se puede dividir en dos términos: uno que contenga las variables conocidas y otros las incógnitas.

De manera resumida Salazar G. (2011) concluyó que “El FEM consiste en utilizar una aproximación mediante el uso de subdominios o elementos en los cuales se emplean funciones incógnitas para discretizar una forma integral global en formas integrales elementales las cuales conducen a la definición de matrices elementales y matrices globales; resultando de esta manera, un sistema de ecuaciones algebraicas que permiten una solución aproximada del problema” [30].

## **2.5.5 Programas de cómputo para la simulación del proceso**

### **FSW**

Como se puede observar la técnica de elemento finito es ampliamente utilizada en el área de la ingeniería, ya que existe la necesidad de solucionar problemas industriales por medio de ecuaciones diferenciales o derivadas parciales, a partir de un modelo ya establecido. Los programas de simulación que emplean el método de elemento finito, permiten tomar esquemas del sistema convirtiéndolos en malla de puntos, de esta manera generan la descripción del sistema incluyendo las condiciones del sistema, la geometría y las propiedades de los materiales [31]. Se tiene que definir el problema de tal manera que la manipulación del sistema sea permisible mediante el computador, para que disminuya el número de cálculos necesarios aprovechando las simetrías y sea un procesamiento eficiente.



El sistema de cómputo manipula fácilmente las matrices por lo tanto el problema se tiene que plantear en forma matricial, formando ecuaciones algebraicas lineales o no lineales que resuelven los valores de los grados de libertad en los nodos del modelo. La gran ventaja para emplear los diferentes programas de cómputo es que permiten repetir el proceso de solución variando las condiciones de análisis y optimizar el sistema [34].

En el proceso de soldadura por fricción existen fenómenos termomecánicos que rigen la recristalización de la zona de soldadura, por lo tanto es posible estudiar este proceso con la ayuda de un simulador por FEM, para comprender los procesos físicos y condiciones que predicen la soldadura resultante [28].

Es importante recalcar que para emplear algún programa de cómputo que trabaje con FEM se debe plantear con exactitud lo que se pretende obtener con el análisis, además de establecer las variables conocidas más importantes que influyen en el sistema. En diferentes estudios se toman en cuenta las variables necesarias según el alcance del proyecto, de esta manera los resultados varían según lo que se esté estudiando [32].

### **2.5.5.1 ANSYS**

Es un programa de cómputo de simulación que emplea el FEM, proporciona soluciones de manera rápida, eficiente y rentable pasando por una serie de pasos como son el diseño del problema, análisis de la prueba y la validación [35]. Es ampliamente utilizada en diversos campos de la industria ya que permite diseñar y realizar cambios con ayuda de la simulación, prediciendo su funcionamiento y evitando costos.

Ansys tiene las siguientes características que determinan el análisis de los problemas que en él se resuelven [35]:

- **Integrado:** Se asocia con otro software de diseño asistido por computadora, además permite incluir documentación necesaria por el usuario
- **Modular:** El programa de cómputo permite que el usuario pueda solucionar el problema por partes, teniendo diferentes módulos
- **Extensible:** Se tienen adaptaciones más específicas según se requiera

El proceso de solución de Ansys se registra en tres módulos [35]:

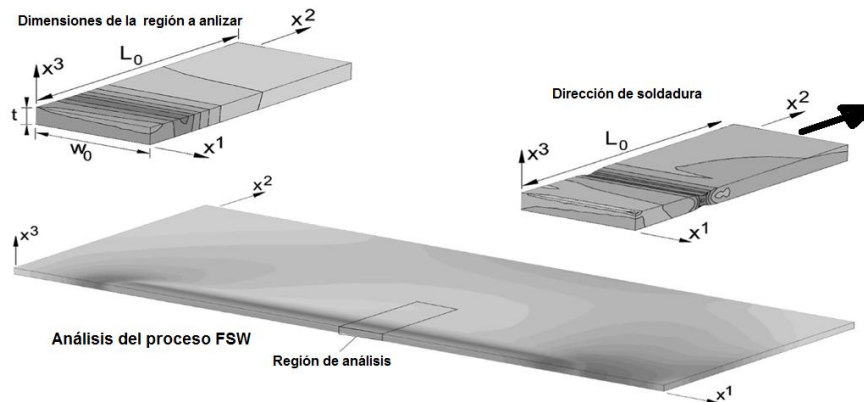
- **Pre-procesador:** en esta etapa se define el modelo, con esto el tipo de elemento y sus características, la geometría del problema a analizar y el material que se va a emplear en el problema. También se genera el mallado que se requiere, realizando una aproximación discreta del problema en base a puntos o nodos
- **Procesador:** Se asignan cargas que pueden ser puntuales o de presión, restricciones tales como las de traslación o rotación y finalmente se analiza el conjunto de ecuaciones que se generan
- **Post-procesador:** Se visualizan los resultados en forma de listas de desplazamiento de nodos, diagramas, fuerzas, etc.

El tamaño de los elementos es muy importante para el desarrollo del análisis ya que de esto depende la confiabilidad de la solución. Por lo tanto es necesario realizar pruebas de convergencia, en esta se comparan los resultados jugando con el tamaño de las mallas, si son similares entonces es suficientemente precisa; por otro lado si la diferencia es grande es necesario refinar la malla lo que sea conveniente. Un inconveniente con mallas finas es el tiempo de cálculo y la memoria del equipo que se esté utilizando. Por lo cual es necesario encontrar el mínimo número de elementos que nos arroje soluciones satisfactorias [35].

El programa de simulación Ansys soluciona problemas mecánicos mencionados a continuación [35]:

- Análisis de estructuras dinámicas y estáticas
- Análisis de transferencia de calor
- Dinámica de fluido
- Electromagnetismo

Además se pueden mezclar los problemas obteniendo la solución como un todo, en la figura 2.21 se muestra la simulación el proceso FSW desarrollada por Hattel J.H., donde se pretende estudiar las condiciones después de la soldadura. a) Predicción de Mises: hace hincapié en la pieza de trabajo que se ha soldado b) asignación de las cantidades de campo para el modelo, c) dirección a la línea de soldadura [36].



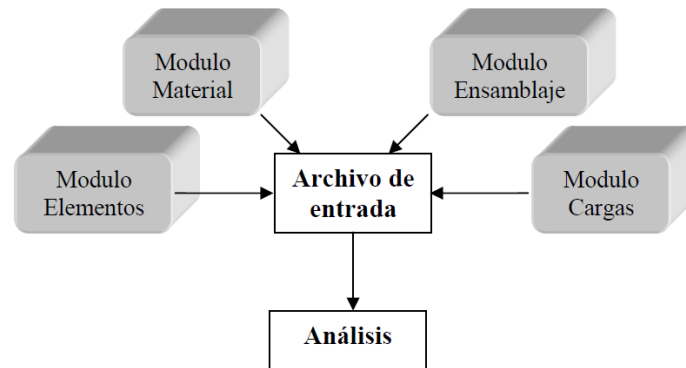
**Figura 2.21** Procedimiento de modelado secuencial de la simulación de soldadura en ANSYS, para realizar un análisis post-soldadura estructural [36].

### 2.5.5.2 ABAQUS

ABAQUS es un programa de cómputo empleado para resolver problemas de ingeniería, desde un análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales que emplea el análisis de elemento finitos gracias a este modela virtualmente cualquier geometría además del comportamiento de diversos materiales, siendo ampliamente aplicado [37].

Abaqus cuenta con una extensa documentación de manuales que describen los archivos de entrada, pudiéndose observar en la figura 2.22 la estructura básica y los componentes de un modelo en este programa computacional, creados por un editor o por el procesador gráfico del programa para ser interpretados por él. Abaqus tiene una extensa librería sobre elementos finitos proporcionando la solución de una extensa variedad de problemas. Al mismo tiempo cuenta con información sobre el comportamiento de algunos tipos de materiales pudiendo realizar algunas combinaciones como Elasticidad – plasticidad [37].

Para determinar el modelo en Abaqus es importante especificar los datos como la geometría del problema y el material a utilizar así como sus propiedades, Abaqus cuenta con una librería de materiales que permiten la simulación de modelos, de esta manera quedan definidos los nodos, elementos, propiedades, tipo de elemento finito o de usuario, condiciones iniciales, etc. Además se pueden especificar condiciones iniciales e interacciones entre las partes del problema a resolver [37].



**Figura 2.22** Módulos del programa de simulación Abaqus [37].

En lo que se refiere al material es definido en categorías generales [37]:

- Propiedades elásticas.
- Propiedades inelásticas.
- Propiedades térmicas.
- Propiedades acústicas.
- Propiedades para fluidos hidrostáticos.
- Propiedades de difusión de masa.
- Propiedades eléctricas.
- Ecuaciones de estado.

Los elementos son las partes del programa en donde se encuentran las propiedades del material y las relaciones constitutivas que se manejan en Abaqus, se definen en [37]:

- **Familia:** Usadas en análisis de esfuerzos, se relaciona con la geometría que cada familia asume.
- **Grados de libertad:** Están íntimamente relacionadas con la familia del elemento, son las variables fundamentales calculadas durante el análisis.

- **Números de nodos:** Determina el orden de interpolación, por ejemplo si los elementos tiene los nodos solo en las esquinas es interpolación lineal y los elementos con nodos intermedios usan interpolaciones cuadráticas.
- **Formulación:** Matemática usada para definir su comportamiento Abaqus presenta dos opciones, la primera es usada para los análisis de esfuerzos/desplazamientos y está basada en la teoría Lagrangian. La segunda es la teoría Eulerian o espacial, la cual se usa para análisis de mecánica de los fluidos.
- **Integración:** Abaqus emplea métodos numéricos para integrar sobre el volumen de cada elemento, el método de Gaussiano es el más utilizado para los elementos. Abaqus evalúa la respuesta del material para cada punto de integración en cada elemento.

Abaqus permite modelar los siguientes tipos de efectos [37]:

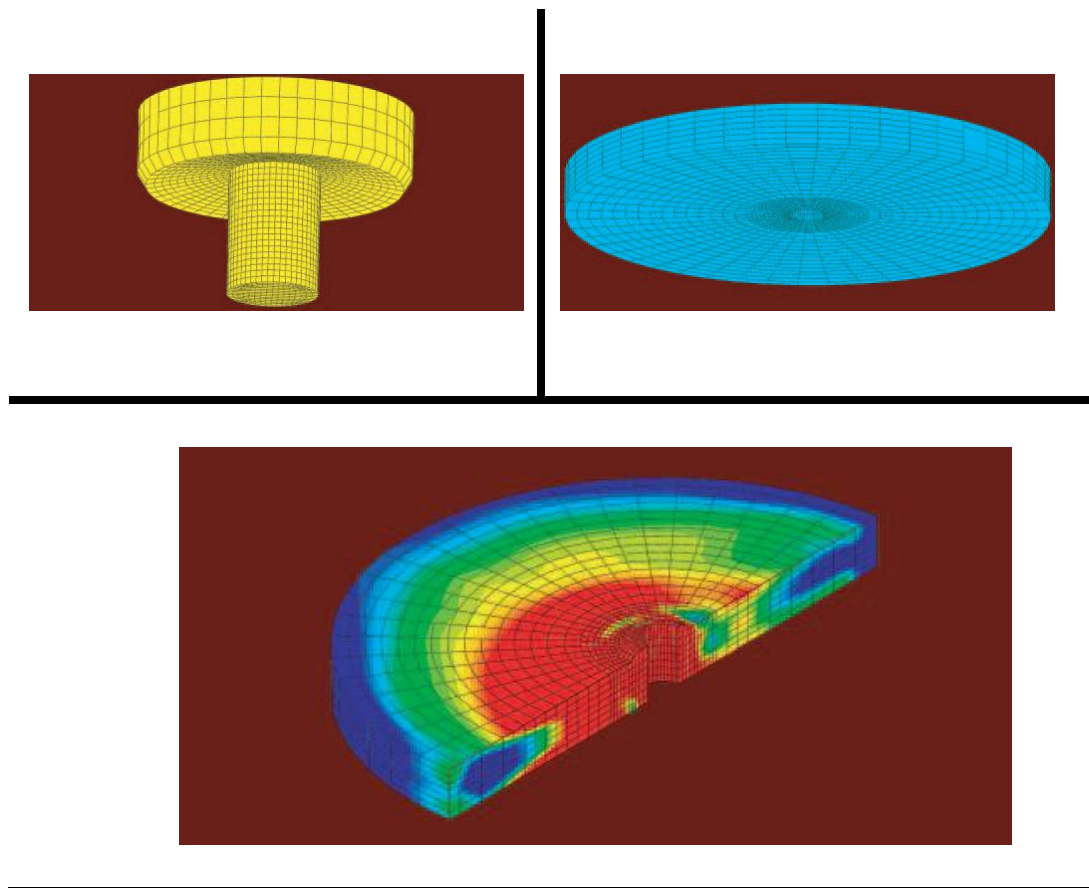
- Comportamiento elástico
- Comportamiento de tipo amortiguamiento
- Fricción
- Plasticidad
- Daño
- Falla
- Comportamiento cinemático

El programa se analiza dividiendo el problema en pasos, enseguida se especifica un tipo de análisis para cada paso, pudiendo ser análisis estático, análisis dinámico, análisis de transferencia de calor, etc. Se describen cargas, condiciones y las salidas requeridas para cada paso. Los archivos de salida muestran información sobre los posibles errores que se obtuvieron durante el análisis, además de los resultados del modelo analizado, existe un archivo el cual puede arrojar resultado de forma tabular en cuanto a [37]:

- Esfuerzos
- Deformaciones

- Desplazamientos, velocidad y aceleración
- Contacto
- Energía
- Fractura
- Variables térmicas
- Variables eléctricas
- Fluidos, medios porosos
- Variables de estado

En la figura 2.23 se puede observar la aplicación de este software simulando el proceso FSW en el artículo “Fully coupled thermomechanical finite element analysis of material evolution during friction-stir welding of AA5083”, por M. Grujicic [23].



**Figura 2.23** Simulación del proceso FSW en Abaqus [23].

## **2.6 Método de elementos finitos (FEM) aplicado al proceso de soldadura FSW en aleaciones de aluminio.**

En esta sección se analiza el artículo “Friction model for friction stir welding process simulation: Calibrations from welding experiments” realizado por Mohamed Assidi (2009) el cual ayudó a comprender la metodología utilizada FEM en los simuladores aplicada en el proceso FSW en aleaciones de aluminio específicamente para la AA 6061 [38]. Para desarrollar esta experimentación se tomaron en cuenta trabajos realizados anteriormente con el programa de cómputo Abaqus, pero el empleado para realizar este trabajo es el Forge3® F.E. se eligió por la precisión que tiene para estudiar la interface herramienta - placas de trabajo, además permite modelar los fenómenos del FSW como formación de rebabas, contactos, flujo de partículas, y defectos como el orificio túnel.

### **2.6.1 Formulación arbitraria**

En esta sección se indica el tipo de fórmula ALE (Lagrangiano-Euleriana) que se empleará para modelar el sistema, conocer el principio de funcionamiento del problema a resolver es fundamental para realizar este paso, ya que es el que determina la formulación necesaria y programa de simulación que conviene utilizar dependiendo de los solucionadores que opere, para este caso se utilizó la formulación Lagrangian-Eulerian pues es la que aplica para este estudio por lo tanto se optó por el programa de cómputo Forge3® F.E. , permitiendo calcular las tensiones residuales y estudiar el fluido en la superficie libre de las placas además de que permite remallar las distorsiones de elementos finitos difíciles y frecuentes que son provocadas por las deformaciones del material [38].

El primer paso del método es calcular las regiones termomecánicas, en el segundo se calcula la velocidad de la malla para mantener la calidad de



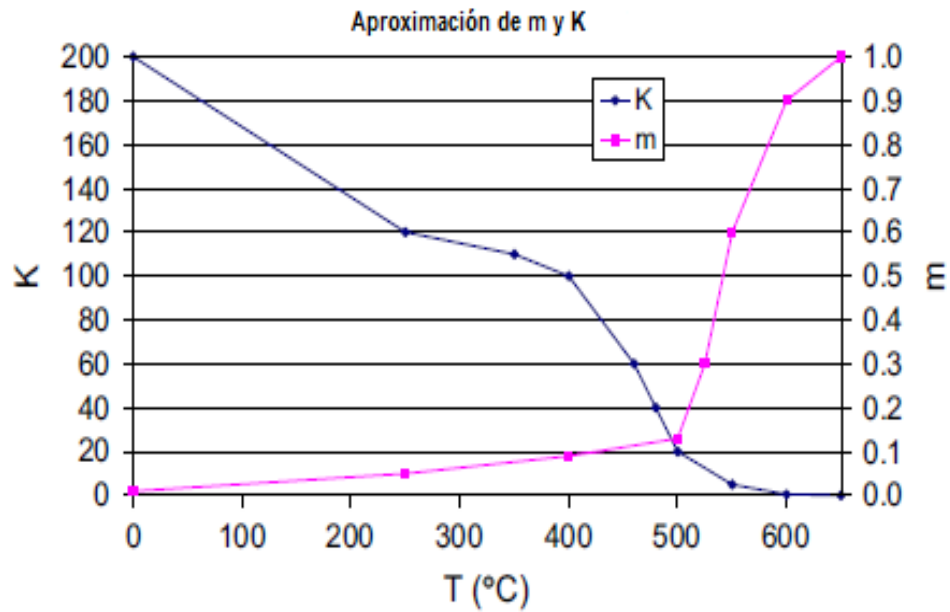
elementos y minimizar los errores, por último se transfieren las variables de estado a la malla actualizada, a esto se le conoce como el paso de remallado, este programa lo hace automáticamente permitiendo simular diferentes etapas del proceso: simulación de la intersección del pin en la pieza, simulación del proceso de soldadura que es regida por la geometría inicial y estado termomecánico que experimenta, alcanza un estado estacionario de soldadura. Permitiendo simular la mayoría de las características de FSW [38].

## **2.6.2 Modelo constitutivo del material**

Para realizar cualquier simulación es necesario determinar las propiedades físicas y químicas del material a utilizar en el problema a resolver, permitiendo obtener un buen resultado, el simulador contiene una base de datos empleado la cual se puede actualizar si las características del material no son encontradas o se cargan desde los diferentes módulos que el sistema maneja. En particular el Forge en su base de datos emplea el modelo constitutivo visco plástico Hansel Spittel para el calcular el endurecimiento por deformación y la temperatura de reblandecimiento en este caso para la aleación 6061 se pueden observar en la tabla 2.9 donde la tensión equivalente, la velocidad de deformación equivalente y los coeficientes de los modelos constitutivos [38]. Sin embargo el empleo de este modelo rebasa los parámetros que se requieren para la investigación en curso por lo que se simplifica el modelo visco plástico a Norton-Hoff (otro modelo constitutivo empleado en este programa de cómputo) pudiendo desarrollar resultados más consistentes. Las velocidades de deformación con respecto a la temperatura se presentan en la figura 2.24, las características de la placa AA 6061, herramientas H13 y la placa de respaldo se toman constantes los cuales se muestran en la tabla 2.10 [38].

**Tabla 2.9 Parámetros del Modelo de Hansel- Spittel de Al 6061 y rangos correspondientes [38]**

PARÁMETROS	RANGOS
Rangos de temperatura °C	250-550
Rangos de tensión	0.04-1.5
Rango de valores de la tensión ( $s^{-1}$ )	0-300
$A_1$ (MPa)	352.4
$M_1$	-0.0045
$M_2$	0.066
$M_3$	0.13
$M_4$	0.0024



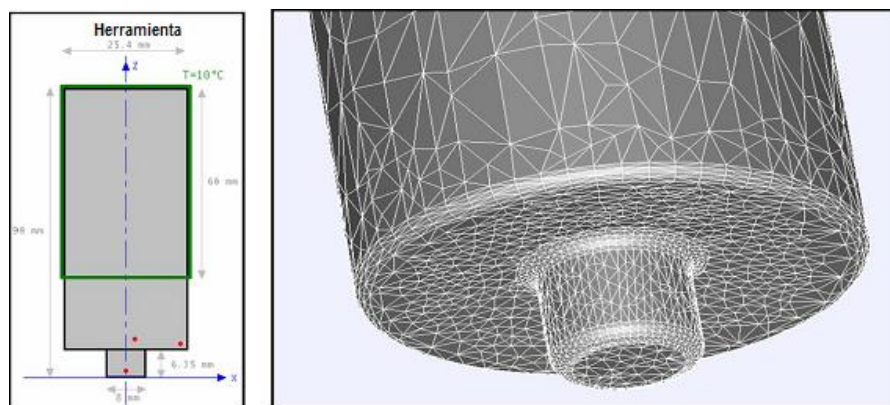
**Figura 2.24** Valores de la tabla, K consistencia del material y la sensibilidad de las velocidades de deformación en función de la temperatura para el modelo Norton- Hoff [38].

**Tabla 2.10 Características térmicas del material modelado [38]**

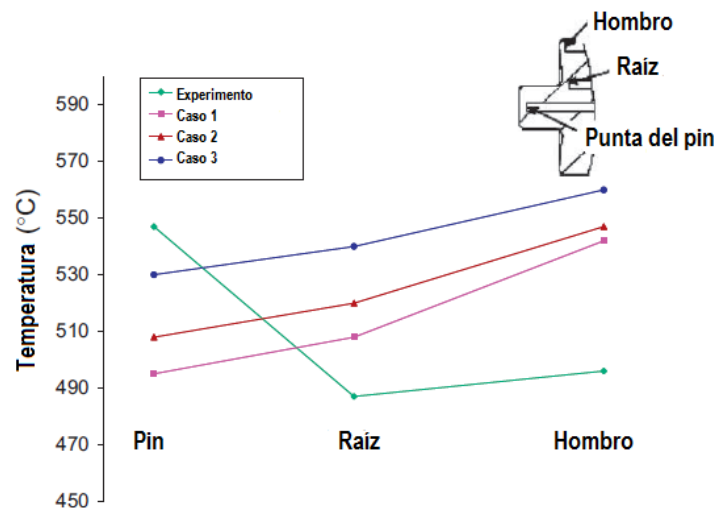
	CONDUCTIVIDAD $\lambda$ (W/M °C)	CAPACIDAD TÉRMICA $c$ (J/KG°C)	DENSIDAD P (KG/M <sup>3</sup> )	EFUSIVIDAD $E = \lambda \cdot P \cdot c$ (J/KG M <sup>3</sup> )(M <sup>-2</sup> /S)	EMISIVIDAD
Pieza de trabajo Al 6061	180	896	2700	20,868	0.05
Herramienta FSW H13	24.3	460	7850	9367	0.88
Placas de respaldo	250	1230	2800	29,343	0.05

### 2.6.3 Descripción del experimento

En esta parte se manejan las variables de velocidad y tiempo que requiere el modelo para ser determinado por ejemplo: la máquina Kearney y Trecker, PLC / PC donde se desarrolló la prueba tiene la capacidad de realizar soldaduras hasta de 1000 mm de longitud, con una velocidad de desplazamiento de 790 mm/min. Los ejes se controlan en la posición y la velocidad, registrando una frecuencia de 2 Hz durante el proceso de soldadura, el motor del husillo es de 22.4kw (30hp), el cabezal tiene una velocidad máxima de 1500 rpm [38].

**Figura 2.25** Diseño de la herramienta [38].

Se describe también el diseño de la herramienta intentando que sea lo más simple para facilitar la simulación, que se puede observar en la figura 2.25 para la cual se tomaron en cuenta sus características (acero para herramienta H13) y sus dimensiones, también se toma en cuenta un sistema de refrigeración dentro del soporte de la herramienta para minimizar el flujo de calor de la máquina permitiendo la inserción de termopares para difundir las lecturas como señales captadas por el receptor a través y ser transferido por el sistema de adquisición de datos. Los termopares empleados fueron fabricados por Omega Engineering, Inc, la herramienta contó con tres lugares de medición de temperatura cerca de la interfaz de la herramienta – pieza. La ubicación de los termopares se muestra en la figura 2.26 en los puntos rojos. Las placas tienen un espesor de 9.35mm con dimensiones 279x457mm, la velocidad de rotación de la herramienta es de 650 rpm a 1s después de haber introducido el pin en las placas. El estudio se realizó en tres velocidades 1.69 mm/s, 3.39 mm/s y 5.08 mm/s, con una longitud de soldadura de 400 mm, la profundidad de la herramienta se ajusta manualmente y es constante. Los datos obtenidos se registraron en intervalos de 50 ms [38].



**Figura 2.26** Comparación de las temperaturas calculadas y medidas en los lugares pin, raíz y hombro en la herramienta de FSW basada en la calibración del modelo Norton de fricción y teniendo en cuenta la formulación Euleriana

[38].

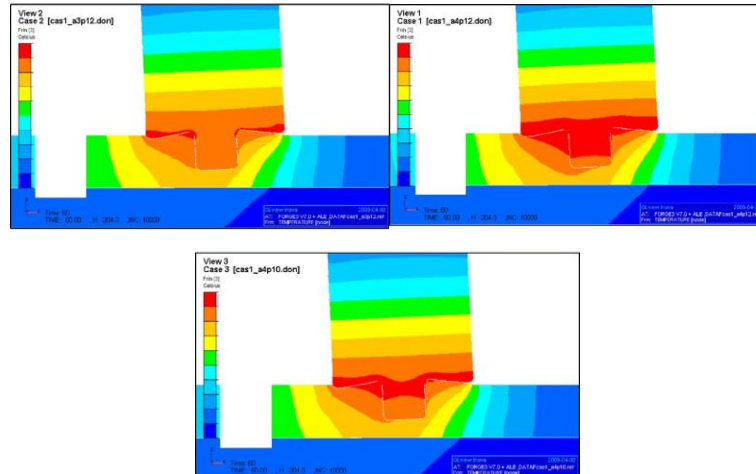
#### **2.6.4 Modelo de elemento finito**

La herramienta es modelada de acuerdo a su geometría, la placa se modela con la medidas de 150 mm de ancho, 300 mm de largo y 9.53 mm de espesor, la distancia de la herramienta es suficiente para no modificar el campo térmico cuando se alcanza el estado de equilibrio, la placa de respaldo también se modela con las mismas dimensiones de la placa excepto del espesor ya que este es de 25 mm que es el espesor real [38].

La malla donde se desarrollaron los cálculos cuenta con 32.000 elementos (7500 nodos) en la herramienta y 25000 (6000 nodos) para la placa. La temperatura se calcula con los tres termopares. El número inicial de elementos es de unos 50000 con tamaños mínimos de alrededor de 0.5 mm [38].

#### **2.6.5 Análisis preliminar de la fricción**

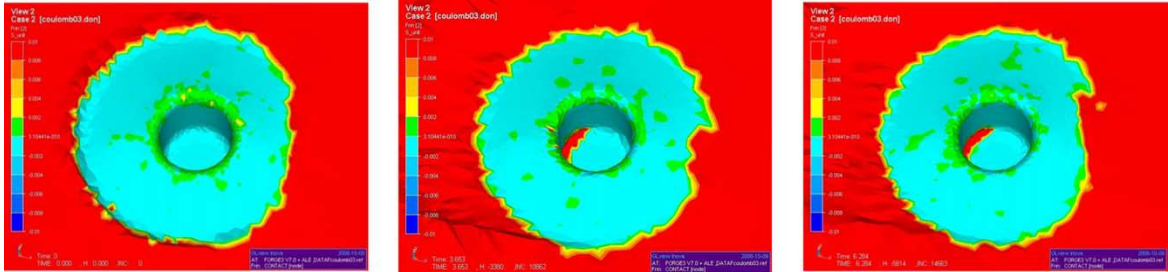
La figura 2.27 muestra las temperaturas registradas después de 60s, en condiciones diferentes, se observan los cambios en la fricción dependiendo del incremento de calor, se notan los efectos de la distribución del calor y los valores extremos en la placa y en la herramienta. Las temperaturas más altas se muestran en el hombro de la herramienta. En este estudio se muestra que la fuerza de la herramienta y las temperaturas son sensibles a la fricción, muestra que la calibración se debe realizar tanto en las fuerzas como en la temperatura de la herramienta, por lo tanto se determina que la distribución de la herramienta no es satisfactoria con el modelo propuesto [38].



**Figura 2.27** Temperaturas registradas después de 60s, en condiciones diferentes [38].

## 2.6.6 Formulaciones

En esta sección se realiza la comparación entre las formulaciones que ofrece el Forge que se pueden aplicar al estudiar este proceso pero que ofrecen resultados diferentes, se compararon los resultados empleando las formulaciones ALE (Lagrangiano- Euleriana) y Euleriano . La formulación ALE muestra resultados más satisfactorios para esta revisión en la figura 2.28 se muestra la comparación de la distribución de las tensiones, mapas de temperaturas y la geometría de la soldadura de la simulación utilizando las formulación mencionada con el modelo de fricción Coulomb, mostrando cambios significativos en el área de fricción afectando la generación de calor. Además se compararon los valores que alcanzaba la herramienta en cada caso pudiendo ser observadas en la tabla 2.11 utilizando los modelos Norton y Coulomb. Comparando también los tiempos se determinó que ALE se lleva más tiempo que la simulación Euler como se observa en tabla 2.12, una parte que aumenta el tiempo en ALE es la regulación de la malla y el procedimiento de mallado [38].



**Figura 2.28** Evolución de la superficie de contacto, después de 0,5 y 7 s de simulación del proceso utilizando el modelo de la formulación ALE con el modelo de fricción de Coulomb [38].

**Tabla 2.11** Fuerzas y temperaturas de la herramienta de soldadura en estado estacionario, calculado con las formulaciones de Euler y de ALE [38]

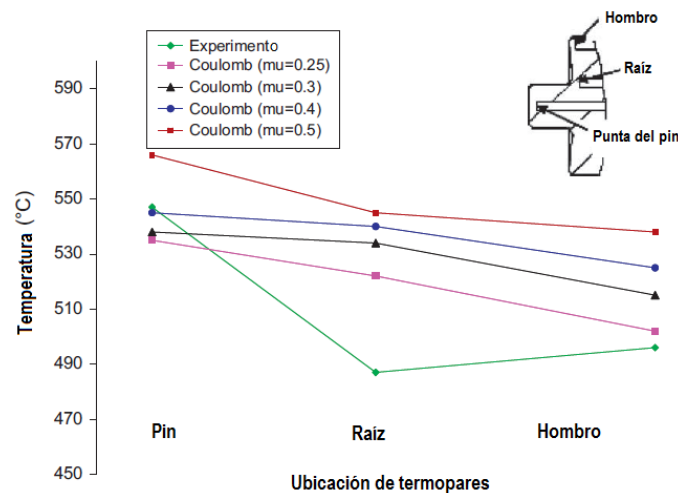
FORMULACIÓN	MODELO DE FRICCIÓN	$F_z$ (KN)	$F_x$ (KN)	$T_{pin}$ (°C)	$T_{rotación}$ (°C)	$T_{hombr}$ o (°C)
Experimento		$24.8 \pm 2.4$	$3.8 \pm 0.7$	547	487	496
Euleriana	Norton ( $\alpha= 0.4, q=0.125$ )	24	5	530	540	560
ALE	Norton ( $\alpha= 0.4, q=0.125$ )	32	5.5	524	548	562
Euleriana	Coulomb ( $\mu= 0.3$ )	22	5	522	504	484
ALE	Coulomb ( $\mu= 0.3$ )	23	4.2	538	528	515

**Tabla 2.12** Tiempos de cálculo con formulaciones de Euler y ALE durante la simulación [38]

FORMULACIÓN	TIEMPO
ALE	12 días 20 hrs
Euleriana	6 días 14 hrs

## 2.6.7 Fricción

La fricción está íntimamente relacionada con las fuerzas y temperaturas, las fuerzas tienden a disminuir con el aumento de la fricción mientras que la temperatura se eleva, de esta manera el calor generado aumenta reblandeciendo el material y disminuyendo las fuerzas. En esta sección se observa el modelo de Coulomb con la formulación ALE, ya que es la que arroja los resultados más próximos a la solución real, en la figura 2.29 se muestran las temperaturas calculadas. Obteniendo un buen resultado [38].



**Figura 2.29** Comparación de las temperaturas calculadas y medidas en los lugares pin, de raíces y el hombro en la herramienta de FSW con el modelo de fricción de Coulomb con la formulación ALE [38].

## 2.6.8 Calibraciones y velocidades

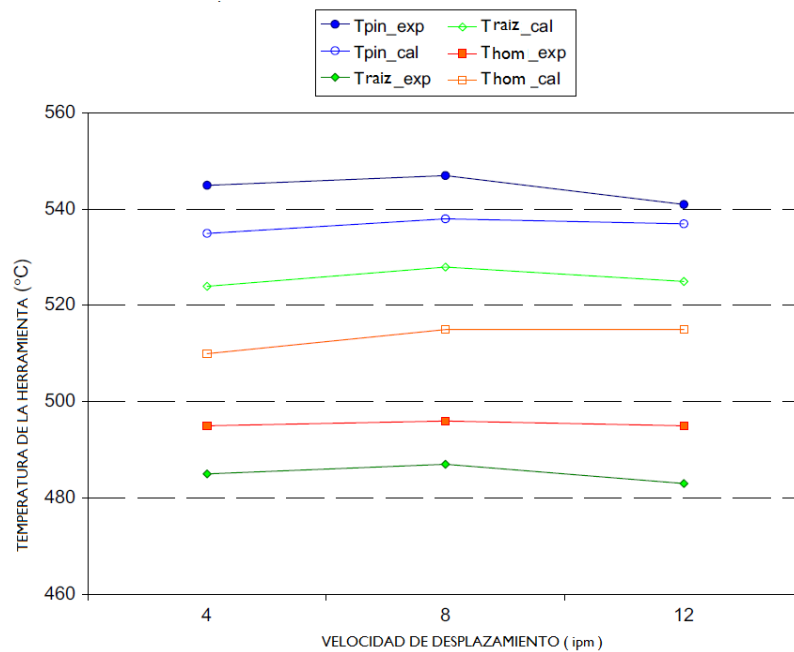
Empleando el modelo de Coulomb la simulación es bastante satisfactoria, la restricción es que es solo para un proceso de configuración, en la tabla 2.13 se pueden ver los resultados obtenidos. En la figura 2.30 se muestran la evolución de las velocidades de desplazamiento con respecto a las temperaturas



alcanzadas experimentalmente y calculadas por el programa de simulación Forge [38].

**Tabla 2.13 Valores de las fuerzas y temperaturas en diversas velocidades de desplazamiento, medido experimentalmente y se calcula utilizando la formulación ALE en la velocidad de diversos desplazamiento [38]**

	$F_z$ (kN)	$F_x$ (kN)	$T_{pin}$ (°C)	$T_{rotación}$ (°C)	$T_{hombro}$ (°C)
Exp 1	$19 \pm 2.5$	$3 \pm 0.2$	545	485	495
$\mu=0.25$	29	4.2	530	510	494
$\mu=0.3$	21.5	3.2	535	524	510
Exp 2	$24.8 \pm 2.4$	$3.88 \pm 0.7$	547	487	496
$\mu=0.25$	28	4.2	535	522	502
$\mu=0.3$	23	3.8	538	528	515
Exp 3	$27 \pm 2$	$4.2 \pm 0.2$	541	483	495
$\mu=0.25$	29	4	528	512	494
$\mu=0.3$	23.5	3.2	537	525	515

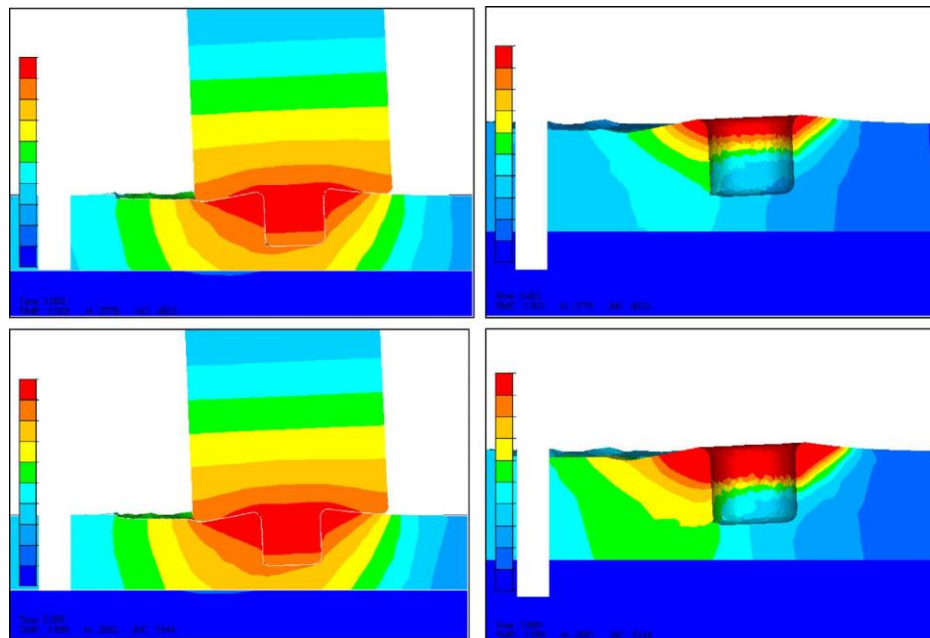


**Figura 2.30** Evolución de los pines (Tpin), raíz (Traiz) y hombro (Thom) en las temperaturas con velocidades de desplazamiento para  $m = 0,3$  en los resultados experimentales y numéricos [38].

## 2.6.9 Resultados de la simulación en FSW

En la figura 2.31 se comparan los valores de temperatura en la placa destacando que son similares 3.39 mm/s y 5.08 mm/s. Se puede observar en la sección transversal la temperatura y la tensión equivalente así como las velocidades de desplazamiento [38].

En el análisis del artículo anterior se estableció que los resultados obtenidos por la formulación ALE son satisfactorios de acuerdo con las fuerzas y temperatura de la herramienta sin importar el modelo de fricción utilizado. No es complicado calibrar coeficientes mediante el ajuste de fuerzas experimentales. Los resultados numéricos son también sensibles al contacto y las superficies de fricción. El modelo Coulomb cumplió satisfactoriamente con el objetivo del estudio. El modelo Norton no proporciona los perfiles adecuados de temperatura en la herramienta de soldadura [38].



**Figura 2.31** Vistas en sección transversal de la temperatura (izquierda) y la tensión equivalente (derecha), 3.39 mm/s (parte superior) y 5.08 mm/s (abajo) de las velocidades de desplazamiento, respectivamente [38].

Por otra parte G. Buffa (2006) realizó la simulación de una aleación de aluminio AA7075-T6, en el artículo “Finite element studies on friction stir welding processes of tailored blanks”, [6] el objetivo es determinar la viabilidad del proceso de soldadura en estas aleaciones con tamaños disímiles, encontrar los parámetros adecuados y los límites que el proceso presenta para ser aplicado.

El programa computacional empleado para realizar la simulación fue el Deform 3D, trabajando con la formulación Lagrange diseñada para los procesos de conformación de metales. Se modelaron las placas de aluminio como estado rígido-viscoplástico y considerando la herramienta rígida. El modelo se divide en dos etapas [6]:

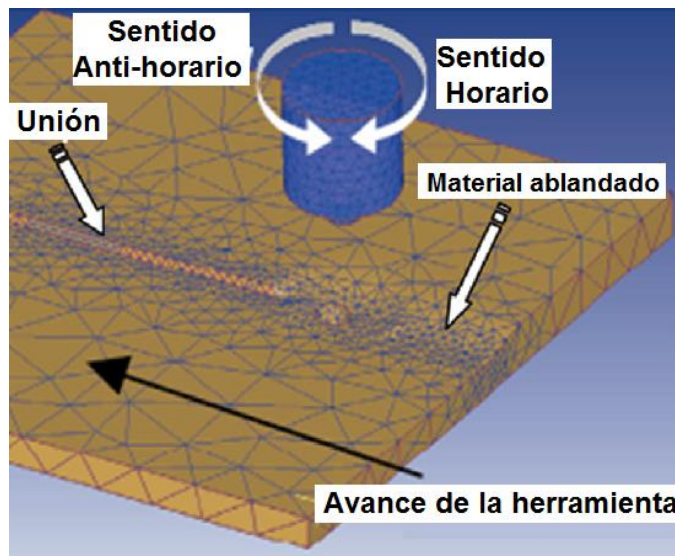
1. **Etapas de inserción de la herramienta:** De esta se obtiene la temperatura que necesita el proceso para ablandar el material y poder avanzar sobre las placas
2. **Etapas de soldadura (avance de la herramienta sobre las placas):** Se investiga los fenómenos termomecánicos que experimenta el material base para desarrollar una estructura completamente recristalizada.

Para llevar a cabo esta experimentación se tomaron en cuenta 5 casos de estudio, observando los espesores del material, el ángulo y presión de la herramienta en la tabla 2.14, además los parámetros empleados en los casos de estudio fueron: rotación de la herramienta 1000 rpm, avance de 100 mm/min [6].

Para el análisis térmico se desarrolló el mallado en la herramienta con 3000 elementos tetraédricos y en las placas AA7075-T6 se mallaron 15000 elementos tetraédricos [6], además se realizaron remallados durante el avance de la herramienta sobre las placas, cerca de la herramienta pudiéndose observar en la figura 2.32.

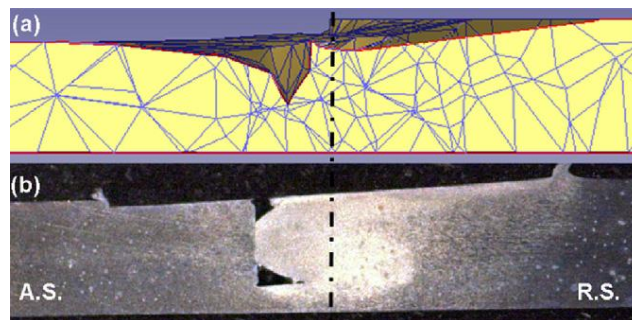
**Tabla 2.14 Caso de estudios y parámetros de la herramienta [6]**

CASO DE ESTUDIO	ESPESOR PLACA 1 (mm)	ESPESOR PLACA 2 (mm)	Rango de espesor	$\alpha$ (Deg)	$\Delta h$ (mm)
0	3	3	1.00	0	2.85
a	3	3.25	1.08	1.15	3.06
b	3	3.50	1.17	2.38	3.27
c	3	3.75	1.25	3.60	3.48
d	3	4	1.33	4.79	3.70



**Figura 2.32** Mallado de la herramienta y placas de aluminio AA7075-T6, y descripción del experimento [6].

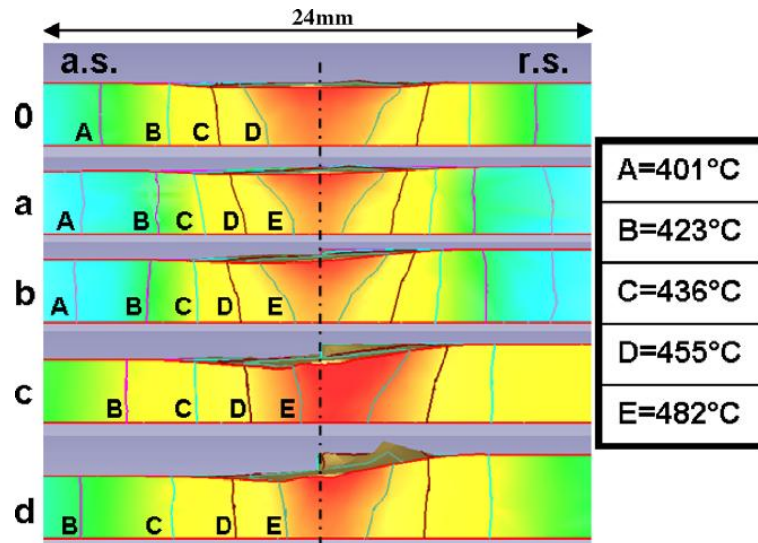
Durante esta experimentación se observó que si el lado de avance de la herramienta se realizaba por la placa más gruesa el flujo de material era poco, por el contrario un giro a la derecha de la herramienta determinando el lado de avance en la hoja más delgada da un flujo de material correcto; además si el flujo de material procedente de la parte retirada se enfrenta a un material demasiado frío en el lado de avance da lugar a una unión ineficaz como lo muestra la figura 2.33. Durante el proceso del flujo de material se determina la difusión del material de la pieza desde el lado de retirada hacia el lado de avance (placa gruesa - placa delgada) en el borde posterior de la soldadura, justo detrás de la herramienta [6].



**Figura 2.33** Unión ineficaz del proceso FSW [6].

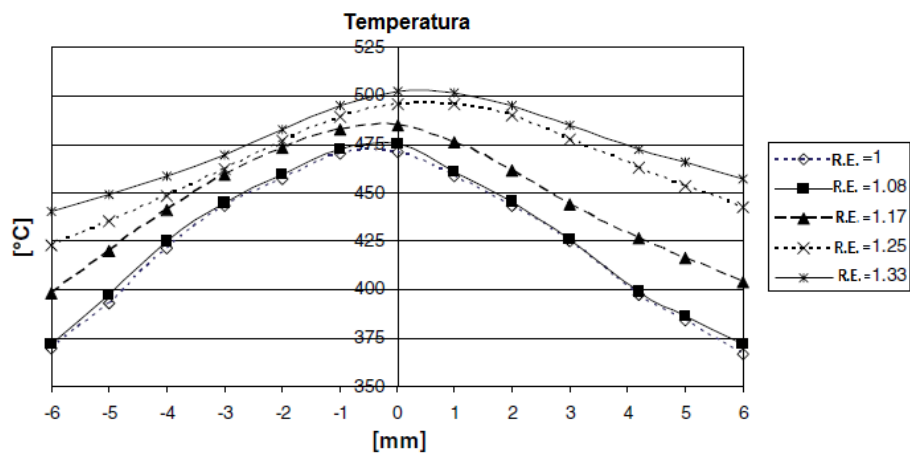
El diseño de la herramienta es sin duda un factor importante en este proceso, ya que si la velocidad de rotación y la presión de la herramienta se mantienen constantes, la zona de fricción está determinada por la geometría de la herramienta de aquí la importancia de la elección de los ángulos de esta. En la figura 2.34 se muestran los rangos de temperatura en la zona de soldadura de los cinco casos de estudio, describiendo que la zona afectada por el calor se expande según el espesor de la segunda hoja. La expansión de la zona afectada por el calor es relacionado con el incremento en la energía de deformación necesaria para deformar, debido a la diferencia de espesor entre las placas. Tomando como base la comparación de estos estudios la diferencia

de temperatura es mayor en el lado de retirada que en el de avance, indicando un mayor flujo térmico en la placa más gruesa, colocada en el lado de retirada debido a la energía necesaria para deformar el área a soldar [6].



**Figura 2.34** Rangos de temperatura en la zona de soldadura de los cinco casos de estudio [6].

En la figura 2.35 muestra la distribución de temperatura en la unión, el aumento de la temperatura máxima es visible revelando un flujo térmico alto en la soldadura y la ampliación consecuente de la ZAC [6].



**Figura 2.35** Distribución de la temperatura en la zona de soldadura [6].

Es elemental recordar que la historia térmica y la deformación plástica de la región de soldadura son importantes para determinar la microestructura en la soldadura. Para este estudio en particular la temperatura global de la zona de soldadura aumenta con la relación de espesor y este aumento lleva a una distribución de temperaturas más asimétrica. Además la deformación plástica en la pepita de soldadura y la velocidad de deformación aumentan con la relación de espesor determinando la influencia de la diferencia de espesores entre las placas [6].

El análisis y las soluciones descritas anteriormente son en este caso para la aleación de aluminio AA7075, pero el modelo actual puede trabajar correctamente con diferentes materiales, facilitando una herramienta eficaz para el diseño óptimo de los parámetros del proceso de la FSW aplicado en materiales disímiles. De esta manera se puede obtener una ingeniería de proceso completo teniendo en cuenta todos los parámetros operativos y geométricos que afectan el proceso [6].

# **CAPÍTULO 3**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA**

### **3.1 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio y las ventajas del proceso FSW sobre los procesos convencionales**

La demanda de aluminio en la actualidad ha estado aumentando, gracias a la cantidad de productos que se pueden producir con este. El aluminio puro tiene un aplicación muy reducida, sin embargo al ser aleado con elementos como cobre, silicio, magnesio y zinc, por mencionar algunos, mejoran potencialmente sus propiedades logrando ser ampliamente utilizados en diferentes áreas de producción por ejemplo la automotriz, aeronáutica y estructural, de acuerdo con su composición química, tratamientos térmicos y procesos al que se sometan después de haber sido aleados.

Se pretende que en el proceso de soldadura el área donde se una el material, en este caso las aleaciones de aluminio, conserve o no modifique drásticamente las propiedades físicas y químicas del material base. En el



documento anterior se menciona que el aluminio se puede encoger hasta un 6% por su alta conductividad térmica produciendo defectos en el área soldada además la cantidad de cordones afectan la cantidad de deformación. Teniendo esto como referencia, en las aleaciones de aluminio se manejan procesos como el GMAW y GTAW por su protección gaseosa tratando de evitar la corrosión del material, sin embargo existen una serie de desventajas que dan paso a nuevos procesos de soldadura como lo es el proceso de soldadura FSW proceso de fase sólida desarrollado para soldar las aleaciones de aluminio.

Las ventajas del proceso FSW sobre el GMAW y GTAW van desde que no requiere gases de protección, ausencia de grietas en la solidificación, hasta la recristalización de la zona de soldadura produciendo excelentes propiedades en la unión, experimentando temperaturas relativamente menores que las que alcanzan los otros procesos de fabricación. Sin embargo existen también algunos inconvenientes de este proceso, básicamente se refieren al costo elevado del equipo y herramental, además del diseño que requieren la herramienta y los parámetros empleados deben ser precisos para cada material.

El requisito fundamental para un proceso de FSW es crear una cierta cantidad de calor por fricción que pueda mantener el material de soldadura en un estado plastificado con una temperatura adecuada y generar una presión adecuada a lo largo de la línea de unión de manera que se pueden formar una soldadura con buena integridad.

### **3.2 Importancia del software de simulación en el proceso FSW aplicados en las aleaciones de aluminio**

Por lo anterior se ha estudiado por diferentes autores el comportamiento del proceso FSW mediante programas computacionales de simulación que empleen el método de elemento finito, para conocer el proceso y determinar si su aplicación es satisfactoria en las aleaciones de aluminio, además con ayuda de equipos de cómputo se pueden diseñar o ajustar los herramientas, observar las zonas del material que son expuestas a deformaciones, si falla o no falla la zona de soldadura, el flujo plástico del material, el calor generado por la herramienta, la distribución de la temperatura y la presión de la herramienta.

Las simulaciones son utilizadas ya que ahorran tiempo y costos a las industrias, proporcionando resultados aproximados de los diferentes procesos donde se aplica, pero es necesario conocer de los conceptos básicos de modelación para simular el proceso lo más entendible posible con resultados coherentes.

Los programas de cómputo empleados para simular procesos FSW se rigen por métodos numéricos ya que con ecuaciones matemáticas se pueden describir ciertos fenómenos de la naturaleza y controlar o predecir su evolución desarrollando los cálculos necesarios, sin perder de vista que los resultados son soluciones aproximadas al problema simulado; dependiendo totalmente de las variables tomadas en cuenta al describir el fenómeno.

Logrando de esta manera que el método de elemento finito se emplee en los programas de simulación para desarrollar el modelo de manera satisfactoria. De manera general el objetivo del FEM es discretizar un continuo en elementos conectados por nodos que son analizados matemáticamente, tomando en cuenta las variables necesarias para ciertos resultados, de esta manera se

resuelve el problema recalcando que es una aproximación del resultado dependiendo totalmente de las variables de entrada y los valores del entorno que se tomen en cuenta para cada análisis.

En la revisión bibliográfica los programas de cómputo empleados para desarrollar simulaciones en soldadura por fricción se pueden observar en la tabla 3.1. Estos programas se desarrollan bajo una metodología básica llevándose a cabo:

- **Pre procesamiento:** Consiste en delimitar el problema, en esta etapa se determina el tipo de análisis
- **Solucionador:** Es el tipo de ecuaciones que maneja el programa de cómputo para solucionar el problema, varían según el programa empleado variando con esto los resultados arrojados
- **Pos procesamiento:** Muestra los resultados arrojados por el programa computacional de simulación.

**Tabla 3.1 Principales programas computacionales de simulación en el proceso FSW**

SOFTWARE	CAMPO DE APLICACIÓN
Abaqus	Impactos, Sistemas físicos
Forge	Procesos de manufactura, tratamientos térmicos
Ansys	Sistemas físicos
Deform 3 D	Procesos de alta deformación, tratamientos térmicos y maquinados.

En la actualidad el programa de cómputo en desarrollo con más potencial es el Ansys ya que han evolucionando logrando obtener módulos que simplifican notablemente la aplicación de este paquete computacional. A pesar de esto el Abaqus sigue siendo el fuerte en el proceso de soldadura por fricción ya que es el que se acopla a este proceso permitiendo análisis más exactos, ya que pueden simularse sistemas físicos.

# CONCLUSIONES

- El proceso de soldadura FSW es el más conveniente para desarrollar la unión de diversas aleaciones de aluminio por las ventajas que éste ofrece respecto a los sistemas convencionales. Sin embargo el diseño de las herramientas y los parámetros deben ser específicos para cada material a utilizar.
- La simulación del proceso FSW es una herramienta eficaz para solucionar los inconvenientes presentes en este tipo de soldadura ya que se logra determinar los parámetros adecuados según la aleación a utilizar, teniendo presente que los resultados son aproximaciones, además de que es un método fácil de entender cuando se comprende la filosofía general aplicada para los diferentes programas de cómputo que utilizan.
- Las herramientas de simulación ayudan a resolver de manera rápida y eficaz, problemas industriales permitiendo jugar con las variables de entrada, el entorno y los parámetros evitando realizar pruebas físicas y con esto ahorrar costos.

# Tablas

1. **Tabla 2.1** Sistema de clasificación para las aleaciones de aluminio según el método de manufactura [2]
2. **Tabla 2.2** Clasificación para las aleaciones de aluminio según el tratamiento térmico [2]
3. **Tabla 2.3** Propiedades mecánicas de la aleación 6061 T6 [8]
4. **Tabla 2.4** Problemas típicos en la soldadura de aleaciones de Aluminio [13]
5. **Tabla 2.5** Principales parámetros del proceso FSW [17]
6. **Tabla 2.6** Ventajas del proceso FSW [14]
7. **Tabla 2.7** Desventajas del proceso FSW [14] [18]
8. **Tabla 2.8** Parámetros que determinan las propiedades mecánicas [14]
9. **Tabla 2.9** Parámetros del Modelo de Hansel- Spittel de Al 6061 [38]
10. **Tabla 2.10** Características térmicas del material modelado [38]
11. **Tabla 2.11** Fuerzas y temperaturas de la herramienta de soldadura [38]
12. **Tabla 2.12** Tiempo de cálculo con formulaciones de Euler y ALE [38]
13. **Tabla 2.13** Valores de las fuerzas y temperaturas en diversas velocidades de desplazamiento, medido experimentalmente y se calcula utilizando la formulación ALE en la velocidad de diversos desplazamiento [38]
14. **Tabla 2.4** Caso de estudios y parámetros de la herramienta [6].
15. **Tabla 3.1** Principales programas computacionales de simulación en el proceso FSW

# Figuras

1. **Figura 2.1** Representación esquemática de una celda electrolítica para la producción de Aluminio [2]
2. **Figura 2.2** Diagrama Al- Si, este sistema de aleación es la base de una parte importante de las aleaciones de fundición [5]
3. **Figura 2.3** Esquema de soldadura por fricción agitación [15]
4. **Figura 2.4** Representación del proceso FSW [16]
5. **Figura 2.5** Zonas Microestructurales en la sección transversal de un material soldado con el proceso FSW [6]
6. **Figura 2.6** Algunas de las formas de herramientas básicas para la soldadura por fricción. © TWI [16]
7. **Figura 2.7** La herramienta del proceso FSW y sus parámetros [6]
8. **Figura 2.8** Unión mediante el proceso de FSW [20]
9. **Figura 2.9** Zonas de soldadura en AA7075- T6 [6]
10. **Figura 2.10** Zonas de deformación, diferentes características [20]
11. **Figura 2.11** Evolución Microestructura en una aleación 7075 [22]
12. **Figura 2.12** La variación espacial del tamaño de grano proceso FSW [23]
13. **Figura 2.13** Temperaturas simuladas en diferentes intervalos de tiempo [19]
14. **Figura 2.14** Distribución de temperatura en la pieza de trabajo [27]
15. **Figura 2.15** Trayectorias del avance [23]
16. **Figura 2.16** Flujo de material descrito por Arbegast [14]
17. **Figura 2.17** Trabajo termomecánico en la pieza [23]
18. **Figura 2.18** Proceso ideal de modelización [29]

19. **Figura 2.19** Modelo general del proceso FSW [14]
20. **Figura 2.20** Esquema general de la metodología que se emplea para aplicar MEF, a la solución de un problema físico [30]
21. **Figura 2.21** Simulación del proceso FSW en Ansys [36]
22. **Figura 2.22** Módulos de Abaqus [37]
23. **Figura 2.23** Simulación del proceso FSW en Abaqus [23]
24. **Figura 2.24** Valores de la tabla, K consistencia del material y la sensibilidad de las velocidades de deformación en función de la temperatura para el modelo Norton- Hoff [38].
25. **Figura 2.25** Diseño de la herramienta [38]
26. **Figura 2.26** Comparación de las temperaturas calculadas y medidas en los lugares pin, raíz y hombro en la herramienta de FSW [38]
27. **Figura 2.27** Temperaturas registrada después de 60s, en condiciones diferentes [38]
28. **Figura 2.28** Evolución de la superficie de contacto, después de 0,5 y 7 s de simulación del proceso [38]
29. **Figura 2.29** Comparación de las temperaturas calculadas y medidas en los lugares pin, de raíces y el hombro en la herramienta de FSW [38]
30. **Figura 2.30** Evolución de los pines ( $T_{pin}$ ), raíz ( $T_{raiz}$ ) y hombro ( $T_{thom}$ ) [38]
31. **Figura 2.31** Vistas en sección transversal de la temperatura (izquierda) y la tensión equivalente (derecha) [38]
32. **Figura 2.32** Mallado de la herramienta y placas de aluminio AA7075-T6, y descripción del experimento [6]
33. **Figura 2.33** Unión ineficaz del proceso FSW [6]
34. **Figura 2.34** Rangos de temperatura en la zona de soldadura de los cinco casos de estudio [6]
35. **Figura 2.35** Distribución de la temperatura en la zona de soldadura [6].

# BIBLIOGRAFÍA

1. Totten G., Mackenzie S. 2003. Handbook of Aluminum. Volume 1 Physical Metallurgy and Processes. Marcel Dekker.
2. Askeland D. 1998. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. International Thomson Editores.
3. Oliver J. 2005. Estudio de la implantación de una Unidad Productiva Dedicada a la Fabricación de Conjuntos Soldados de Aluminio. Anexo G- Material Aluminio [Internet] Cited: Diciembre 02, 2011.]  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2833/8/41774-8.pdf>
4. Pach E, Rodriguez M. Soldabilidad de Aluminio y sus Aleaciones [Internet] Cited: Diciembre 02, 2011.]  
[http://fainweb.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica\\_de\\_la\\_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/CUADERNO%20FI%20N%C2%BA%20SOLDADURA%20DE%20ALEACION%20AA%206061%20-%202007.pdf](http://fainweb.uncoma.edu.ar/materias/Metalurgica_de_la_soldadura/Archivos%20de%20Metsold/CUADERNO%20FI%20N%C2%BA%20SOLDADURA%20DE%20ALEACION%20AA%206061%20-%202007.pdf)
5. Philips H.W.L.: Equilibrium Diagrams of Aluminium Alloys System (the Aluminium Development Association, London 1961)
6. Buffa G. Fratini L. Shivpuri R. 2007. Finite element studies on friction stir welding processes of tailored blanks. ScienceDirect, Elsevier Ltd.
7. Ortolá Salvador Abril. 2009. Blog Ingeniería de los Materiales. [internet] [Cited: Diciembre 02, 2011.]  
<http://ingenieriademateriales.workdpress.com>.
8. Distribuidor Exclusivo de TECNIACEROS. *Ficha Técnica Tecniaceros*. [Internet] [Cited: Diciembre 05, 2012.] <http://www.tecniaceros.com>.



9. Solá, P. M. 1992. Soldadura Industrial: Clases y Aplicaciones Barcelona. Marcombo.
10. Jeff L. 2009. Soldadura Principios y Aplicaciones. Madrid, España. Paraninfo, S.A.
11. Solari M. Informe Técnico Especial sobre: Soldadura de Aluminio, una gran oportunidad. [internet]. [Cited: Diciembre 08, 2011.]  
<http://www.everyoneweb.es/wa/datafilestodoaverias/soldar-aluminio.pdf>
12. Cabot P, Moglioni A, Carella E. 2003. Soldadura Por Fricción Agitación (FSW) De AA 6061 T6. Matéria, Vol. 8
13. Garcilazo L. 2011. Estudio de la aplicación del proceso de soldadura de puntos por resistencia (RSW) en la unión de aleaciones de aluminio. [Monografía] [México]
14. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. 2007. Friction Stir Welding and Processing. ASM International
15. Nandan R., DebRoy T. 2008. Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science
16. ESAB. 2003. Friction Stir Welding “The ESAB way”. ESAB Co.
17. Svoboda H. 2009. Innovación en Soldadura Proceso de Soldadura por Fricción – Agitación. Buenos Aires.  
hsvobod@fi.uba.ar
17. American Welding Society. 1996. Manual de Soldadura: soldadura Por Fricción. AWS. 8va ed. Tomo II.
18. Glavery W. Marlow F. 2001. Welding Essentials Questions and Answers. New York USA. Industrial Press.
19. N. Rajamanickam, V. Balusamy .2007. Numerical Simulation of Transient Temperature in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 2014 -T6. PSG College of Technology
20. Fanelli P, Vivio F., Vullo V. 2011. Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded. Engineering Fracture Mechanics 81 (2012) 17–25
21. Kim D., Badarinarayan H. , Kim J. H., Kim C., Okamoto K., Wagoner R.H., Chung K., 2009. Numerical simulation of friction stir butt welding process for

- AA5083-H18 sheets. *European Journal of Mechanics A/Solids* 29 (2010) 204–215
22. Gemmea F., Verremana Y., Dubourgb L., Jahazib M. 2010. Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data. *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 4152–4160
23. Grujicic M, He T, Arakere G, Yalavarthy H V, Yen C-F, Cheeseman B A. 2009. Fully coupled thermomechanical finite element analysis of material evolution during friction-stir welding of AA5083. DOI: 10.1243/09544054JEM1750
24. Totten G., Scott D. 2003. *Handbook of aluminum .Volume 2 alloy Production and Materials Manufacturing.* Marcel Dekk
25. Colegrove, Painter M., Graham D., Miller T.. 3-Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding Process, *Second Int. Symp. On Friction Stir Welding*, June 2000 (Goth - enberg, Sweden)
26. Nandipati G, Nageswara RD, Ramanaiah N. 2010. Effect of Microstructural changes on Mechanical properties of Friction stir welded Nano SiC reinforced AA6061 composite 2(11): 6490-6499
27. Riahi M. ,. Nazari H. 2010. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation *Int J Adv Manuf Technol* (2011) 55:143–152.
28. Salazar G. 2012. Asesoría análisis de elementos finitos. En: *Corporación Mexicana de investigación en Materiales.*
29. Luévano O. 2012. Seminario Elemento finito. En *Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.*
30. Salazar G. 2011. Curso Método de Elemento Finito. En: *Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.*
31. Carrillo A., Herrera I., Yates R. 2008. *Método de elementos finitos.* Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica y Grupo de Modelación Matemática y Computacional. <http://.mmc.igeofcu.unam.mx/>
32. Carnicero A. *Introducción al método de los elementos finitos [Internet][Cited: Abril 5, 2012]*

[http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion_al_MEF.pdf)

33. Salazar G. 1966. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Saltillo
34. Bosch J. 2006. Especialista en Modelación, Simulación y Optimización de Sistemas. Metodos Finitos. Instituto de Energia y Termodinamica Medellin.
35. Zapata O. 2012. Curso Introduccion a simulación. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Mecánica. Universidad Autónoma de Nuevo León.
36. Hattel J.H. 2011. The effect of post-welding conditions in friction stir welds: From weld simulation to ductile failure. European Journal of Mechanics A/Solids. Elsevier Masson SAS.
37. Uzcátegui M. Abaqus Programa de Elementos Finitos. Centro Nacional de Calculo Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
38. Assidi M., Fourment L., Guerdoux S., Nelson T. 2009. Friction model for friction stir welding process simulation: Calibrations from welding experiments. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 143–155.