



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA MEDIANTE  
FRICCIÓN CON AGITACIÓN (FSW) PARA ALEACIONES METÁLICAS  
Y PLÁSTICOS DE ALTA RESISTENCIA: ANÁLISIS CIENTÍFICO DE  
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS RESULTANTES.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PRESENTA:**

***M.C. JULIO CESAR VERDUZCO JUÁREZ***

**ASESOR:**

**DR. GONZALO MARIANO DOMÍNGUEZ ALMARAZ.**

**CO-ASESOR:**

**DR. RAFAEL GARCÍA HERNÁNDEZ.**

**MORELIA, MICH. MARZO DEL 2018**

---



## **AGRADECIMIENTOS.**

*A DIOS, porque sin él no hubiera conseguido nada en la vida, gracias padre, todo te lo debo a ti.*

*A mi hija Fátima, porque me dio la fuerza para continuar el día que llego a mi vida.*

*A mi esposa Cinthia por todo su amor y paciencia, gracias por estar a mi lado.*

*A mis padres José Abel Verduzco Guillen y María del Rosario Juárez Landin, por todo el apoyo, comprensión y motivación que me han brindado a lo largo de mi vida, porque a pesar de las dificultades que enfrente durante mis estudios, nunca dejaron de apoyarme y darme su amor, gracias papá, gracias mamá.*

*A mis hermanos José Abel, Erick y Ulises, porque siempre estuvieron presentes en los momentos que más los necesite.*

*A mi sobrino Mateo, porque siempre me ha dado una alegría en mi vida.*

*A mi asesor Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, por la paciencia que me tuvo, por los conocimientos y la dedicación que puso en mi formación, porque siempre encontré en él todo el apoyo necesario para afrontar las dificultades de mi investigación, gracias.*

*A mi asesor el Dr. Rafael García Hernández, por haberme enseñado tanto y brindarme todo lo que necesite a lo largo de mi investigación, gracias porque siempre me dio palabras de aliento, gracias.*

*Al M.C. Juan Jesús Villalón López, por todo el apoyo que me brindo durante la investigación y por su amistad, gracias.*

*Al consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para terminar mis estudios de Doctorado.*

## RESUMEN.

Esta investigación se centra en el estudio del mejoramiento de las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la tensión de la aleación de aluminio 6061-T6 que ha sido sometida a un proceso de soldadura por fricción con agitación, mediante la aplicación en conjunto de un tratamiento térmico de solubilizado y otro de envejecimiento pre y post soldadura, el material utilizado fue la aleación de aluminio 66061-T6 con un espesor de 9.5 mm. Se evaluaron tres casos de estudio, a) soldadura del material base sin tratamiento térmico (Caso B), b) tratamiento térmico de solubilizado y envejecimiento parcial del material base antes de la soldadura (Caso CA), y c) tratamiento térmico de solubilizado y envejecimiento del material base después de la soldadura (Caso CD). Los resultados obtenidos muestran que la aplicación en conjunto de un tratamiento térmico de solubilizado y envejecimiento parcial al material base antes de la soldadura (Caso CA), aumenta en 10% (20 MPa) la resistencia a la tensión en comparación con los resultados obtenidos en materiales sin ningún tipo de tratamiento térmico (Caso B), por otro lado para el caso (CD) la resistencia a la tensión obtenida tuvo un aumento del 42% (128 MPa) en comparación al caso B y solo estuvo 12 MPa por debajo de la resistencia a la tensión del material base. Adicionalmente se aplicó este proceso de soldadura por fricción con agitación en dos tipos de plásticos, ABS y Polipropileno, obteniendo con velocidades de giro de 950 rpm, 6 mm/min de velocidad de soldadura y el empleo de una herramienta cónica, una unión de los materiales mala, sin embargo para una velocidad de giro de 800 rpm, 50 mm/min y una herramienta de pin cuadrado, se logró obtener una unión buena en el polipropileno.

Palabras Clave: soldadura por fricción con agitación, AA 6061-T6, tratamiento térmico de envejecimiento, tratamiento térmico de solubilizado, resistencia a la tensión.

## ABSTRACT.

This research focuses on the study of the improvement of mechanical properties, specifically the tensile strength of the 6061-T6 aluminum alloy that has been subjected to a friction stir welding process, through the joint application of a treatment thermally solubilized and another of aging pre and post welding, the material used was the aluminum alloy 6061-T6 with a 9.5 mm of thickness. Three case studies were evaluated, a) welding of the base material without heat treatment (Case B), b) heat treatment of solubilized and partial aging of the base material before welding (Case CA) and c) heat treatment of solubilized and aging of the base material after welding (Case CD). The results obtained show that the joint application of a thermal treatment of solubilized and partial aging to the base material before welding (Case CA), increases by 10% (20 MPa) the tensile strength compared to the results obtained in materials without any type of heat treatment (Case B), on the other hand for the case (Case CD) the resistance to tension obtained had an increase of 42% (128 MPa) compared to case B and was only 12 MPa below the tensile strength of the base material. Additionally this friction welding process was applied with agitation in two types of plastics, ABS and Polypropylene, obtaining with speeds of 950 rpm, 6 mm / min welding speed and the use of a conical tool, a union of the bad materials, however for a rotation speed of 800 rpm, 50 mm / min and a square pin tool, it was possible to obtain a good union in the polypropylene.

Keywords: friction stir welding, AA 6061-T6, heat treatment of aging, heat treatment of solubilized, resistance to tension.

## ÍNDICE GENERAL.

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....   | 3  |
| ABSTRACT.....  | 4  |
| ÍNDICE GENERAL.....  | 5  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                     | 8  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                      | 11 |
| INTRODUCCIÓN.....  | 12 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                            | 14 |
| OBJETIVO GENERAL.....                                      | 15 |
| Objetivos específicos.....                                 | 15 |
| JUSTIFICACIÓN.....   | 16 |
| HIPÓTESIS.....   | 17 |
| CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE.....                           | 18 |
| CAPITULO 2. CONCEPTOS GENERALES.....                       | 24 |
| 2.1. Aleaciones de aluminio, descripción general.....      | 24 |
| 2.2. Materiales polímeros.....                             | 30 |
| 2.2.1. Clasificación de los materiales polímeros.....      | 31 |
| 2.2.2. Propiedades de los materiales polímeros. . . . .    | 33 |
| 2.2.3. Usos y aplicaciones de los polímeros.....           | 34 |
| 2.3. Soldadura en estado sólido.....                       | 36 |
| 2.3.1. Introducción.....                                   | 36 |
| 2.3.2. Generalidades de la soldadura de estado sólido..... | 38 |
| 2.3.3. Procesos de soldadura de estado sólido.....         | 40 |
| 2.4. Soldadura en materiales polímeros.....                | 45 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.1. Introducción. ....  | 45 |
| 2.4.2. Procesos de soldadura en materiales polímeros. ....   | 46 |
| 2.4.3. Unión de materiales polímeros por medio de soldadura. ....  | 47 |
| 2.4.4. Soldadura por fricción con agitación aplicada en polímeros. ....  | 50 |
| 2.5. Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio. ....   | 51 |
| 2.5.1. Introducción. ....  | 51 |
| 2.5.2. Influencia de los elementos aleantes en las aleaciones de aluminio. ....  | 52 |
| 2.5.3. Clasificación de los tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio. ....  | 54 |
| 2.5.4. Tratamiento térmico de homogenización. ....   | 54 |
| 2.5.5. Tratamiento térmico de recocido. ....   | 55 |
| 2.5.6. Tratamiento térmico de solución. ....   | 55 |
| 2.5.7. Tratamiento térmico de temple. ....   | 57 |
| 2.5.8. Tratamiento térmico de envejecimiento natural. ....   | 58 |
| 2.5.9. Tratamiento térmico por envejecimiento artificial. ....   | 61 |
| CAPITULO 3. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN CON AGITACIÓN. ....  | 63 |
| 3.1. Descripción del proceso de soldadura por fricción con agitación. ....   | 63 |
| 3.2. Equipos utilizados en el proceso de soldadura FSW. ....   | 65 |
| 3.3. Elementos de sujeción empleados en el proceso FSW. ....   | 67 |
| 3.4. Herramientas empleadas en el proceso FSW. ....  | 69 |
| 3.5. Influencia de los parámetros empleados en el proceso FSW. ....  | 71 |
| 3.6. Zonas características en la soldadura por FSW. ....   | 72 |
| CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....  | 74 |
| 4.1. Introducción. ....  | 74 |
| 4.2. Definición de los materiales para soldar. ....  | 74 |
| 4.3. Materiales para las herramientas y los elementos de sujeción empleados en la soldadura por fricción con agitación. .... | 76 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.4. Adaptación de un centro de maquinado DYNA MYTE DM-4800. ....   | 77  |
| 4.5. Fabricación de los elementos de sujeción. ....   | 80  |
| 4.6. Fabricación de las herramientas de soldadura. ....   | 82  |
| 4.7. Pruebas preliminares de la soldadura por fricción con agitación en polipropileno y una aleación de aluminio 1010. .... | 88  |
| 4.7.1. Soldadura preliminar por fricción con agitación en el plástico industrial polipropileno. ....                        | 88  |
| 4.7.2. Soldadura por fricción con agitación de una aleación de aluminio 1100. ....  | 90  |
| 4.8. Características de los tratamientos térmicos aplicados al aluminio 6061-T6. ....                                       | 95  |
| 4.9. Soldadura por fricción con agitación en una aleación de aluminio 6061-T6. ....   | 96  |
| 4.10. Características de los ensayos de tensión, microdureza y microscopia electrónica. ....                                | 101 |
| 4.11. Monitoreo de temperatura. ....  | 103 |
| CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....  | 106 |
| 5.1. Microdureza. ....  | 106 |
| 5.1.1. Perfil de Microdureza en la aleación de aluminio 6061-T6. ....   | 106 |
| 5.1.2. Resultados de microdureza en la soldadura. ....  | 107 |
| 5.2. Análisis macroestructural en las soldaduras por FSW. ....  | 109 |
| 5.3. Análisis microestructural. ....  | 112 |
| 5.4. Resistencia a la tensión. ....   | 114 |
| 5.5. Superficies de fractura. ....  | 124 |
| 5.6. Soldadura por fricción con agitación en polímeros. ....  | 127 |
| CAPITULO 6. CONCLUSIONES. ....  | 130 |
| CAPÍTULO 7. TRABAJO FUTURO Y RECOMENDACIONES. ....  | 132 |
| BIBLIOGRAFÍA. ....  | 137 |
| ACCIONES DE DIFUSIÓN. ....  | 149 |

## ÍNDICE DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Soldadura por Rodillos [43].   | 41 |
| Figura 2. Soldadura por explosión, 1) configuración inicial, 2) durante la detonación de la carga explosiva [43].  | 42 |
| Figura 3. Soldadura por Fricción: 1) parte giratoria, sin contacto; 2) partes en contacto para generar calor por fricción; 3) rotación detenida y presión axial aplicada; y 4) soldadura [43]. | 43 |
| Figura 4. Soldadura por fricción con agitación [43].   | 44 |
| Figura 5. Soldadura por Ultrasonido.   | 44 |
| Figura 6. Clasificación de los proceso de soldadura en polímeros [45]  | 46 |
| Figura 7. Clasificación de los diferentes métodos de soldadura en polímeros [45]   | 49 |
| Figura 8. Efectos de la temperatura sobre el envejecimiento natural respecto a la resistencia a la tensión [56].   | 59 |
| Figura 9. Conductividad térmica en función del envejecimiento natural [56].  | 60 |
| Figura 10. Cambios dimensionales que ocurren durante el envejecimiento natural de varias aleaciones [56].  | 61 |
| Figura 11. Tratamiento térmico típico de endurecimiento por precipitación [55].  | 62 |
| Figura 12. Proceso de Soldadura por Fricción con Agitación [62].   | 64 |
| Figura 13. Gráfica de presión y tiempo involucrados en los procesos de deformación y unión por difusión [62].  | 64 |
| Figura 14. Equipos empleado para el proceso FSW, a) Equipo diseñado para FSW, b) Fresadora de control numérico [68].   | 67 |
| Figura 15. Elementos de Sujeción Empleados en el Proceso FSW [69].   | 67 |
| Figura 16. Partes principales de la herramienta empleada en FSW [63].  | 69 |
| Figura 17. Herramientas empleadas en el proceso FSW [76].  | 70 |
| Figura 18. Zonas Características de la Soldadura por FSW.  | 72 |
| Figura 19. Centro de Maquinado Dyna Myte DM-4800.  | 79 |
| Figura 20. Sujetadores tipo garra.   | 81 |
| Figura 21. Placa de respaldo.  | 81 |
| Figura 22. Unión de placa de respaldo y sujetadores.   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 23. Geometrías Pin / Hombro [87].   | 83  |
| Figura 24. Tratamiento Térmico de Templado en las Herramientas.  | 84  |
| Figura 25. Tratamiento Térmico: a) Extracción de la herramienta del horno y b) Enfriamiento inmediato en aceite. | 84  |
| Figura 26. Herramienta Modelo 1.   | 85  |
| Figura 27.- Herramienta Modelo 2.  | 86  |
| Figura 28.- Herramienta Modelo 3.  | 86  |
| Figura 29.- Herramienta Modelo 4.  | 86  |
| Figura 30.- Herramienta Modelo 5.  | 86  |
| Figura 31.- Herramienta Modelo 6.  | 87  |
| Figura 32.- Herramienta Modelo 7.  | 87  |
| Figura 33. Sujeción y posicionamiento de la herramienta en polipropileno.  | 89  |
| Figura 34. Soldadura por Fricción con Agitación en Polipropileno.  | 90  |
| Figura 35. Sujeción y posicionamiento de la herramienta en la aleación de aluminio 1100.                         | 91  |
| Figura 36.- Cordón de soldadura deficiente en la placa A, aluminio 1010.   | 91  |
| Figura 37. Cordón de soldadura en la placa A, aluminio 1010.   | 93  |
| Figura 38.- Raíz de la soldadura en placa A, aluminio 1010.  | 93  |
| Figura 39.- Cordón de soldadura de la placa B. Figura 40. Raíz de la soldadura en la placa B.                    | 94  |
| Figura 41.- a) incrustaciones de aluminio y b) limpieza final.   | 94  |
| Figura 42. Grafica del tratamiento térmico de solubilizado.  | 95  |
| Figura 43. Grafica del tratamiento térmico de envejecimiento parcial.  | 96  |
| Figura 44. Descripción de la obtención de las probetas de Tensión y Microdureza.                                 | 102 |
| Figura 45. Dimensiones de las probetas, a) Tensión, b) Microdureza.  | 102 |
| Figura 46. Elementos presentes durante el proceso de soldadura por fricción con agitación.                       | 103 |
| Figura 47. Distribución de temperaturas durante el proceso de soldadura.   | 104 |
| Figura 48. Distribución de temperaturas dentro del spindle porta herramientas.                                   | 104 |
| Figura 49. Distribución de las temperaturas en el motor del equipo.  | 104 |
| Figura 50. Temperatura registrada con termopares en la soldadura FSW.  | 105 |
| Figura 51. Probetas empleadas para obtener el perfil de microdureza.   | 106 |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| Figura 52. Perfil de Microdureza en la aleación de aluminio 6061-T6.....                            | 107                           |
| Figura 53. Perfil de microdureza en la soldadura por FSW. ....                                      | 108                           |
| Figura 54. Soldadura superficial para el caso de estudio (A).....                                   | 109                           |
| Figura 55. Defectos presentes en el caso de estudio (A).....  | 110                           |
| Figura 56. Soldadura superficial para el caso de estudio (B). ....                                  | 111                           |
| Figura 57. Soldaduras sin defectos para el caso de estudio (B). ....                                | 111                           |
| Figura 58. Soldadura superficial para el caso de estudio a) CA y b) CD. ....                        | 111                           |
| Figura 59. Microestructura en el perfil de soldadura obtenido por FSW, a) TMAZ, b) HAZ y c) BM..... | 112                           |
| Figura 60. Zona de agitación 100x. ....   | 113                           |
| Figura 61. Zona afectada térmicamente (HAZ) 100x.....   | 113                           |
| Figura 62. Zona no afectada (BM) 100X. ....   | 114                           |
| Figura 63. Zona de fractura para el caso de estudio A. ....   | 115                           |
| Figura 64. Superficie fractura para el caso de estudio A.....                                       | 115                           |
| Figura 65. Zona de fractura para el caso de estudio B. ....   | 117                           |
| Figura 66. Macrografía de la zona de fractura para el caso de estudio B.....                        | 118                           |
| Figura 67. Superficie fractura para el caso de estudio B.....                                       | 118                           |
| Figura 68. Zona de fractura para el caso de estudio CA.....   | 120                           |
| Figura 69. Superficie fractura para el caso de estudio B. ....                                      | 120                           |
| Figura 70. Zona de fractura para el caso de estudio C. ....   | 123                           |
| Figura 71. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, en el Material de base.....       | 125                           |
| Figura 72. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso B.....               | 125                           |
| Figura 73. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso CA.....              | 126                           |
| Figura 74. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso CD.....              | 126                           |
| Figura 75. Soldadura en ABS.....  | 127                           |
| Figura 76. Reforzamiento de ABS por FSW.....  | 128                           |
| Figura 77. Sección transversal del reforzamiento del ABS.....                                       | 128                           |
| Figura 78. Soldadura de Polipropileno, Pin cuadrado.....  | 129                           |
| Figura 79. Soldadura Polipropileno, Pin Cónico.....   | 129                           |
| Figura 80. Materiales empleados en la construcción de un automóvil.....                             | 133                           |
| Figura 81. Unión D-1. ....  | Figura 82. Unión D-2..... 135 |
| Figura 83. Unión D-3. ....  | Figura 84. Unión D-4..... 135 |

## ÍNDICE DE TABLAS.

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1. Sistema de designación en Aleaciones de Aluminio.....   | 26  |
| Tabla 2. Designación de los tratamientos Térmicos en Aluminios.....  | 27  |
| Tabla 3. Límites de tiempo y temperatura para materiales templados y almacenadas con refrigeración [56]..... | 59  |
| Tabla 4. Conductividad térmica en materiales empleados en elementos de sujeción/respaldo [63] .....          | 68  |
| Tabla 5. Principales variables del proceso de soldadura FSW [63]. .....                                      | 71  |
| Tabla 6. Composición Química en Peso de la AA 6061-T6. ....  | 75  |
| Tabla 7. Propiedades Mecánicas AA 6061-T6.....   | 75  |
| Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas del polipropileno y ABS. ....                                       | 76  |
| Tabla 9. Propiedades químicas de los aceros H-13 Y 9840-R. ....  | 77  |
| Tabla 10. Aplicaciones industriales de los aceros H-13 Y 9840-R.....   | 77  |
| Tabla 11. Características del Equipo Dyna Myte DM-4800. ....   | 78  |
| Tabla 12. Modelos de Herramientas.....   | 85  |
| Tabla 13. Parámetros del Proceso. ....   | 98  |
| Tabla 14. Designación para los distintos tipos de soldadura.....   | 98  |
| Tabla 15. Condiciones de ensayo para el caso de estudio A. ....  | 99  |
| Tabla 16. Condiciones de ensayo para el caso de estudio B. ....  | 100 |
| Tabla 17. Condiciones de ensayo para el caso de estudio CA. ....   | 100 |
| Tabla 18. Condiciones de ensayo para el caso de estudio CD.. ....  | 101 |
| Tabla 19. Temperatura presentes en el proceso de soldadura cámara termografía. ....                          | 103 |
| Tabla 20. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio A.....                              | 114 |
| Tabla 21. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio B.....                              | 116 |
| Tabla 22. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio CA.....                             | 119 |
| Tabla 23. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio CA.....                             | 121 |
| Tabla 24. Parámetros de soldadura para la unión de aluminio-polipropileno. ....                              | 134 |
| Tabla 25.- Problemas durante la unión de aluminio y polipropileno. ....                                      | 135 |

## INTRODUCCIÓN.

El proceso de soldadura por fricción con agitación fue descubierto y patentado por el instituto inglés de soldadura en 1991. Este proceso de soldadura en estado sólido, consta de una herramienta no consumible formada por un hombro y un pin, la unión se lleva a cabo mediante el calentamiento por fricción y por la deformación plástica que genera la herramienta en los materiales a unir [1-4]. En un principio solo estaba limitado este proceso de soldadura a aleaciones de aluminio de poco espesor, pero en la actualidad se hace evidente la aplicación de este tipo de soldadura en diferentes materiales y de diferentes espesores [5-6]. La aleación de aluminio 6061-T6, es la más usada en las industrias aeroespacial, marítima, automotriz, entre otras muchas, por la buena relación que ofrece entre peso, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión [7-10]. Este proceso de soldadura en estado sólido comparado con los procesos tradicionales de soldadura por fusión, como son el MIG (del inglés Metal Inert Gas), TIG (del inglés Tungsten Inert Gas) y electrodo revestido, presenta una mejora en las propiedades mecánicas de los materiales soldados, y un ahorro significativo de energía aportada durante la unión con una disminución de contaminantes [11-14].

La soldadura de la aleación de aluminio 6061-T6 realizada por los medios tradicionales de soldadura por fusión o por soldadura en estado sólido, presentan dos tipos de problemas, el primero de ellos es la aparición de defectos característicos del tipo de soldadura empleada, como son: porosidades, falta de penetración y falta de fusión lateral, así como el fenómeno de sobre envejecimiento en la zona de decaimiento de las propiedades mecánicas, en el metal base. El segundo problema es el ciclo térmico que se presenta durante la soldadura, ambos problemas afectan las propiedades mecánicas originales del material [11]. La utilización de parámetros adecuados, materiales y elementos de protección durante la soldadura, han proporcionado una disminución o desaparición de los defectos presentes en la unión, dejando de lado por lo tanto este problema como una causa del decaimiento en la resistencia mecánica del material [12]. El ciclo térmico que se genera inevitablemente durante la soldadura, es la causa principal de la pérdida de hasta el 43 % o más de sus principales propiedades mecánicas, limitando sus usos solo a ciertas aplicaciones industriales. [13].

Esta problemática se ha intentado resolver por medio de la aplicación de tratamientos térmicos después de la aplicación de la soldadura [14], no obstante esta solución, trae consigo una serie de limitaciones y problemas, entre los que se puede destacar los siguientes: el consumo elevado de energía aplicada durante los tratamientos térmicos y la restricción de dimensiones de las piezas que se someterán al tratamiento térmico [15]. Por lo tanto la presente investigación se centra en resolver el decaimiento de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6 que ha sido sometida al proceso de soldadura por fricción con agitación, por medio de un tratamiento térmico de solubilizado, un tratamiento térmico de envejecimiento parcial y un envejecimiento total, otro objetivo es reducir los tiempos de tratamiento térmico después de la soldadura, que proporcionen al material unas propiedades mecánicas cercanas al material base.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Hoy en día es casi imposible manufacturar muchos productos que sean de una sola pieza y de un solo tipo de material, por lo complicado y costoso que sería la producción de estos, es por ello que los productos se manufacturan como una serie de componentes individuales que después se ensamblaran en un todo por medio de algún proceso de unión. Dentro de estos procesos de unión se encuentran tres categorías principales: a) soldadura, b) unión con adhesivos, c) sujeción mecánica. Dentro del primer proceso, se distinguen tres categorías que son: a) soldadura por fusión, b) soldadura de estado sólido y c) soldadura fuerte o soldadura blanda. Dentro de este último grupo la técnica más comúnmente empleada para soldar es por fusión. La soldadura por fusión presenta una serie de problemas y defectos al momento de ser realizada, entre estos se enumeran los siguientes: a) no se pueden soldar dos materiales distintos tan fácilmente, b) se tiene que contar con personal especializado para realizarla, c) se requiere un cuidado muy riguroso en la limpieza de los materiales a soldar, d) determinar el tipo de junta más conveniente para la unión, e) la generación de gases nocivos tanto para la salud del soldador como para el medio ambiente, f) calor y radiación durante el proceso. Entre los defectos que pueden llegar a surgir, se mencionan los siguientes: a) aparición de porosidades y grietas, b) defectos de fusión, c) penetración inadecuada, d) rechupes y e) decaimiento notable de las propiedades mecánicas de los materiales base.

Por otro lado, el proceso de soldadura en estado sólido presenta mejores características en comparación con la soldadura por fusión; dentro de este último proceso de soldadura podemos mencionar la soldadura por fricción axial y la soldadura por fricción con agitación FSW (del inglés Friction Stir Welding). El proceso FSW es de reciente aparición; tan solo cuenta con 20 años en el mercado en comparación con cerca de 100 años o más que apareció la soldadura por fusión. En este corto periodo el proceso FSW ha demostrado ser un mejor método de soldadura para unir materiales, imposible de soldar de manera óptima por los métodos tradicionales. Dentro de las ventajas se tienen: a) unión de una gran variedad de materiales ya sea individualmente o entre ellos como aleaciones de aluminio, cobre, plomo, titanio, aceros inoxidables, aleaciones de níquel, aleaciones de magnesio, polímeros, b) no

emite radiación ni gases nocivos, c) no produce contaminantes, d) presenta mayor eficiencia energética, e) genera menos ruido, f) resulta más rápido y eficiente, g) con menor costo de materiales, h) resulta en una simplificación de las uniones, i) reducción de costos de mano de obra, j) no necesita lijado ni cepillado posterior porque no hay porosidad ni cavidades internas.

Bajo estos argumentos generales, resulta de interés analizar el comportamiento microestructural, mecánico y los parámetros del proceso de soldadura FSW cuando es aplicado en aleaciones metálicas y plásticos de alta resistencia. Cabe mencionar que actualmente los datos experimentales son muy reducidos en materiales sometidos a este proceso de soldadura. En efecto, este método fue diseñado desde sus inicios para soldar únicamente aleaciones de aluminio; no obstante, recientes investigaciones experimentales hacen evidente la posibilidad de soldar cualquier tipo de material: aleaciones metálicas y polímeros. Adicionalmente, resulta de particular interés implementar este proceso de soldadura en México, debido a sus aplicaciones industriales y al muy bajo número de investigadores que actualmente trabajan en nuestro país dentro de esta área científica y tecnológica.

## **OBJETIVO GENERAL.**

Implementar y analizar el proceso de soldadura por fricción con agitación aplicado en aleaciones metálicas y plásticos de alta resistencia, mediante la adaptación de un centro de maquinado para evaluar las propiedades mecánicas y metalúrgicas resultantes en este proceso.

### **Objetivos específicos.**

- I. Determinar los parámetros adecuados del proceso de soldadura por fricción con agitación (velocidad de giro, velocidad de avance, tiempo de mantenimiento, etc.) que den como resultado una soldadura con mínimos defectos.

- II. Correlacionar las propiedades mecánicas y metalúrgicas obtenidas en los materiales soldados, con los parámetros empleados durante el proceso de soldadura.
- III. Diseño y fabricación de la herramienta (hombro-pin) y la selección del tipo de material.
- IV. Llevar a cabo ensayos experimentales sobre las probetas soldadas, para obtener los valores de las propiedades mecánicas de interés en el estudio (dureza y resistencia a la tensión).

## **JUSTIFICACIÓN.**

La aparición del proceso de soldadura por fricción con agitación ha generado un avance considerable en las técnicas de unión de materiales de naturaleza similar o diferente: acero-acero, aluminio-aluminio, acero-aluminio, aluminio-cobre, etc. Este proceso tiene un gran potencial de aplicación industrial, el cual no ha sido empleado en México debido a su reciente aparición y a la utilización de métodos clásicos de unión por fusión tradicionalmente empleados como: (GMAW-MIG, GTAW-TIG). Los últimos métodos tradicionales de soldadura mencionados se aplican intensivamente en la industria nacional; no obstante, presentan algunas desventajas respecto al proceso de fricción con agitación: defectos en la estructura cristalográfica por el efecto de la fusión, mientras que FSW presenta un efecto muy limitado sobre la microestructura cristalográfica, la velocidad de soldadura es mayor en el caso de FSW, el grano resultante es más fino en el proceso FSW, posibilidades de soldar materiales de muy diferente naturaleza en el proceso de FSW. Adicionalmente, el proceso FSW es más económico en comparación con otros métodos de unión. Una fresadora convencional puede ser fácilmente adaptable para este proceso, es limpio, seguro y no presenta problemas para el medio ambiente, ya que durante la realización del mismo no se generan gases tóxicos, radiación, chispas, además presenta una disminución importante de defectos en la unión de la soldadura, tales como: micro porosidades, esfuerzos residuales, distorsiones geométricas, etc.

Después de una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la soldadura por fricción con agitación, se han obtenido únicamente tres trabajos relacionados con este tema en México [101, 102, 103]. La importancia científica, tecnológica y económica de este tema de investigación ha quedado expuesto en el primer párrafo de la justificación. Por estas razones, resulta de particular interés la presente propuesta de tesis de doctorado: una temática de investigación científica relativamente desconocida o muy poco investigada en nuestro país, de alto potencial en la aplicación industrial de punta como: aeronáutica, electrónica, naval, automotriz, etc., un amplio panorama en temas de investigación: optimización de parámetros implicados en el proceso de soldadura, geometrías de las herramientas, propiedades cristalográficas y mecánicas resultantes en materiales soldados. Adicionalmente, la pertinencia de este proyecto doctoral de investigación se sustenta sobre los costos de implementación del mismo que son relativamente bajos: adaptación de máquinas herramientas para el proceso de soldadura por este método.

## **HIPÓTESIS.**

El proceso de soldadura por fricción con agitación aplicada en aleaciones metálicas y plásticos de alta resistencia, puede llevarse a cabo mediante el empleo de máquinas herramientas, como lo son fresadoras verticales y centros de maquinado, controlando los parámetros de estas mismas para un correcto proceso de soldadura que proporcione uniones libres de defectos. También, es posible obtener algunas de las principales propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tensión) de los materiales soldados mediante ensayos mecánicos y análisis por microscopía.

## CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE.

A continuación se presenta una revisión bibliográfica en el periodo comprendido a partir del año 2002 al año 2017 del estado del arte del proceso de soldadura aplicado en aleaciones de aluminio y plásticos industriales.

**Ericsson y Sandstrom (2002) [16]:** investigaron la resistencia a la fatiga de las soldaduras por fricción con agitación (FSW), la cual está influenciada por la velocidad de soldadura, y también comparan los resultados de fatiga con los resultados de los métodos convencionales de soldadura por arco: MIG-pulse y TIG. La aleación Al-Mg-Si 6082 se soldó con FSW en las condiciones de temple T6 y T4, para el caso de MIG-pulse y TIG se soldaron en temple T6. El material soldado con T4 se sometió a un tratamiento de envejecimiento posterior a la soldadura. De acuerdo con los resultados, la velocidad de soldadura en el rango probado, que representa velocidades de soldadura bajas y altas, no tiene mayor influencia en las propiedades mecánicas y de fatiga de las soldaduras realizadas por FSW. Sin embargo, a una velocidad de soldadura significativamente menor, el rendimiento de la fatiga se mejoró posiblemente debido a la mayor cantidad de calor suministrado a la soldadura por unidad de longitud. Las soldaduras MIG-pulse y TIG mostraron una resistencia estática y dinámica más baja que las soldaduras realizadas por el proceso FSW.

Por su parte **Kovacevic (2003) [17]:** Utiliza un modelo tridimensional basado en el análisis de elementos finitos para estudiar el historial térmico y el proceso termo-mecánico en la soldadura a tope de la aleación de aluminio 6061T6.

Por otra parte **Huseyin Uzun et al. (2004) [18]:** investigaron que la unión disímil de la aleación Al 6013-T4 y acero inoxidable X5CrNi18-10, esta investigación se llevó a cabo utilizando la técnica de soldadura por fricción con agitación (FSW). Se investigaron las propiedades de microestructura, dureza y fatiga de la unión disímil aluminio 6013 y el acero inoxidable. La microscopía óptica se usó para caracterizar las microestructuras del nugget de soldadura, la zona afectada por el calor (HAZ), la zona afectada termomecánicamente (TMAZ) y los materiales base.

Así mismo **Kovacevic (2005)** [19]: Continúa su investigación y se centró en la simulación termo-mecánica ocurrida en el proceso de soldadura por fricción con agitación, esto para predecir el campo de temperatura transitorias, las tensiones activas desarrolladas, las fuerzas en las tres dimensiones y las tensiones residuales. Encontraron que las condiciones de contorno en el modelado térmico del proceso de soldadura por fricción con agitación juegan un papel vital en el perfil de temperatura final.

Por otra parte **Aleem Pasha (2006)** [20]: Establecieron una envolvente de parámetros durante el proceso de soldadura por fricción con agitación (FSW) para una aleación AA 6061 reforzada con 20% de partículas de  $Al_2O_3$ , y determinaron las propiedades de las soldaduras obtenidas. Observaron la microestructura por medio de un microscopio óptico y las imágenes se han analizado con un software de análisis de imágenes. También se llevaron a cabo microdurezas y ensayos de tensión. El efecto de la agitación de la herramienta tiene una influencia sustancial en la distribución y forma de las partículas de refuerzo. Las pruebas de tensión revelaron eficiencias conjuntas de más del 80% para el  $R_p0$ , y de un poco más del 70% para el  $R_m$ , fallando fuera de la zona de agitación.

Así mismo **Cavalierea (2007)** [21]: Analizo los efectos de los parámetros en las propiedades mecánicas y microestructurales de las soldaduras de la aleación AA6082 producidas por fricción con agitación. Obteniendo diferentes muestras soldadas empleando velocidades de rotación fijas de 1600 rpm y variando las velocidades de soldadura de 40 a 460 mm / min. Realizando observaciones por medio de SEM de las muestras de fatiga, soldadas a 115 mm / min, mostrando que a niveles de amplitud de esfuerzo más altos las grietas se inician en la superficie de las soldaduras. Al disminuir la amplitud de la tensión, las grietas se inician por los defectos internos.

Por otra parte **Moreira (2008)** [22]: Se llevó a cabo la caracterización mecánica y metalúrgica de las soldaduras por fricción con agitación de la aleación de aluminio 6061-T6 con 6082-T6. Para realizar la comparación, se usaron soldaduras de materiales similares de cada una de las dos aleaciones. El trabajo incluyó el examen de microestructura, microdureza, tensión y pruebas de flexión de todas las soldaduras. Se realizó un modelo por medio de

elemento finito aproximado a la soldadura, teniendo en cuenta las propiedades de resistencia a la tracción, modelando una prueba de flexión en las soldaduras. Este estudio muestra que la soldadura por fricción con agitación de la unión disímil presenta propiedades mecánicas intermedias en comparación con cada material base. En las pruebas de tensión, la unión disímil mostró propiedades intermedias.

Por su parte **Sandra Zimmer (2009)** [23]: Presenta los resultados de una investigación experimental, realizada en la etapa de inmersión de la soldadura por fricción con agitación (FSW). Los trabajos de investigación anteriores mostraron que la fuerza axial y el par motor generados durante esta etapa eran característicos para una calificación estática de una máquina FSW. Por lo tanto, los objetivos de la investigación son comprender mejor la relación entre los parámetros de soldadura, las fuerzas y el par generado.

Por otra parte **Yasunari Tozaki (2010)** [24]: Ha propuesto una herramienta recientemente desarrollada para la soldadura por puntos por fricción (FSSW), que no tiene pin, sino una ranura de desplazamiento en la superficie del hombro (herramienta de desplazamiento). Mediante el uso de esta herramienta, FSSW se ha realizado la unión en láminas de aleación de aluminio 6061-T4 y se discutió el potencial de la herramienta en términos de resistencia estática en las soldaduras. Las observaciones experimentales mostraron que la herramienta de desplazamiento tenía un rendimiento comparable o superior a una herramienta de pin convencional. La fractura por cizalladura se produjo a profundidades de hundimiento del hombro más pequeñas o en tiempos de sostenimiento de la herramienta más cortos, mientras que la fractura de tapón se produjo en profundidades de penetración del hombro más grandes o en tiempos de mantenimiento de herramienta más largos. Se indicó que la fuerza de cizallamiento a la tensión y los modos de fractura asociados se determinaron mediante dos parámetros geométricos en la zona de soldadura.

No obstante **S. Rajakumar (2011)** [25]: Intento desarrollar relaciones empíricas para predecir el tamaño de grano y la dureza de la zona de agitación en la soldadura por fricción con agitación de la aleación de aluminio AA6061. Las relaciones empíricas se desarrollan mediante una metodología de superficie de respuesta que incorpora la herramienta FSW y

los parámetros del proceso. También se estableció una relación de regresión lineal entre el tamaño de grano y la dureza del nugget de soldadura en las uniones.

Por su parte **Mariano (2012)** [26]: Presenta una revisión de la literatura sobre el modelado de soldadura por fricción con agitación (FSW), con un enfoque especial en la generación de calor debido a las condiciones de contacto entre la herramienta FSW y la pieza de trabajo. Un modelo del proceso FSW confiable depende del ajuste fino de algunos procesos y parámetros, por lo general, estos parámetros se obtienen con base en datos experimentales. El modelado numérico del proceso FSW puede ayudar a lograr dichos parámetros con menos esfuerzo y con ventajas económicas.

Por su parte **Guo (2013)** [27]: Estudio los efectos de la posición de los materiales y la velocidad de soldadura en el flujo del material, la microestructura, la distribución de microdureza y la resistencia a la tensión, en las soldaduras disimiles de AA6061 y AA7075. Se reveló que la mezcla del material es mucho más efectiva cuando la aleación AA6061 se localizó en el lado de avance y se formaron múltiples centros de vórtices verticalmente en el nugget.

De forma análoga **Liu (2014)** [28]: Estudio una aleación de aluminio 6061-T6 de 4 mm de espesor soldada por fricción con agitación y una herramienta de autoretracción, utilizando una velocidad constante de rotación de la herramienta de 600 rpm / min. La herramienta de autorreacción especialmente diseñada se caracterizó por los dos diferentes diámetros en el hombro. Los resultados de los ensayos de tensión indicaron que la elongación y la resistencia a la tensión de las uniones aumentaron al aumentar la velocidad de soldadura. Las uniones libres de defectos se obtuvieron a velocidades de soldadura más bajas y la fractura por tensión se localizó en la zona afectada térmicamente en el lado de avance.

No obstante **Rajesh (2015)** [29]: Planteo como objetivo principal de la investigación es optimizar el perfil de la herramienta entre cuatro geometrías, para observar el efecto que estas tienen en el aumento del límite elástico y la dureza. Los principales parámetros considerados en este estudio son la entrada de calor desde el hombro de la herramienta y el

pin de la herramienta, se analizó la distribución de temperaturas por medio del uso del software ABACUS. Para lo cual se soldaron cuatro piezas de trabajo con los cuatro perfiles diferentes del pin, la velocidad de rotación y la velocidad de avance fueron 1200 rpm y 1.25 mm / seg. Después de soldar la pieza, se realizan pruebas de dureza y tracción para verificar la resistencia de la soldadura. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido para verificar si hay defectos y porosidad en la soldadura.

Por otra parte **K. Elangovan (2016)** [30]: Realiza un estudio sobre la influencia de varios procedimientos de tratamiento térmico después de la soldadura sobre las propiedades de tensión de las uniones en una aleación de aluminio AA6061 realizadas por el proceso de soldadura por fricción con agitación. Se usaron placas laminadas de aleación de aluminio AA6061 de 6 mm de espesor para fabricar las soldaduras. Los tratamientos térmicos que se realizaron fueron tres, solubilizado, envejecimiento artificial y una combinación de ambos. Se evaluaron las propiedades del material soldado bajo estos tratamientos térmicos, como son, límite elástico, resistencia a la tensión, alargamiento y la eficacia de la junta. Las microestructuras de las uniones soldadas se analizaron mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de transmisión. Se encontró que un simple tratamiento de envejecimiento artificial era más benéfico que otros métodos de tratamiento para mejorar las propiedades de tensión de las uniones de aleación de aluminio AA6061 con soldadura por fricción con agitación.

De igual manera **Vikas Sharma (2017)** [31]: Llevo a cabo tres tratamientos térmicos posteriores a la soldadura en uniones soldadas por fricción con agitación de aleaciones Al-Si-Mg para investigar su efecto sobre la microestructura y las propiedades mecánicas. En general, los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura afectaron significativamente la microestructura y la morfología de los granos de aluminio y el fortalecimiento de los precipitados en todas las zonas de la soldadura por fricción con agitación. Los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura homogeneizaron la morfología del reforzamiento de los precipitados. El envejecimiento artificial dio como resultado una mejor combinación de propiedades de tracción que otras uniones de soldadura tratadas térmicamente después de la soldadura. El tratamiento de solubilizado con envejecimiento artificial se puede utilizar para

mejorar la resistencia a la tracción a expensas del % de elongación, mientras que el tratamiento de solubilizado no es una opción viable para mejorar el rendimiento de la soldadura. Los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura también afectaron el modo de fractura durante la prueba de tensión.

En cuanto a la soldadura por fricción con agitación en polímeros, Adeel Zafar realizó una recopilación de trabajos realizados en la unión de polímeros bajo esta técnica de unión en estado sólido.

**Adeel Zafar (2017)** [32]: Presenta una visión general del estado del arte del proceso de soldadura por fricción con agitación aplicado en polímeros similares y diferentes. Muestra los parámetros del proceso que son importantes para la resistencia de la soldadura y diversos enfoques para maximizar estos resultados, como un breve análisis sobre la influencia de la inducción de calor externo, la modificación de la herramienta y el flujo de materiales. Finalmente, se realizan unas conclusiones de los beneficios de este proceso de soldadura en polímeros así como recomendaciones futuras.

El objetivo principal de la presente tesis de doctorado fue el de implementar el proceso de soldadura por fricción con agitación, diseñar y fabricar las herramientas para unir la aleación de aluminio 6061-T6, así como incrementar las propiedades mecánicas de la soldadura mediante un tratamiento térmico de envejecimiento parcial y disminuir el tiempo de envejecimiento después de la soldadura.

## CAPITULO 2. CONCEPTOS GENERALES.

### 2.1. Aleaciones de aluminio, descripción general.

Cuando se colocó una tapa de aluminio de 6 libras en la parte superior del monumento a Washington en 1884, el aluminio era tan raro que se consideraba un metal precioso. En menos de 100 años, sin embargo, el aluminio se convirtió en el metal más utilizado después del hierro. Si bien todas las aleaciones de aluminio son descubrimientos recientes en comparación con metales como el hierro, el cobre, el plomo y el estaño, la industria del aluminio continúa desarrollando nuevas aleaciones y aplicaciones. En la naturaleza, el aluminio se encuentra estrechamente combinado con otros elementos, principalmente oxígeno y silicio, en depósitos de bauxita. Debido a que es tan difícil extraer aluminio puro en su estado natural, no fue hasta 1807 que fue identificado por Sir Humphry Davy de Inglaterra, que lo llamó alúmina. Davy había producido con éxito cantidades pequeñas y relativamente puras de potasio, pero no aisló el aluminio [32,33].

En 1825, Hans Oersted de Dinamarca finalmente produjo un pequeño trozo de aluminio calentando la amalgama de potasio con cloruro de aluminio. Napoleón III de Francia, intrigado con posibles aplicaciones militares del metal, promovió la investigación que condujo al método de producción mejorado de Sainte-Claire Deville en 1854, que utilizaba sodio menos costoso en lugar de potasio. Deville nombró a los depósitos de aluminio cerca de Les Baux en el sur de Francia "bauxita" y cambió la designación de Davy a "aluminio". Probablemente debido al papel principal desempeñado por Francia en el desarrollo inicial del metal, la designación de Deville fue adoptada en todo el mundo, incluido el país de origen de Davy [32].

Sin embargo, estos procesos de recuperación de la reacción química seguían siendo demasiado caros para una aplicación práctica generalizada. En 1886, Charles Martin Hall de Oberlin, Ohio, y Paul L. T. H'eroult en París, trabajando de manera independiente, descubrieron prácticamente al mismo tiempo el proceso electrolítico que ahora se utiliza para la producción comercial de aluminio.

El proceso de Hall-H'roult comienza con óxido de aluminio, un material blanco fino conocido como alúmina, que se produce refinando químicamente la bauxita. La alúmina se disuelve en una sal fundida llamada criolita en células grandes carbonizadas. Se configura una batería pasando corriente eléctrica directa desde el revestimiento de la celda que actúa como cátodo y un ánodo de carbón suspendido en el centro de la celda, separando el aluminio y el oxígeno. El aluminio fundido producido se extrae y se enfría en un sólido. Hall pasó a patentar este proceso y ayudó a fundar, en la cercana Pittsburgh en 1888, lo que se convirtió en la Compañía de Aluminio de América, ahora llamada Alcoa. El éxito de esta empresa fue ayudado por el descubrimiento del alemán Karl Joseph Bayer sobre este momento de un proceso práctico que lleva su nombre para refinar la bauxita en alúmina [34].

El aluminio tiene una serie de propiedades que lo convierten en un material de ingeniería muy útil. Es resistente a la corrosión y ligero, con una conductividad de aproximadamente el 60% de la del cobre. Sin embargo, la conductividad por libra del aluminio es el doble que la del cobre y lo hace atractivo para su uso en líneas eléctricas que abarcan grandes distancias. El aluminio puro tiene baja resistencia, pero los elementos de aleación se utilizan para aumentar su fuerza y relación resistencia-peso. Debido a su estructura cúbica centrada en la cara, el aluminio es dúctil y se moldea fácilmente a través de una amplia variedad de métodos comunes [35]

Debido a que el aluminio es muy activo químicamente, atrae oxígeno y cualquier superficie de este se oxida rápidamente. Las molduras de aluminio, las ventanas y los marcos estructurales a menudo tienen un aspecto ligeramente gris mate. Este color se debe a la capa superficial oxidada del aluminio. A diferencia de los metales ferrosos, la superficie oxidada de aluminio se adhiere al metal y proporciona una capa protectora, que evita un ataque posterior. Este hecho es la base para la anodización del aluminio. El proceso de anodización implica colocar un ánodo de aluminio en una celda de electrodeposición con ácido oxálico, sulfúrico o crómico como solución de electrodeposición o electrolito. La corriente se aplica a la solución y el ánodo se recubre con un revestimiento de óxido que es duro y resistente al desgaste. Los recubrimientos anodizados le dan al metal una mejor apariencia [35].

La Asociación de Aluminio ha ideado un método de numeración para aleaciones de aluminio fundido y forjado. El sistema para aleaciones de aluminio forjado es un sistema de cuatro dígitos. El primer dígito indica los elementos de aleación en la aleación. El segundo dígito indica las modificaciones de la aleación o el grado de control de las impurezas. Los dígitos tercero y cuarto son números arbitrarios que identifican una aleación específica o indican la pureza de la aleación superior al 99%. La tabla 1 ilustra el sistema de numeración de cuatro dígitos para aleaciones de aluminio forjado.

Tabla 1. Sistema de designación en Aleaciones de Aluminio.

| Número de Serie | Elemento Aleante | Resistencia a la Corrosión | Esfuerzo | Tratamiento Térmico |
|-----------------|------------------|----------------------------|----------|---------------------|
| <b>1XXX</b>     | ----             | Exelente                   | Malo     | No                  |
| <b>2XXX</b>     | Cobre            | Malo                       | Exelente | Si                  |
| <b>3XXX</b>     | Manganeso        | Bueno                      | Malo     | No                  |
| <b>4XXX</b>     | Silicio          | ----                       | ----     | No                  |
| <b>5XXX</b>     | Magnesio         | Bueno                      | Bueno    | No                  |
| <b>6XXX</b>     | Magnesio-Silicio | Bueno                      | Bueno    | Si                  |
| <b>7XXX</b>     | Zinc             | Malo                       | Exelente | Si                  |

El sistema de numeración de aleación de aluminio de fundición es un sistema de numeración de tres dígitos que generalmente no está estandarizado. El sistema más común es la designación de la Asociación de Aluminio. Este sistema coloca las aleaciones de colada de silicio hasta 99, silicio-cobre por 100 a 199, magnesio de 200 a 299 y silicio-manganeso de 300 a 399. Estas designaciones se refieren a aleaciones específicas cuyas especificaciones individuales están disponibles en la Asociación de Aluminio. Estas aleaciones de fundición se utilizan para fundición en arena, fundición de molde permanente y fundición a presión. La estructura interna de las aleaciones de aluminio puede modificarse mediante tratamiento térmico. Cuando se trata con calor, las aleaciones son seguidas por una designación de tratamiento térmico. Por ejemplo, 2024-T6 es un ejemplo de una aleación de cobre y aluminio

que ha sido tratada térmicamente en solución y luego envejecida artificialmente. Solo las aleaciones de cobre, zinc y magnesio pueden endurecerse por envejecimiento. Las aleaciones forjadas, que no son tratables térmicamente, reciben un sufijo 0 (recocido) o una designación F (tal como se fabrica). Otras designaciones de tratamiento térmico se muestran en la Tabla 2.

| Tabla 2. Designación de los tratamientos Térmicos en Aluminios. |   |
|---|---|
| Designación   | Definición  |
| F   | De fabrica  |
| O   | Recocido  |
| W   | Tratamiento Térmico de Solubilizado   |
| H   | Endurecimiento por deformación  |
| H1  | Solamente endurecido por deformación  |
| H2  | Endurecido por deformación y recocido parcialmente  |
| H3  | Endurecido por deformación y estabilizado   |
| T   | Tratamiento Térmico de Solución   |
| T1  | Enfriamiento desde una temperatura elevada, provocando un proceso de envejecimiento natural   |
| T2  | Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido naturalmente en condiciones estables.   |
| T3  | Tratamiento Térmico de solución, trabajo en frío, envejecido naturalmente a condiciones estables  |
| T4  | Tratamiento Térmico de solución , envejecimiento natural  |
| T5  | Enfriamiento desde una temperatura elevada en el proceso de conformado y envejecimiento artificial (tratamiento térmico de precipitación) |
| T6  | Tratamiento Térmico de solución , envejecimiento artificial   |
| T7  | Tratamiento Térmico de solución y sobre envejecido  |
| T8  | Tratamiento Térmico de solución, trabajado en frío y envejecido artificial.   |
| T9  | Tratamiento Térmico de solución, envejecimiento artificial, trabajo en frío   |
| T10   | Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificial                              |

Las aleaciones de aluminio se usan ampliamente en productos y aplicaciones cotidianas de nuestra vida, desde papel de aluminio para el envasado de alimentos y latas de aluminio fáciles de abrir para bebidas, hasta los miembros estructurales del avión en el que viajamos. El amplio uso de aleaciones de aluminio está dictado por una combinación deseable de propiedades, aunado a la facilidad con la que se pueden producir en una gran variedad de formas. Debido a las muchas propiedades del aluminio, puede usarse en una amplia variedad de aplicaciones. Por ejemplo, su conductividad eléctrica lo convierte en un buen conductor en aplicaciones eléctricas y electrónicas. Su peso ligero lo hace deseable en aplicaciones estructurales que requieren resistencia media y bajo peso. Su alta reflectividad para la radiación infrarroja y visible lo hace deseable en faros, lámparas y aislamientos. En forma de hojuela, el aluminio se usa como pigmento de pintura. Los bloques y los pistones del motor de aluminio fundido son un uso común para las aleaciones de fundición de aluminio [36]. El aluminio es muy versátil y tiene un número muy alto de aplicaciones industriales, entre algunas de sus ventajas tenemos:

*Alta conductividad eléctrica:* El aluminio conduce el doble de electricidad que el mismo peso de cobre, por lo que es ideal para usar en cables de transmisión eléctrica.

*Alta conductividad térmica:* El aluminio conduce el calor tres veces más que el hierro, lo que beneficia tanto las aplicaciones de calefacción y refrigeración, incluidos los radiadores de automóviles, los serpentines del evaporador del refrigerador, los intercambiadores de calor, los utensilios de cocina y los componentes del motor.

*Resistencia a la corrosión:* El aluminio proporciona una resistencia excepcional a la corrosión en muchos entornos químicos y de atmósfera, esto como resultado de la formación de una película de óxido en la superficie del material.

*Alta Resistencia a Temperaturas Criogénicas:* El aluminio no es propenso a la fractura frágil a bajas temperaturas y tiene una mayor resistencia y tenacidad a bajas temperaturas, por lo que es útil para los tanques criogénicos.

*Reflexividad:* El aluminio es un excelente reflector de la energía radiante; de ahí su uso para reflectores de calor, lámparas y en aislamientos.

*No es tóxico:* Debido a que el aluminio no es tóxico, es ampliamente utilizado en la industria del envasado para alimentos y bebidas, así como para tuberías y recipientes utilizados en el procesamiento de alimentos y utensilios de cocina.

*Reciclable:* El aluminio se recicla fácilmente; aproximadamente el 30% de la producción de aluminio de EE. UU, proviene de material reciclado. El aluminio hecho de material reciclado requiere solo el 5% de la energía necesaria para producir aluminio a partir de bauxita. A menudo, una combinación de las propiedades del aluminio juega un papel en su selección para una aplicación determinada.

*Relación de resistencia / peso:* La combinación de una resistencia relativamente alta con baja densidad significa una alta eficiencia de resistencia para las aleaciones de aluminio y muchas oportunidades para el reemplazo de metales más pesados sin pérdida en la capacidad de carga. Esta característica, combinada con la excelente resistencia a la corrosión y reciclabilidad, ha llevado al amplio uso del aluminio en contenedores, aeronaves y aplicaciones automotrices.

Como todos los materiales, el aluminio cuenta con una serie de desventajas que limitan sus usos y aplicaciones industrialmente, entre las que se pueden mencionar [36, 37]:

*Módulo de elasticidad:* Los módulos elásticos de las aleaciones de aluminio son aproximadamente un tercio de los del acero. En aplicaciones tales como puentes, donde algunos diseños pueden ser críticos a la deflexión, se debe considerar el hecho de que las aleaciones de aluminio se desviarán aproximadamente tres veces más que los miembros de acero de tamaño comparable; para compensar esto, los miembros de aluminio sujetos a cargas de flexión generalmente se hacen más profundos o más gruesos en sus extremidades superiores e inferiores para reducir las tensiones y/o las deflexiones.

*Temperatura de fusión:* Las aleaciones de aluminio se funden a aproximadamente  $650^{\circ}\text{C}$ , muy por debajo del punto de fusión de los aceros, por lo que no deberían seleccionarse para aplicaciones tales como tuberías de combustión y puertas de incendios, donde el bajo punto de fusión puede dar como resultado un rendimiento insatisfactorio. El límite útil de la aplicación estructural a alta temperatura de aleaciones de aluminio es de aproximadamente  $260^{\circ}\text{C}$  para aleaciones convencionales o aproximadamente  $315^{\circ}\text{C}$  para aleaciones mejoradas con alúmina. Son más lentos para alcanzar altas temperaturas en los incendios que otros metales como los aceros debido a su mayor conductividad térmica y emisividad. Sin embargo, no deben usarse cuando los requisitos del servicio incluyen una resistencia estructural superior a  $260^{\circ}\text{C}$  o una exposición superior a  $537^{\circ}\text{C}$ .

*Susceptibilidad a la corrosión por esfuerzos:* Algunas aleaciones de aluminio, en particular las aleaciones 2xxx y 7xxx, cuando están sometidas a esfuerzo perpendicular al plano principal del grano (es decir, en la dirección del cortante transversal) pueden estar sujetos a la fisuración intergranular por corrosión bajo tensión a menos que se les haya dado un tratamiento térmico especial para reducir o eliminar este tipo de comportamiento.

*Fragilidad por mercurio:* Las aleaciones de aluminio nunca deben usarse cuando puedan estar en contacto directo con mercurio líquido o vaporizado; esta interacción puede causar fragilidad severa del límite de grano. Esta es una exposición improbable para la gran mayoría de las aplicaciones, pero en cualquier caso donde exista la posibilidad de que haya mercurio, se debe evitar el uso de aleaciones de aluminio.

## **2.2. Materiales polímeros.**

Los polímeros son un grupo de materiales caracterizados por cadenas de moléculas formadas por unidades más pequeñas llamadas monómeros, la mayoría de los cuales están unidos artificialmente. El término polímero proviene del griego que significa "muchas partes", y el término monómero se refiere a una sola molécula grande que comprende la unidad básica para la cadena del polímero. El mer es la unidad repetida en moléculas más grandes, como el monómero y el polímero. La mayoría de los polímeros son materiales orgánicos (basados en

el carbono) que contienen moléculas compuestas de varias combinaciones de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono. Estos cuatro elementos se encuentran entre los más comunes encontrados en polímeros orgánicos. El carbono forma la "columna vertebral" de la cadena del polímero y los otros constituyentes se adhieren al carbono. Estas cadenas de polímeros se enredan y forman bobinas irregulares, que les dan una mayor resistencia. Una parte de este enredo es natural y puede ser inducida por aditivos y procesos controlados. La mayoría de los polímeros se basan en hidrocarburos, donde los elementos de carbono e hidrógeno forman combinaciones predecibles basadas en la relación,  $C_nH_{2n+2}$ . Estos productos intermedios petroquímicos son productos químicos fabricados a partir de parafinas de petróleo y gas natural, que luego se procesan en productos poliméricos. Estos productos intermedios son la base de casi todos los productos de caucho y polímeros. Los intermedios también se producen a partir del carbón. El más importante de estos compuestos intermedios es el etileno. Estos se denominan intermedios de olefina e incluyen acetileno, propileno, butileno, isobutileno y butadieno. La mayoría de estos se utilizan en la producción de cauchos. El nylon se produce a partir de butadieno; el cloruro de polivinilo se produce a partir de acetileno. Los compuestos intermedios aromáticos incluyen benceno, tolueno y xileno. Otra categoría de compuestos intermedios contiene los compuestos intermedios nafténicos, de los cuales el ciclohexano es el más importante y se utiliza en la producción de nailon. Los compuestos intermedios aromáticos, nafténicos y olefínicos se utilizan para producir insecticidas, detergentes, combustibles para cohetes, películas, productos farmacéuticos, explosivos, alcoholes y otros productos similares. Los plásticos celulósicos se producen a partir de madera en lugar de petróleo, carbón o gas [35, 36,38].

### **2.2.1. Clasificación de los materiales polímeros.**

Los plásticos se pueden clasificar de varias maneras. Las dos clasificaciones principales son materiales *termoendurecibles* y *materiales termoplásticos*. Como su nombre lo indica, los plásticos termoestables o termoplásticos se fraguarán, curarán o endurecerán en una forma permanente. El curado, que normalmente ocurre rápidamente bajo calor o luz ultravioleta (UV) conduce a una reticulación (reacción química presente en la química de los polímeros)

irreversible del polímero. Los termoplásticos difieren de los materiales termoendurecibles en que no se fraguarán ni curarán bajo calor. Cuando se calientan, los termoplásticos simplemente se ablandan a un estado móvil y fluido donde se les puede dar forma de objetos útiles. Al enfriarse, los termoplásticos se endurecen y mantienen su forma. Los termoplásticos se pueden ablandar repetidamente por calor.[38]

Los termoplásticos se pueden clasificar como plásticos amorfos o semicristalinos. La mayoría de los polímeros son completamente amorfos o tienen un componente amorfo incluso si son cristalinos. Los polímeros amorfos son vidrios duros y rígidos por debajo de una temperatura definida, que se conoce como temperatura de *transición vítrea*. Por encima de la temperatura de transición vítrea, el polímero amorfo se vuelve blando y flexible y puede conformarse. Las propiedades mecánicas muestran cambios profundos cerca de la temperatura de transición vítrea. Muchos polímeros no son completamente amorfos, pero son semicristalinos. Los polímeros cristalinos tienen puntos de fusión que están por encima de su temperatura de transición vítrea. El grado de cristalinidad y la morfología de la fase cristalina tienen un efecto importante sobre las propiedades mecánicas. Los plásticos cristalinos se volverán menos rígidos por encima de su temperatura de transición vítrea, pero no fluirán hasta que la temperatura esté por encima del punto de fusión cristalino. A temperaturas ambiente, los plásticos cristalinos / semicristalinos tienen mayor rigidez, dureza, densidad, lubricidad, resistencia a la fluencia y resistencia a los solventes que los plásticos amorfos.

Otra clasificación de los polímeros de punto de vista de costo y rendimiento puede ser de plástico comercial o de ingeniería. Otra clase importante de resinas poliméricas son los elastómeros. Los materiales elastoméricos son polímeros similares al caucho con temperaturas de transición vítrea por debajo de las temperaturas ambiente. Por debajo de esa temperatura de transición vítrea, un elastómero se volverá rígido y perderá sus características gomosas [36].

### 2.2.2. Propiedades de los materiales polímeros. .

Los *polímeros termoplásticos* a menudo exhiben propiedades plásticas, dúctiles. Se pueden formar a temperaturas elevadas, enfriar y refundir y reformar en diferentes formas sin

cambiar las propiedades del polímero. Sin embargo, el calor utilizado para derretir y volver a fundir el termoplástico debe controlarse cuidadosamente o el material se descompondrá. Las propiedades de los materiales termoplásticos están determinadas por el método de unión entre las cadenas de polímeros; en los materiales termoplásticos, estos enlaces son débiles, enlaces secundarios, como en las fuerzas de van der Waals. Mediante la aplicación de calor y presión, estos enlaces pueden debilitarse, y el material puede remodelarse. Una vez que se elimina el calor y la presión, los materiales termoplásticos se recargan a una nueva forma. Los polímeros termoplásticos comunes incluyen acrílico, nylon (poliamida), celulosa, poliestireno, polietileno, fluorocarbonos y vinilo.

Los *polímeros termoendurecibles* tienen fuertes enlaces primarios, a menudo formados por polimerización por condensación. Los polímeros termoestables tienen estos fuertes enlaces primarios en todas partes, y su estructura se asemeja a una molécula grande. Sus propiedades son el resultado de cambios químicos sufridos durante el procesamiento, bajo calor o mediante la aplicación de un catalizador. Una vez endurecidos, los polímeros termoendurecibles no se pueden suavizar o remodelar, debido a la pérdida de parte de la molécula (el subproducto de la reacción) durante el proceso de curado. Una vez curado, si se aplica más calor a un material termoendurecible, se quema, quema o descompone. Durante el curado, el polímero termoendurecible se vuelve rígido e insoluble a medida que las cadenas del polímero se enredan y reticulan. Los polímeros termoendurecibles comunes incluyen fenólicos, aminos, poliésteres, epoxis y alquidos [38].

Debido a que las fuerzas intramoleculares de los polímeros son más débiles que las fuerzas intermoleculares, la deformación en estos materiales es el resultado del deslizamiento entre moléculas en lugar de la ruptura de los enlaces. Mediante la aplicación de calor y presión, las

cadena de polímero se separan y se deslizan una sobre otra. Una vez que se eliminan el calor y la presión, se conserva la nueva formación.

Las principales *propiedades mecánicas de los polímeros* son la resistencia, la rigidez, la dureza y el punto de fusión. Se pueden agregar diversos materiales a los polímeros para mejorar ciertas propiedades, reducir el costo del polímero, mejorar la formabilidad del material y/o darle color al material. Estos aditivos se denominan rellenos, plastificantes, colorantes y lubricantes. A menudo se dividen en dos grupos: aditivos relacionados con el rendimiento y aditivos relacionados con el procesamiento, según su finalidad prevista.

Las propiedades de los polímeros dependen de los aditivos utilizados, los materiales añadidos para aumentar la resistencia del polímero; la cantidad y propiedades de los rellenos utilizados; y agentes colorantes usados, y plastificantes, que se agregan como lubricantes internos. Los polímeros termoplásticos están generalmente disponibles en películas, láminas, varillas, tubos y varias formas moldeadas o extruidas. La forma más común de polímero termoplástico es el moldeo de gránulos. Los polímeros termoendurecibles están generalmente disponibles como polvos o líquidos. Estos contienen el material polimérico básico, una carga, agente colorante, plastificante, un agente de endurecimiento (catalizador), que induce la reticulación, y un acelerador. Para hacer que los mers insaturados reaccionen entre sí y se unan, se usa un iniciador (generalmente un peróxido). Este iniciador provoca que se genere calor. Cuanto más calor, más rápida es la reacción. Si se genera demasiado calor (al agregar demasiado iniciador), el material tiende a burbujear y formar espuma. Este proceso se usa para endurecer las resinas líquidas reparadoras material. Generalmente, se agrega peróxido de metil etil cetona (MEKP) a la resina base para iniciar el proceso de endurecimiento [35].

### **2.2.3. Usos y aplicaciones de los polímeros.**

Los polímeros se pueden usar en la fabricación de materiales ligeros que requieren solo una resistencia baja a media; aislamiento eléctrico; aislamiento térmico; espuma flexible utilizada para empaquetar o rellenos; adhesivos o agentes de unión; o sustituye a materiales más costosos como guardabarros de automóviles, puertas, ventanas, etc. Los polímeros ofrecen una amplia

gama de aplicaciones y, con la adición de polímeros reforzados, ofrecen características que, basadas en la combinación de diferentes polímeros, ofrecen propiedades que no se encuentran en ningún otro material [39]. Algunos tipos comunes de polímeros y sus características son los siguientes:

**ABS( acrilonitrilo-butadieno-estireno):** Ligero, buena resistencia, excelente dureza.

**Acrílico:** Excelente calidad óptica; nombres comerciales: Lucite y Plexiglas; resistencia al impacto, a la flexión, a la tracción y al dieléctrico.

**Acetato de celulosa:** Buen aislante, de fácil formación, alta absorción de humedad, baja resistencia química.

**Butirato de acetato de celulosa:** Similar al acetato de celulosa pero resistirá condiciones más severas.

**Epoxias:** Buena dureza, elasticidad, resistencia química, estabilidad dimensional; utilizado en revestimientos, cementos, componentes eléctricos y herramientas.

**Etil celulosa:** Alta resistencia eléctrica, alta resistencia al impacto, conserva las propiedades a bajas temperaturas, baja resistencia al desgarro.

**Fluorocarbono:** Inerte para la mayoría de los productos químicos, resistencia a altas temperaturas, bajo coeficiente de fricción (teflón), utilizado para cojinetes autolubricantes y recubrimientos antiadherentes.

**Melamina:** Excelente resistencia al calor, al agua y a los productos químicos, excelente resistencia al arco; usado en vajilla y para tratar el papel y la tela para resistencia al agua.

**Fenólico:** Duro, relativamente fuerte, de bajo costo, de fácil formación, generalmente opaco; amplia variedad de formas disponibles.

**Poliamida:** Buena resistencia a la abrasión y dureza, excelente estabilidad dimensional; utilizado en materiales de rodamientos que requieren poca lubricación, textiles, hilo de pescar y cuerda.

**Policarbonato:** Alta resistencia y dureza; utilizado en gafas de seguridad.

**Polietileno:** Alta dureza, alta resistencia eléctrica; utilizado en tapas de botellas, utensilios irrompibles y aislamiento de cables.

**Polipropileno:** El peso más ligero, más duro que el polietileno.

**Poliestireno:** Alta estabilidad dimensional, baja absorción de humedad, excelente dieléctrico, quema fácilmente, baja resistencia a ciertos químicos.

**Silicona:** Resistente al calor, baja absorción de humedad, altas propiedades dieléctricas.

**Urea formaldehído:** Similar a fenólicos; utilizado en el interior:

**Vinilo:** Resistente al desgarramiento, buen envejecimiento, buena estabilidad dimensional, buena resistencia a la humedad; utilizado en revestimientos de paredes y suelos, telas y mangueras.

## **2.3. Soldadura en estado sólido.**

### **2.3.1. Introducción.**

La soldadura se ha considerado tradicionalmente como un arte en lugar de un proceso de fabricación tecnológica. Esta reputación no se ha visto favorecida por la dependencia de las técnicas convencionales de unión en operadores manuales altamente calificados y por el costo relativamente alto y la mala reproducibilidad asociados con muchos procesos de soldadura por fusión. Estos atributos condujeron a la clasificación de la soldadura en estado sólido como un Proceso Especial de unión en los estándares internacionales de calidad. De hecho, aunque puede tratarse de un tema multidisciplinario complejo, se han llevado a cabo

una gran cantidad de investigaciones de alta calidad sobre los fundamentos de los procesos de soldadura en estado sólido y ahora se comprenden bien los principios básicos.

Los primeros desarrollos en la tecnología de soldadura se centraron principalmente en la soldabilidad y la investigación metalúrgica, lo que permitió unir una amplia gama de materiales, mantener las propiedades adecuadas de las uniones y controlar la integridad de las soldaduras. Aunque aún se requieren más trabajos en el área de investigación de materiales, en particular para permitir la unión efectiva de materiales avanzados, gran parte del esfuerzo reciente se ha dedicado a una mejor comprensión de los procesos básicos, el desarrollo y control de consumibles, equipos y la automatización.

En comparación con otros métodos de unión, como el remachado y el atornillado, las soldaduras tienden a ser más resistentes, más livianas y más baratas de producir. Una gran cantidad de procesos conforman la familia de tecnologías de soldadura e incluyen métodos para soldar metales, polímeros y cerámicas, así como materiales compuestos y de ingeniería emergentes. Estas variantes de proceso de soldadura permiten una gran flexibilidad en el diseño de los componentes a soldar. También fomentan el diseño para una rentabilidad óptima en términos de productividad y rendimiento del producto. La seguridad también es una consideración importante cuando se adopta un proceso de soldadura.

La mayoría de los procesos de soldadura no pudieron obtener su debida importancia en el escenario de producción en el momento de su desarrollo, a excepción de la soldadura utilizada para reparación. Sin embargo, en etapas posteriores todos ellos encontraron sus nichos en el entorno de fabricación. En la actualidad, la soldadura se utiliza ampliamente en la fabricación de recipientes a presión, puentes, estructuras de edificios, aviones y naves espaciales, ferrocarriles, construcción naval, automóviles, electricidad, electrónica y defensa, y aplicaciones generales.

Los procesos básicos de unión se pueden subdividir en:

Unión mecánica.

Pegamento adhesivo.

Soldadura fuerte y Soldadura blanda.

Soldadura (fusión, estado sólido).

Se dispone de un gran número de técnicas de unión y, en los últimos años, se han producido desarrollos significativos, particularmente en las áreas de unión adhesiva y soldadura. Los procesos de soldadura existentes se han mejorado y se han introducido nuevos métodos de unión. La proliferación de técnicas de soldadura dificulta la selección del proceso y puede limitar su explotación efectiva [40].

### **2.3.2. Generalidades de la soldadura de estado sólido.**

Los procesos de soldadura de estado sólido producen coalescencia mediante la aplicación de presión a una temperatura de soldadura por debajo del punto de fusión de los materiales que se unen y sin la adición de un metal de aportación. La unión de dos superficies tiene lugar por enlace atómico; el proceso no implica la fusión de los materiales. A medida que las superficies se presionan juntas, los átomos en las dos superficies se atraen entre sí para formar enlaces entre las superficies. Los enlaces así formados son responsables del proceso de unión. Las propiedades mecánicas de la soldadura son similares a las de los metales originales. El proceso se usa comúnmente para soldar materiales diferentes, como aluminio con acero en cascos de barcos o placas compuestas [41].

En estos procesos, la presión y la deformación proporcionan una porción significativa de la unión. En general, no se requiere la fusión del metal base y generalmente no se requiere material de relleno, como ya se mencionó anteriormente. La unión por difusión utiliza una presión lo suficientemente grande como para deformar localmente las colinas y los valles de las superficies contiguas de los materiales. No se produce una gran deformación de la pieza de trabajo. Las temperaturas del proceso se encuentran por debajo de la temperatura de fusión

de la pieza de trabajo, esto permite que los átomos se difundan a través de la interfaz de los materiales, para rellenar cualquier vacío restante y completar el proceso de unión. Los procesos de unión por deformación, utilizan presiones aplicadas por encima del límite de fluencia del material, lo que provoca una gran deformación y obliga a los átomos de una superficie a un contacto mayor con los átomos de la segunda superficie. La atracción atómica proporciona el vínculo para la unión. Se puede proporcionar la presión para el trabajo mediante varios métodos, que incluyen soldadura en frío, soldadura explosiva, soldadura de forja, soldadura por fricción, soldadura a presión en caliente, soldadura por rodillo, soldadura ultrasónica y **soldadura por fricción y agitación** [41,42].

En la mayoría de los procesos de estado sólido, se crea un enlace metalúrgico con poca o ninguna fusión de los metales básicos. Para unir metalúrgicamente dos metales similares o diferentes, los dos metales deben ponerse en contacto para que sus fuerzas atómicas cohesivas se atraigan mutuamente. Este contacto físico normal entre las dos superficies, se limita por la presencia de películas químicas, gases, aceites, etc. Para que la unión atómica tenga éxito, estas películas y otras sustancias deben ser eliminadas. En la soldadura de fusión (así como en otros procesos de unión tales como soldadura fuerte y soldadura blanda), las películas se disuelven o se queman mediante altas temperaturas, y la unión atómica se establece mediante la fusión y solidificación de los metales en estos procesos. Pero en la soldadura de estado sólido, las películas y otros contaminantes deben eliminarse por otros medios para permitir que tenga lugar la unión metalúrgica. En algunos casos, una limpieza a fondo de las superficies se realiza justo antes del proceso de soldadura; mientras que en otros casos, la acción de limpieza se lleva a cabo como parte integral de unir las superficies de las piezas. En resumen, los ingredientes esenciales para una soldadura exitosa de estado sólido son que las dos superficies deben estar limpias, y deben ponerse en contacto físico muy cercano entre sí para permitir la unión atómica. Los procesos de soldadura que no implican fusión tienen varias ventajas sobre los procesos de soldadura por fusión. Si no se produce fusión, la zona afectada por el calor se reduce considerablemente, por lo que el metal que rodea la unión conserva mejor sus propiedades originales. Muchos de estos procesos producen juntas soldadas que comprenden toda la interfaz de contacto entre las dos partes, en lugar de puntos o costuras distintos, como en la mayoría de las operaciones de soldadura

por fusión. Además, algunos de estos procesos son aplicables a la unión de metales de diferentes características, sin preocupaciones sobre expansiones térmicas relativas, conductividades y otros problemas que generalmente surgen cuando se funden metales diferentes y luego se solidifican durante la unión [43].

### **2.3.3. Procesos de soldadura de estado sólido.**

Existen varios procesos de soldadura en estado sólido, algunos de ellos ya cuentan con bastante tiempo en la industria, sin embargo hay otros que son más modernos, a continuación se describirán estos procesos de soldadura en estado sólido.

**Soldadura de Forja:** La soldadura de forja tiene una importancia histórica en el desarrollo de la tecnología de fabricación. El proceso data de alrededor de 1000 a. C., cuando los herreros del mundo antiguo aprendieron a unir dos piezas de metal. La soldadura de forja es un proceso de soldadura en el que los componentes a unir se calientan a temperaturas de aproximadamente 1000 ° C y luego se forjan juntos mediante un martillo u otros medios. Los artesanos que lo practicaron necesitaron una habilidad considerable para lograr una buena soldadura según los estándares actuales, las piezas de trabajo también pueden soldarse enrolladas, estiradas o apretadas juntas. Se usa Flux para evitar que las superficies de soldadura se oxiden y produzcan una soldadura de baja calidad. Los fundentes comúnmente utilizados para acero bajo en carbono son el espato de la harina y el bórax. La soldadura de forja requiere una habilidad considerable por parte del operador para lograr una buena soldadura. Está restringido al hierro forjado y al acero dulce. El proceso tiene una importancia histórica en el desarrollo de la tecnología de fabricación; sin embargo, es de menor importancia comercial hoy en día [43].

**Soldadura en Frío:** La soldadura en frío (CW) es un proceso de soldadura de estado sólido que se realiza mediante la aplicación de alta presión a temperatura ambiente entre las superficies de contacto limpias. Las superficies de contacto deben estar excepcionalmente limpias para que CW funcione, y la limpieza generalmente se realiza desengrasando y cepillando con alambre inmediatamente antes de unir. Además, al menos uno de los metales

a soldar, y preferiblemente ambos, debe ser muy dúctil y libre de endurecimiento por trabajo. Los metales como el aluminio blando y el cobre pueden soldarse en frío fácilmente [43].

**Soldadura por rodillo:** La soldadura por rollo es una variación de la soldadura de forja o la soldadura en frío, dependiendo de si el calentamiento externo de las piezas de trabajo se realiza antes del proceso. La soldadura por rodillo (ROW) es un proceso de soldadura de estado sólido en el que se aplica presión suficiente para provocar la coalescencia mediante rodillos, ya sea con o sin aplicación de calor externo. El proceso se ilustra en la Figura 1. Si no se suministra calor externo, el proceso se llama soldadura en frío; si se suministra calor, se usa el término soldadura por laminación en caliente [43].

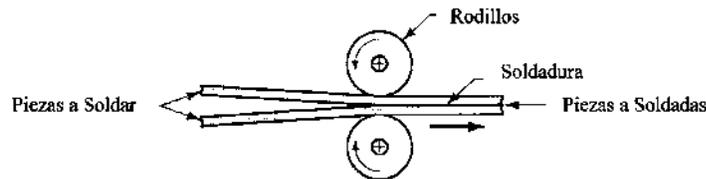


Figura 1. Soldadura por Rodillos [43].

**Soldadura a presión en caliente:** Esta soldadura produce coalescencia de materiales con calor y la aplicación de presión suficiente para producir una macro deformación del metal base. La unión de los materiales tiene lugar en el punto de contacto de las piezas a soldar, mediante la aplicación de calor y presión que conduce a la deformación. La deformación de la superficie da como resultado el agrietamiento de la película de óxido de la superficie y el aumento del área de metal limpio. El proceso generalmente se lleva a cabo en cámaras cerradas donde se puede usar vacío o un medio de protección. Existe una variación de la soldadura a presión en caliente, la soldadura a presión isostática en caliente, que implica la aplicación de presión con la ayuda de un gas inerte caliente en un recipiente a presión [43].

**Difusión de soldadura:** Produce la coalescencia de las superficies de contacto mediante la aplicación de presión y temperaturas elevadas. El mecanismo principal es la interdifusión de átomos a través de la interfaz. Los dos materiales se presionan entre sí a una temperatura elevada, generalmente entre el 50-70% del punto de fusión absoluto del material original,

durante un tiempo que varía desde unos pocos minutos hasta unas pocas horas. Las superficies a unir deben estar limpias, planas y mecanizadas con precisión. La presión se usa para aliviar los vacíos que pueden ocurrir debido a diferentes topografías de superficie. La unión por difusión de la mayoría de los metales se realiza al vacío o en una atmósfera inerte (nitrógeno seco, argón o helio) para reducir la oxidación perjudicial de las superficies de contacto. El calentamiento generalmente se realiza en un horno de inducción. La soldadura por difusión se usa normalmente en estructuras de chapa metálica. El proceso se usa para unir metales similares y diferentes, y en el último caso una capa de relleno de un metal diferente a menudo se intercala entre los dos metales base para promover la difusión [41, 42].

**Soldadura por Explosión:** La soldadura por explosión (EXW) es un proceso de soldadura de estado sólido en el que la rápida coalescencia de dos superficies metálicas es causada por la energía de un explosivo detonado. Se usa comúnmente para unir dos metales diferentes. Las aplicaciones incluyen la producción de láminas y planchas resistentes a la corrosión para fabricar equipos de procesamiento en la industria química y del petróleo. El término revestimiento de explosión se usa en este contexto. No se utiliza metal de relleno en EXW, y no se aplica calor externo. Además, no se produce difusión durante el proceso (el tiempo es demasiado corto). La naturaleza del enlace es metalúrgica, en muchos casos combinada con un enclavamiento mecánico que resulta de una interfaz ondulada entre los metales, Figura 2 [43].

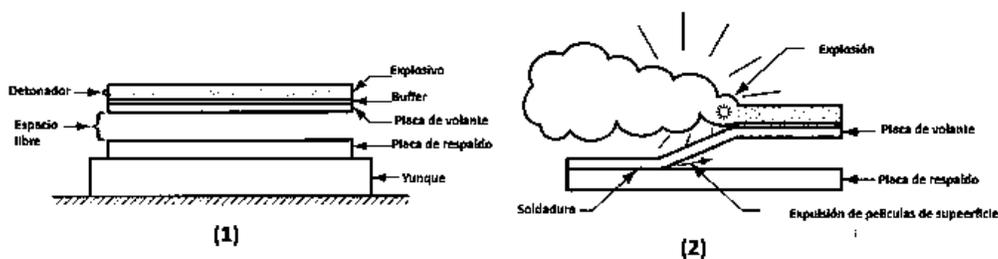


Figura 2. Soldadura por explosión, 1) configuración inicial, 2) durante la detonación de la carga explosiva [43].

**Soldadura por Fricción:** La soldadura por fricción es un proceso comercial ampliamente utilizado, susceptible a los métodos de producción automatizados. El proceso fue desarrollado en la (antigua) Unión Soviética e introducido en los Estados Unidos alrededor de 1960. La soldadura por fricción (FRW) es un proceso de soldadura de estado sólido en el que la coalescencia se logra mediante el calor de fricción combinado con la presión. La fricción es inducida por el roce mecánico entre las dos superficies, generalmente por rotación de una parte con respecto a la otra, para elevar la temperatura en la interfaz de la junta al rango de trabajo en caliente para los metales involucrados. Luego, las partes se impulsan una hacia la otra con suficiente fuerza para formar un enlace metalúrgico, Figura 3. La fuerza de compresión axial altera las partes, y el material desplazado produce un destello. Cualquier imperfección en la superficie de contacto se borrará durante el proceso. El material sobrante se debe maquinar para proporcionar una superficie lisa en la región de soldadura. Cuando se lleva a cabo correctamente, no se produce fusión en las superficies de contacto. Normalmente no se utilizan metales de relleno, fundente o gases de protección [43,44]

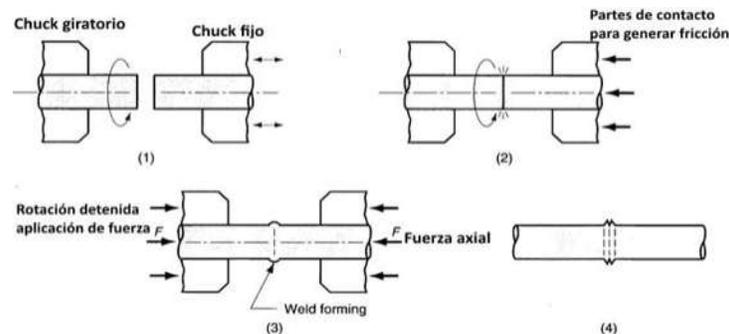


Figura 3. Soldadura por Fricción: 1) parte giratoria, sin contacto; 2) partes en contacto para generar calor por fricción; 3) rotación detenida y presión axial aplicada; y 4) soldadura [43].

**Soldadura por fricción con Agitación:** La soldadura por fricción con agitación (FSW), es un proceso de soldadura en estado sólido en el que una herramienta giratoria se hace avanzar a lo largo de la línea de unión entre dos piezas, generando calor de fricción y agitación mecánica en el material para formar la costura de soldadura. El proceso deriva su nombre de esta acción de agitación o mezcla. El FSW se distingue del FRW convencional por el hecho de que el calor de fricción es generado por una herramienta separada resistente al desgaste en lugar de por las partes mismas, este proceso no utiliza material de aporte, gases de

protección, reduce el consumo de energía hasta en un 50% en comparación con los procesos de soldadura tradicionales, Figura 4[43,44].

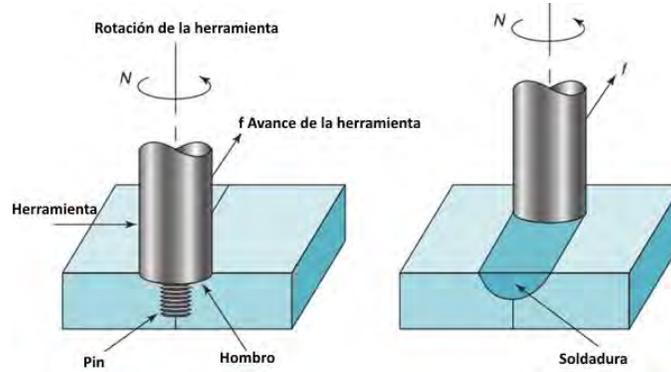


Figura 4. Soldadura por fricción con agitación [43].

**Soldadura por ultrasonido:** La soldadura por ultrasonido (USW) es un proceso de soldadura de estado sólido en el que dos componentes se mantienen unidos bajo una fuerza de sujeción moderada, y las tensiones de cizallamiento oscilatorio de frecuencia ultrasónica se aplican a la interfaz de los materiales para provocar la coalescencia. La operación se ilustra en la Figura 5. La soldadura por solapamiento es la aplicación más típica de este proceso de soldadura. El movimiento oscilatorio entre las dos partes descompone las películas de superficie para permitir un contacto más fuerte y una unión metalúrgica entre las superficies. Aunque el calentamiento de las superficies de contacto se produce debido al frotamiento interfacial y la deformación plástica, las temperaturas resultantes están muy por debajo del punto de fusión. No se requieren metales de relleno, fundentes ni gases de protección en este proceso [43].

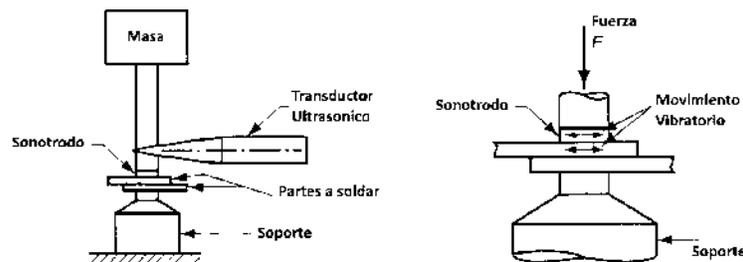


Figura 5. Soldadura por Ultrasonido.

## 2.4. Soldadura en materiales polímeros.

### 2.4.1. Introducción.

El uso de materiales poliméricos es cada vez más frecuente en muchas aplicaciones importantes, como el envasado, la construcción, los electrodomésticos, la electrónica, la automoción, la industria aeroespacial y mucho más, alrededor de 1983, el consumo volumétrico anual de polímeros excedía el consumo volumétrico de hierro y acero. La producción mundial de polímeros en 2006 alcanzó los 300 millones de toneladas. Los polímeros ya tienen una gama de aplicaciones que supera con creces la de cualquier otra clase de material disponible. La unión es un paso crítico en la fabricación de componentes de polímeros y compuestos poliméricos. A medida que aumentan los requisitos para el componente, también aumentan los requisitos para unirse, especialmente en aplicaciones estructurales. Los métodos para unir plásticos y compuestos se pueden dividir en tres categorías principales: *fijación mecánica*, *unión de adhesivo* y *por disolvente y soldadura*. La soldadura es un método efectivo para unir permanentemente componentes plásticos [45].

Los materiales poliméricos tienen muchas ventajas que incluyen: alta resistencia específica (relación resistencia / densidad), módulo específico alto (relación módulo / densidad), flexibilidad de diseño, costos de fabricación reducidos, excelente resistencia a la corrosión, solventes y al medioambiente, aislamiento térmico y eléctrico, durabilidad, entre otros [46].

Hoy en día, hay miles de grados de polímeros disponibles en el mercado. Estos cubren una amplia gama de propiedades, desde blandos a duros, dúctiles a frágiles, y débiles a duros. La amplia variedad de polímeros y compuestos poliméricos permite seleccionar e incluso personalizar el material para la aplicación específica. Por lo tanto, estos materiales se utilizan en más y más aplicaciones bajo requisitos cada vez más estrictos. Los esfuerzos para descubrir nuevos polímeros y modificar los polímeros existentes, para crear nuevas combinaciones de materiales aumentan aún más los usos potenciales de estos materiales [45].

## 2.4.2. Procesos de soldadura en materiales polímeros.

En la ingeniería de polímeros, el diseño de un artículo de una sola pieza para el moldeado es la situación ideal, ya que impide una operación de montaje. Sin embargo, las limitaciones mecánicas y otras consideraciones a menudo hacen que sea necesario unir las partes poliméricas, ya sea entre sí o a otras partes poliméricas o metálicas, para completar el ensamblaje. En tales casos, el proceso de unión puede ser una técnica de producción eficiente si se toman algunas precauciones y se siguen los procedimientos establecidos.

La unión es un paso crítico en la fabricación de componentes de polímeros y compuestos poliméricos. A medida que aumentan los requisitos para el componente, también aumentan los requisitos para unirse, especialmente en aplicaciones estructurales. Las uniones son necesarias siempre que: la integración de la pieza sea imposible debido a la complejidad y / o altos costos, el uso de diferentes materiales en el mismo componente, el desmontaje y la reparación del daño, la Figura 6 muestra la clasificación de los procesos de unión en materiales poliméricos [32,45].



Figura 6. Clasificación de los procesos de soldadura en polímeros [45]

**La fijación mecánica** supone el uso de piezas adicionales (sujetadores), tales como los tornillos metálicos, pernos, arandelas, remaches, o se basa en elementos de diseño integrados, como juntas de encaje a presión o de presión. La fijación mecánica se puede usar para unir materiales similares y diferentes. Por ejemplo, la fijación mecánica se usa comúnmente cuando se une un plástico a un metal, produciendo juntas permanentes o conexiones que pueden abrirse y sellarse nuevamente. Las ventajas de este enfoque son que no se requiere tratamiento de superficie y el desmontaje de los componentes para inspección y reparación es sencillo. Las principales limitaciones son el aumento de peso, la presencia de grandes

concentraciones de tensión alrededor de los orificios de los sujetadores y los subsiguientes problemas de corrosión en servicio. Las aplicaciones típicas de la sujeción mecánica se encuentran en las industrias aeroespacial, automotriz y de la construcción.

*En la unión adhesiva*, se coloca un adhesivo entre las partes que se unirán (adherentes) donde sirve como el material que une las partes y transmite la carga a través de la unión. *En la unión por solvente*, la aplicación de un solvente en la línea de unión induce una movilidad suficiente para que las cadenas de polímero se difundan entre sí. Debido a que el solvente debe plastificar fuertemente la superficie del polímero, esta técnica de unión se aplica principalmente a termoplásticos amorfos vidriosos, tales como resinas de policarbonato, acrílico y poliestireno. Estas técnicas han encontrado un amplio uso en virtud de su bajo costo y adaptabilidad a la producción de alta velocidad. Además, los enlaces adhesivos y solventes proporcionan una distribución relativamente uniforme de tensiones sobre las áreas ensambladas y una alta relación resistencia / peso. La unión por solvente es aplicable solo para la unión de productos amorfos termoplásticos, mientras que la unión adhesiva se puede usar con casi todos los plásticos [47].

*En la soldadura*, a veces denominada también unión por fusión, se aplica calor para fundir el material polimérico en las superficies de contacto, lo que permite la difusión intermolecular y los procesos de fijación de cadenas poliméricas para formar una junta.

### **2.4.3. Unión de materiales polímeros por medio de soldadura.**

La soldadura de plásticos y sus compuestos es el proceso de unir piezas a través de un calentamiento para fundir (o eventualmente suavizar) y fusionar el polímero en la interfaz. Incluso esta descripción es bastante simplificada; captura la esencia de los procesos de soldadura de termoplásticos. La soldabilidad de los materiales poliméricos depende de si son termoestables, termoplásticos o elastómeros. En el caso de las resinas termoestables, se produce una reacción química durante el procesamiento y el curado, es decir, como resultado de reacciones irreversibles de reticulación en el molde. Ni los componentes termoestables moldeados ni los elastómeros químicamente reticulados (caucho) se pueden remodelar por

medio de calentamiento, ya que se produce una degradación. De ello se deduce que los componentes de caucho termoestable y vulcanizado solo se pueden unir utilizando adhesivos de unión o métodos de fijación mecánica. Los termoplásticos y los elastómeros entrecruzados físicamente (elastómeros termoplásticos), por otro lado, pueden ablandarse y fundirse como resultado del debilitamiento de las fuerzas secundarias de van der Waals o de las fuerzas de enlace de hidrógeno entre las cadenas poliméricas adyacentes. Por lo tanto, los termoplásticos y los elastómeros termoplásticos se pueden remodelar mediante la aplicación de calor y se pueden soldar por fusión con éxito.

La creación de una unión exitosa depende de cuatro factores: la naturaleza química del polímero, la energía libre de superficie, la topografía de la superficie y la contaminación de la superficie del polímero por polvo, aceite y grasa. Estos factores afectan notablemente la efectividad de los métodos de unión de adhesivo y solvente. Sin embargo, la soldadura por fusión es mucho más tolerante con factores como la contaminación de la superficie y las variaciones de material de una muestra a otra.

Los materiales poliméricos que poseen parámetros de solubilidad similares se pueden unir utilizando soldadura con disolvente o fusión. La interdifusión de cadenas poliméricas juega un papel importante en el logro de la adhesión intrínseca y en la promoción de la difusión de la cadena, ya sea mediante la aplicación de un disolvente adecuado o calentando la muestra de polímero [47, 48]. Como se mencionó anteriormente, solo los termoplásticos y los elastómeros termoplásticos se pueden unir utilizando el proceso de soldadura por fusión. La temperatura de transición vítrea, en polímeros amorfos y la temperatura de fusión, en polímeros cristalinos deben sobrepasarse para que las cadenas de polímero puedan adquirir suficiente movilidad para difuminarse. Existe una variedad de métodos para soldar termoplásticos, compuestos termoplásticos y elastómeros termoplásticos. La energía térmica se puede suministrar externamente mediante métodos de conducción, convección y / o radiación, o internamente a través de la *fricción molecular* causada por el movimiento mecánico en la interfaz de la junta. En el caso del calentamiento externo, la fuente de calor se elimina antes de la aplicación de presión, y los tiempos de soldadura más largos se equilibran por la mayor tolerancia a las variaciones en las características del material. Los

métodos de calentamiento interno dependen marcadamente de las propiedades del material. El calentamiento y la presión se aplican simultáneamente, y los tiempos de soldadura más cortos generalmente están involucrados durante el proceso de unión [49].

Las técnicas de soldadura a menudo se clasifican e identifican por el método de calentamiento que se utiliza. Todos los métodos de soldadura se pueden dividir en dos categorías generales: calentamiento externo e interno. Los métodos de calentamiento externo dependen de la convección y / o conducción para calentar la superficie de la soldadura. Estas técnicas de soldadura incluyen: soldadura con herramienta caliente (hot plate), soldadura con gas caliente, soldadura por extrusión, soldadura por inducción y soldadura por resistencia. Los métodos de calentamiento interno se dividen en dos categorías: calentamiento mecánico interno y calentamiento electromagnético interno. Los métodos de calentamiento mecánico interno se basan en la conversión de energía mecánica en calor a través de la fricción superficial y la fricción intermolecular. Estas técnicas de soldadura incluyen: soldadura ultrasónica, soldadura por vibración, soldadura por rotación y *soldadura por fricción*. Los métodos de calentamiento electromagnético interno se basan en la absorción y conversión de la radiación electromagnética en calor. Estas técnicas de soldadura incluyen: soldadura por infrarrojos / láser, soldadura dieléctrica (radiofrecuencia) y soldadura por microondas, en la Figura 7 se muestra los métodos de unión de materiales poliméricos [45,49].

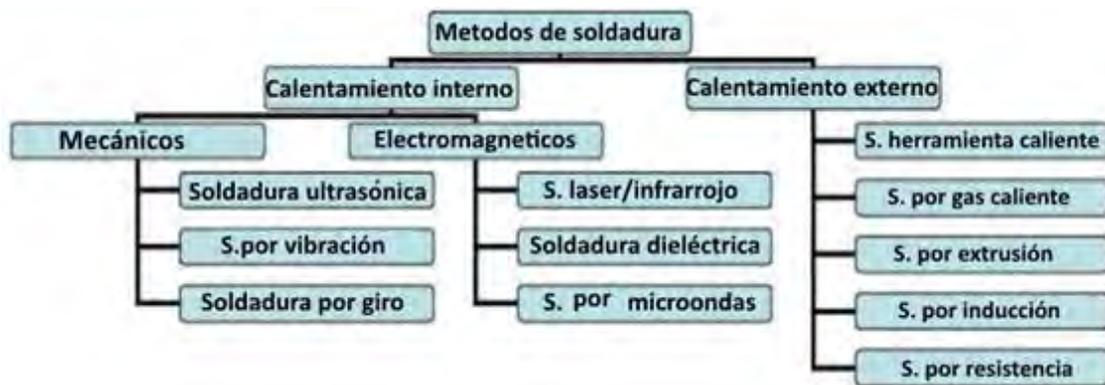


Figura 7. Clasificación de los diferentes métodos de soldadura en polímeros [45]

#### **2.4.4. Soldadura por fricción con agitación aplicada en polímeros.**

La soldadura por fricción con agitación de polímeros, es crítica debido a las diferentes características físicas y reológicas presentes en cada polímero. El logro de los parámetros de proceso óptimos se vuelve más desafiante cuando se trata de soldadura de polímeros que tienen baja viscosidad de fusión, como nylon-6. La velocidad de rotación es el principal parámetro del proceso en la soldadura por fricción con agitación que varía para cada tipo de material en función de sus propiedades físicas [50,51]. Una velocidad de rotación más alta da como resultado la degradación del polímero, mientras que una velocidad de rotación inferior proporciona una mezcla deficiente produciendo así vacíos en la zona de agitación. Por lo tanto, la necesidad de investigar los parámetros óptimos para cada polímero es vital.

Por otro lado, flujo de material plastificado o semifundido también es una consideración importante para lograr la máxima resistencia de la soldadura, ya que puede provocar la formación de un flash y, finalmente, un acabado de superficie deficiente [52,53]. Además de eso, una fluencia excesiva del material puede dar como resultado un defecto en el túnel que finalmente reducirá la calidad de la soldadura. La mezcla uniforme del material durante el proceso de agitación tiene una relación directa con la calidad de la soldadura [54]. Por otro lado, la uniformidad en el flujo de material o la mezcla depende de la geometría del perfil del pin [55].

Por lo tanto, también se debe evaluar el perfil de pin óptimo para una mezcla uniforme para ampliar el alcance de la unión. La soldadura por fricción con agitación aplicada en polímeros a seguido desarrollándose rápidamente en los últimos años con avances en el diseño de herramientas, aporte de calor externo y diferentes condiciones de inmersión. Además, el flujo de material durante la soldadura también se ha estudiado utilizando la técnica de inserción de marcador [54].

## 2.5. Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.

### 2.5.1. Introducción.

**Tratamiento Térmico**, en su sentido más amplio, se refiere a cualquiera de las operaciones de calentamiento y enfriamiento que se realizan con el propósito de cambiar las propiedades mecánicas, la estructura metalúrgica o el estado de tensión residual de un producto de metal. Sin embargo, cuando el término se aplica a aleaciones de aluminio, su uso se restringe con frecuencia a las operaciones específicas empleadas para aumentar la resistencia y la dureza de las aleaciones forjadas y fundidas, endurecibles por precipitación. Por lo general, se las denomina aleaciones "tratables térmicamente" para distinguirlas de aquellas aleaciones en las que no se puede lograr un fortalecimiento significativo calentando y enfriando los materiales. Estas últimas, generalmente denominadas aleaciones "no tratables térmicamente", dependen principalmente del trabajo en frío para aumentar la resistencia. El calentamiento para disminuir la resistencia y aumentar la ductilidad (recocido) se usa con aleaciones de ambos tipos; las reacciones metalúrgicas pueden variar con el tipo de aleación y con el grado de ablandamiento deseado. Excepto por el tratamiento de estabilización a baja temperatura que a veces se da para las aleaciones de la serie 5xxx, los tratamientos completos o parciales de recocido son los únicos que se usan para aleaciones no tratables térmicamente [55].

Las aleaciones de aluminio normalmente se clasifican en alguno de estos tres grupos:

- Aleaciones forjadas no tratadas térmicamente.
- Aleaciones forjadas tratables térmicamente.
- Aleaciones de colada (fundición).

*Las aleaciones forjadas no tratadas térmicamente* no pueden ser reforzadas por el endurecimiento por precipitación; están endurecidos principalmente por el trabajo en frío. Las aleaciones forjadas no tratables térmicamente incluyen la serie de aluminio comercialmente puro (1xxx), la serie de aluminio y manganeso (3xxx), la serie de aluminio

y silicio (4xxx) y la serie de aluminio y magnesio (5xxx). Mientras que algunas de las aleaciones 4xxx pueden endurecerse mediante tratamiento térmico, otras solo se pueden endurecer mediante el trabajo en frío [56].

**Las aleaciones forjadas tratables térmicamente** pueden endurecerse por precipitación para desarrollar niveles de resistencia bastante elevados. Estas aleaciones incluyen las series 2xxx (Al-Cu y Al-Cu-Mg), la serie 6xxx (Al-Mg-Si), la serie 7xxx (Al-Zn-Mg y Al-Zn-Mg-Cu), y la aleaciones de aluminio y litio de la serie de aleaciones 8xxx. Las aleaciones 2xxx y 7xxx, que desarrollan los niveles más altos de resistencia, son las principales aleaciones utilizadas para la estructura de aviones metálicos [56].

**Las aleaciones de fundición** incluyen aleaciones no tratables térmicamente y tratables térmicamente. Las principales categorías incluyen la serie 2xx.x (Al-Cu), la serie 3xx.x (Al-Si + Cu o Mg), la serie 4xx.x (Al-Si), la serie 5xx.x (Al-Mg), la serie 7xx.x (Al-Zn) y la serie 8xx.x (Al-Sn). Las aleaciones 2xx.x, 3xx.x, 7xx.x y 8xx.x se pueden reforzar mediante el endurecimiento por precipitación, pero las propiedades obtenidas no son tan altas como las aleaciones forjadas tratables térmicamente [56].

### **2.5.2. Influencia de los elementos aleantes en las aleaciones de aluminio.**

Las distintas aleaciones de aluminio cuentan con diferentes tipos de elementos aleantes, estos elementos proporcionan características específicas al material, dependiendo de su concentración en el mismo, a continuación se enlistan estos elementos y que características le proporcionan al material [57, 58].

**Cobre:** Aumenta de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, tanto en condiciones de extrusión como tratado térmicamente. Las aleaciones que contienen de 4 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico. Por lo general, al cobre reduce la resistencia a la corrosión.

**Hierro:** Es altamente soluble en estado líquido pero virtualmente insoluble (0,04% Fe) a temperatura ambiente. Por ello aparece como compuestos intermetálicos insolubles, siendo

los más comunes  $Al_3Fe$ ,  $Al_6FeMn$  y  $\alpha AlFeSi$ . Mejora la resistencia al agrietamiento en caliente, la resistencia a la fluencia a altas temperaturas y disminuye la tendencia a la adhesión en fundición a presión. Un incremento en el contenido de hierro aumenta la resistencia mecánica pero disminuye notablemente la ductilidad, por la presencia de las segundas fases

**Magnesio:** Mejora notablemente la resistencia y la dureza en las aleaciones Al-Si tratadas térmicamente normales ó en aquellas más complejas que tienen elementos como el Cu, Ni y otros elementos. La fase endurecible responsable de la mejora de la dureza es el  $Mg_2Si$  y exhibe una alta solubilidad hasta un máximo de 0,7% Mg. Por encima de esta no ocurre endurecimiento posterior, por efecto del ablandamiento de la matriz de aluminio.

**Silicio:** El efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del colado, mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las piezas fundidas. Las adiciones de silicio disminuyen la densidad y el coeficiente de expansión térmica.

**Manganeso:** Incrementa la resistencia mecánica sea por solución sólida o por finos precipitados intermetálicos. En forma de precipitados finos previene el crecimiento del grano en la recristalización. No altera la resistencia a la corrosión. Se usa en la fundición para corregir la forma acicular de los precipitados aciculares ricos en hierro y disminuir su efecto fragilizante, aunque promueve una estructura fibrosa en los lingotes. Se encuentra que el manganeso incrementa la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente.

**Estaño:** Mejora las características antifricción y la maquinabilidad. Debido a esto, se utiliza en aleaciones destinadas a cojinetes. El estaño puede influenciar la respuesta al endurecimiento de ciertas aleaciones de aluminio.

**Níquel:** Se emplea conjuntamente con el cobre para mejorar las propiedades a altas temperaturas. También reduce el coeficiente de expansión térmica.

**Zinc:** No se reportan beneficios por la adición del zinc al aluminio. Sin embargo, en aleaciones que contienen Cu y/o Mg, mejora la respuesta al endurecimiento por tratamiento térmico o natural.

**Titanio:** Refina la estructura del grano del aluminio, usualmente adicionado como boruro de titanio, TiB<sub>2</sub>, preferiblemente en concentraciones mayores que la estequiométrica. Reduce la tendencia al agrietamiento.

### 2.5.3. Clasificación de los tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio tratables térmicamente experimentan actualmente un aumento significativo en la demanda debido a la creciente aplicación en la industria aeroespacial y automotriz. Las consideraciones de rendimiento combinadas con la necesidad de calidad requieren que el tratamiento térmico sea muy preciso térmicamente con la velocidad de calentamiento más efectiva posible. Entre los tratamientos térmicos aplicados a las aleaciones de aluminio encontramos los siguientes:

- Homogeneización.
- Recocido.
- Tratamiento térmico de solución.
- Temple.
- Envejecimiento natural.
- Endurecimiento por precipitación (envejecimiento artificial).

### 2.5.4. Tratamiento térmico de homogenización.

La homogeneización implica el calentamiento de placas o barras de aluminio, después de la colada a una temperatura elevada en la que las aleaciones forman una solución homogénea dentro del aluminio. La homogeneización requiere un período muy largo de calentamiento, generalmente en el rango de 15-20 horas, para permitir que las aleaciones se homogenicen

de manera efectiva. Después de la homogeneización, las placas o barras se enfrían y se forman por laminación o extrusión [56].

### **2.5.5. Tratamiento térmico de recocido.**

El recocido, un proceso que reduce la resistencia y la dureza a la vez que aumenta la ductilidad, también se puede usar para las aleaciones, coladas y no tratadas térmicamente y tratables térmicamente. Los tratamientos de recocido se utilizan durante las operaciones complejas de conformado en frío para permitir una mayor formación sin el peligro de agrietamiento del material. La condición más suave, más dúctil y más formable para las aleaciones de aluminio se produce mediante el recocido completo a la condición O. Si las aleaciones de aluminio trabajadas en frío se calientan a una temperatura suficientemente alta durante un tiempo suficientemente largo, el recocido producirá tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento del grano. Durante la recuperación, las tensiones internas debidas al trabajo en frío se reducen, con cierta pérdida de resistencia y una recuperación de cierta ductilidad. Durante la recristalización, nuevos núcleos no acomodados se forman y crecen hasta que chocan entre sí para formar una nueva estructura de grano recristalizada. Calentar durante períodos más largos o a temperaturas más altas generalmente dará como resultado un crecimiento de grano, que normalmente no es deseable. La velocidad de enfriamiento en este tratamiento no es tan importante [55, 56].

### **2.5.6. Tratamiento térmico de solución.**

El tratamiento térmico de solución implica calentar el aluminio y sus aleaciones a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de fusión del material (eutéctica). El tratamiento térmico de solución, desarrolla la cantidad máxima de solutos en solución sólida. Esto requiere calentar el material cerca de la temperatura eutéctica y mantener el material a esta temperatura el tiempo suficiente para permitir que se complete la solución sólida. Después del tratamiento térmico de la solución, el material se enfría para mantener el soluto en una solución sólida sobresaturada. Debido a que la temperatura del tratamiento térmico

de la solución es tan cercana a la temperatura de fusión eutéctica, el control de la temperatura es crítico. Esto es especialmente para las aleaciones de la serie 2XXX. En este grupo de aleación, la temperatura inicial de fusión eutéctica esta solo unos pocos grados por encima de la temperatura máxima recomendada para el tratamiento térmico de la solución. Las condiciones de no equilibrio pueden ocurrir debido a las concentraciones de solutos localizados. Debido a la mayor concentración de soluto, la temperatura eutéctica podría reducirse, causando una fusión localizada. Esto a menudo se llama fusión incipiente. Cuando esto ocurre, hay disminuciones significativas en las propiedades mecánicas del material. Las propiedades más afectadas incluyen tenacidad, ductilidad y tensión. Desafortunadamente, este defecto no se puede detectar visualmente o mediante técnicas no destructivas [56, 57, 58].

La fusión local también puede ocurrir si el material tratado térmicamente se calienta demasiado rápido. Esto es particularmente cierto en las aleaciones 2XXX. En este sistema de aleación, hay concentraciones locales de  $Al_2Cu$ . A velocidades de calentamiento lento, el  $Al_2Cu$  se disuelve lentamente en la matriz del material. A altas velocidades de calentamiento, no hay tiempo suficiente para que el  $Al_2Cu$  se disuelva. Las concentraciones locales provocan la caída de la temperatura eutéctica local, lo que provoca una fusión localizada. Si se permite un tiempo adecuado para que este líquido metaestable se disuelva en la matriz, entonces, en general, no hay decremento en las propiedades. Sin embargo, esto requiere largos tiempos de tratamiento térmico de la solución. Por lo tanto, es más probable que exista un componente del líquido presente al enfriar el material. Debido a la tensión superficial durante la solidificación, se forman esferas pequeñas y sólidas. Esto se llama rosetas. El recalentamiento durante el tratamiento térmico de solución también puede causar problemas al no permitir que el soluto ingrese en la solución sólida. Esto significa que hay menos soluto disponible durante las siguientes reacciones de endurecimiento por precipitación [59].

El tiempo durante el tratamiento térmico solución es tan importante como la temperatura. Si no hay un tiempo adecuado, no todo el soluto estará en solución en el momento del

enfriamiento. El tiempo necesario para el tratamiento térmico solución es una función de la microestructura previa. Cuanto más homogénea es la microestructura, más corto es el tiempo de solución necesario. Por ejemplo, las láminas delgadas requieren solo unos minutos para la temperatura de tratamiento térmico de solución, mientras que los materiales de colada de mayor espesor requieren más de 20 horas de tratamiento [55, 56].

### **2.5.7. Tratamiento térmico de temple.**

El tratamiento térmico de temple, es un enfriamiento muy rápido del metal que se hace normalmente por inmersión en agua fría a la salida del horno. El enfriamiento rápido del material tiene por efecto impedir la precipitación de los compuestos intermetálicos. Es después del temple cuando las aleaciones de endurecimiento estructural (AlCu-AlMgSi-AlZn) son fácilmente deformables. La velocidad de temple es un parámetro muy importante del que dependen ciertas propiedades mecánicas, como la tensión, la tenacidad, la corrosión.

Existe para cada aleación una velocidad crítica de templado, bajo cuyo umbral no se debe bajar. Para obtener la tenacidad máxima la velocidad de temple debe ser tres veces más rápida que la velocidad crítica de temple. El temple es susceptible de producir tensiones internas sobre todo en las piezas de formas complejas o de grandes secciones. Se puede disminuir las tensiones con una deformación plástica controlada [55]

Son varios los factores a considerar para obtener la velocidad de enfriamiento adecuada durante el temple, entre estos factores tenemos; calor específico y temperatura del fluido utilizado, la cantidad de masas en el material a enfriar y finalmente el tiempo transcurrido desde que el material pasa de la temperatura inicial a la final. La velocidad crítica de temple puede definirse como la mínima velocidad de enfriamiento que es capaz de retener los átomos de soluto en solución, es decir, que evita la descomposición de la solución sólida y depende principalmente de la composición de la aleación.

### 2.5.8. Tratamiento térmico de envejecimiento natural.

Durante el envejecimiento, los elementos de aleación atrapados en solución se precipitan para formar una distribución uniforme de partículas muy finas. Algunas aleaciones de aluminio se endurecerán después de algunos días a temperatura ambiente, un proceso llamado envejecimiento natural.

Algunas aleaciones tratables térmicamente, especialmente aleaciones 2XXX, se endurecen significativamente a temperatura ambiente para producir los temple T3 y T4. Estas aleaciones que han envejecido naturalmente, exhiben altas proporciones de resistencia a la tensión final y resistencia a la fluencia. Estas aleaciones también tienen excelentes propiedades de fatiga y tenacidad a la fractura. El envejecimiento natural y el aumento de las propiedades mecánicas, se producen por la rápida formación de las zonas GP (Guinier-Preston, el cual es un fenómeno metalúrgico, en el cual se da un endurecimiento del material por precipitación de elementos aleantes) de solución sólida sobresaturada y por el enfriamiento del templado. La fuerza aumenta rápidamente, y las propiedades se vuelven estables después de aproximadamente 4 a 5 días. Los temple T3 y T4 se basan en el envejecimiento natural durante 4 días. Para las aleaciones 2XXX, las mejoras en las propiedades después de 4 a 5 días son relativamente menores y se estabilizan después de una semana [58, 59].

Las aleaciones de Al-Zn-Mg-Cu y Al-Mg-Si (7XXX y 6XXX) se endurecen por el mismo mecanismo de formación de la Zona GP. Sin embargo, las propiedades del envejecimiento natural son menos estables. Estas aleaciones todavía exhiben cambios significativos en las propiedades incluso después de muchos años.

Las características de envejecimiento natural cambian de aleación a aleación. Las diferencias más notables son el tiempo de incubación inicial para los cambios en las propiedades que se observarán, y la tasa de cambio en las propiedades. Los efectos de envejecimiento se suprimen con temperaturas inferiores a la ambiente. En muchas aleaciones, como las

aleaciones 7XXX, el envejecimiento natural puede suprimirse casi por completo manteniéndolo a -40 °C. Esto se ilustra en la Figura 8 [56, 60].

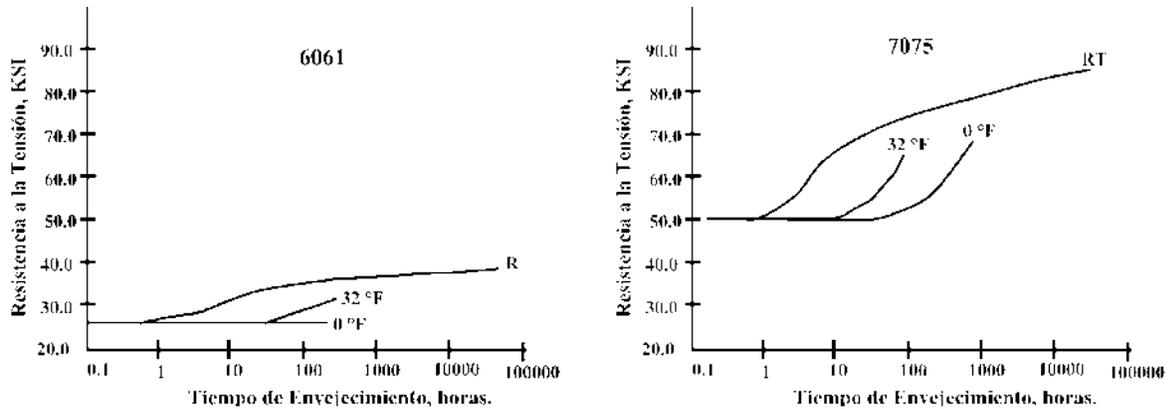


Figura 8. Efectos de la temperatura sobre el envejecimiento natural respecto a la resistencia a la tensión [56].

Debido a la naturaleza muy dúctil y formable de las aleaciones templadas, el retraso del envejecimiento natural aumenta la flexibilidad de programación para las operaciones de formado y enderezado. También permite la uniformidad de las propiedades durante el proceso de formado. Sin embargo, la refrigeración a temperaturas normales no suprime por completo el envejecimiento natural. Algunas precipitaciones ocurren todavía. La Tabla 3 muestra los límites de temperatura y tiempo típicos para la refrigeración.

| Tabla 3. Límites de tiempo y temperatura para materiales templados y almacenados con refrigeración [56]. |   |                                 |                       |                         |
|--|---|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Aleación   | Tiempo máximo de retardo después del enfriamiento | Máximo tiempo de almacenamiento |                       |                         |
|  |   | -12 °C (10 °F)<br>Max.          | -18 °C (0 °F)<br>Max. | -23 °C (-10 °F)<br>Max. |
| 2014   | 15 minutos  | 1 Día                           | 30 Días               | 90 Días                 |
| 2024   |   |                                 |                       |                         |
| 2219   |   |                                 |                       |                         |
| 6061   | 30 minutos  | 7 Días                          | 30 Días               | 90 Días                 |
| 7075   |   |                                 |                       |                         |

A menudo, los sistemas de refrigeración son inadecuados para enfriar piezas de espesor grueso, esto porque no son lo suficientemente rápidos para enfriar las piezas. En este caso, varios termotratadores sumergen las piezas en un Solvente Stoddard's en  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  inmediatamente después de enfriar el material. Alternativamente, también se ha usado hielo seco y metanol. Sin embargo, cualquier solución es muy inflamable y requiere precauciones especiales para el funcionamiento y la eliminación de desechos orgánicos. La inmersión de las piezas en líquido muy frío asegura que las piezas se enfríen rápidamente a la temperatura deseada. Las partes se transfieren luego al sistema de refrigeración normal, la conductividad eléctrica disminuye con la progresión del envejecimiento natural. En general, la reducción del contenido de solución sólida indicaría un aumento en la conductividad. Esta disminución en la conductividad indica que se están formando Zonas GP, en lugar de precipitados "verdaderos". Esta disminución en la conductividad está relacionada con el consumo de vacantes por parte de las Zonas de GP. Esta disminución en la conductividad se ilustra en la Figura 9 [55, 56, 61].

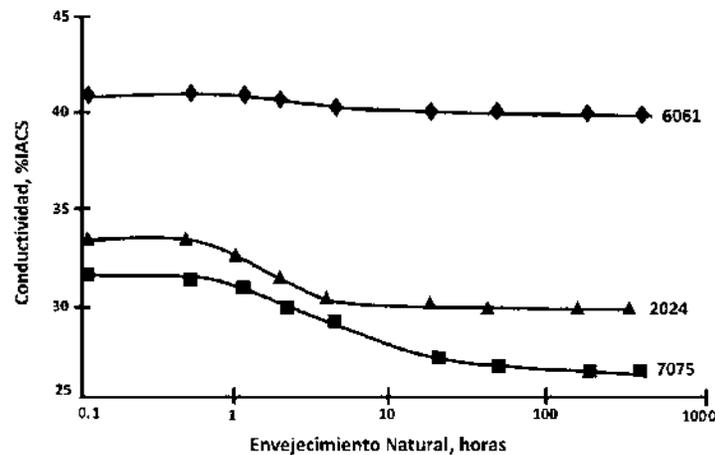


Figura 9. Conductividad térmica en función del envejecimiento natural [56].

Además de los cambios de conductividad, también ocurren cambios dimensionales durante el envejecimiento natural. El cambio dimensional observado no es consistente con una reducción en la cantidad de soluto en solución sólida. Sin embargo, también sugiere la formación de zonas GP o la formación de un precipitado durante el envejecimiento natural. Estos cambios dimensionales que ocurren con el envejecimiento natural de varias aleaciones se muestran en la Figura 9 [56].

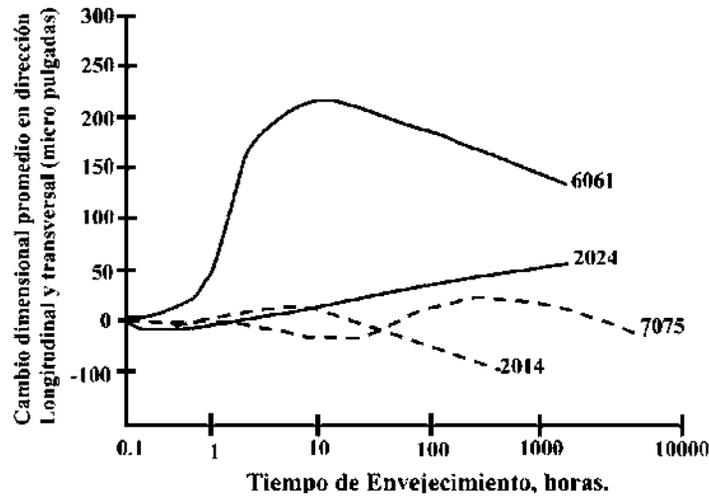


Figura 10. Cambios dimensionales que ocurren durante el envejecimiento natural de varias aleaciones [56].

### 2.5.9. Tratamiento térmico por envejecimiento artificial.

El endurecimiento por precipitación es el mecanismo donde la dureza, el límite elástico y la resistencia máxima de la aleación de aluminio, *aumentan dramáticamente* con el tiempo-temperatura, esta temperatura se encuentra en el rango de 93 °C-232 °C, la cual se mantiene constante (temperatura de envejecimiento) después de ser enfriada rápidamente a temperatura ambiente. Este enfriamiento rápido da como resultado una solución sólida sobresaturada, que proporciona la fuerza motriz para la precipitación, Figura 11 [56,58]. Inicialmente hay una agrupación de átomos de soluto cerca de las vacantes del material. Una vez que los átomos se han difundido a estos grupos de vacantes iniciales, se forman precipitados. Debido a que los cúmulos de átomos de soluto tienen un desajuste con la matriz de aluminio, un campo de tensión rodea los cúmulos de soluto. A medida que más solutos se difunden a los cúmulos, eventualmente la matriz ya no puede acomodar el desajuste. Esto genera un semi-precipitado. Finalmente, después de que el semi-precipitado crece hasta un tamaño lo suficientemente grande, la matriz ya no puede soportar el desajuste cristalográfico, y se forma el precipitado de equilibrio [55].

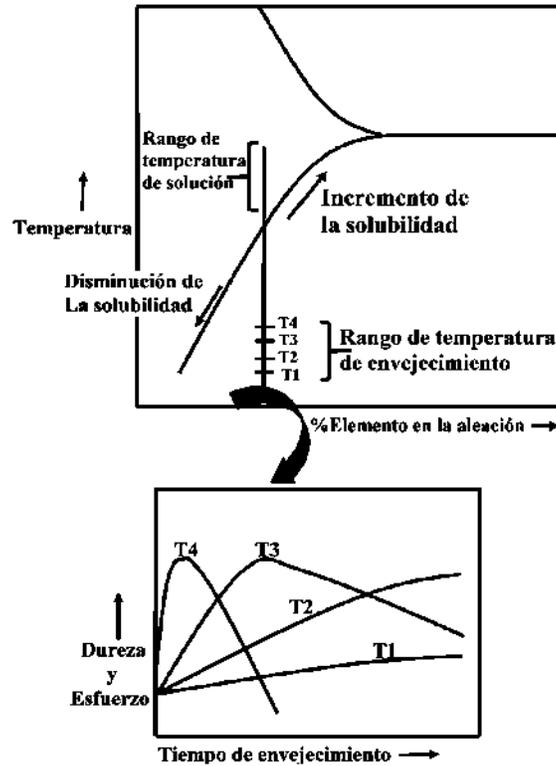


Figura 11. Tratamiento térmico típico de endurecimiento por precipitación [55].

Si una aleación envejece a temperatura ambiente, se designa como T4 (solución tratada térmicamente y envejecida de forma natural), si la aleación se envejece mediante calentamiento a temperatura intermedia, se designa como T6 (tratada térmicamente por solución y Envejecida artificialmente). El trabajo en frío durante el tratamiento térmico mejorará las propiedades de ciertas aleaciones que incluye la condición T3 (tratada térmicamente por solución, trabajada en frío y luego envejecida naturalmente), la condición T8( tratada térmicamente por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente), y la Condición T9 (tratada térmicamente por solución, envejecida artificialmente y luego trabajada en frío). La condición T7 (tratada térmicamente por solución), en la cual la aleación envejece intencionalmente más allá de su resistencia máxima, al envejecer a una temperatura más alta, se usa con algunas aleaciones de alta resistencia para mejorar la tenacidad a la fractura y la resistencia a la corrosión [55, 56, 559].

## CAPITULO 3. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN CON AGITACIÓN.

### 3.1. Descripción del proceso de soldadura por fricción con agitación.

La soldadura por fricción con agitación (**Friction Stir Welding - FSW**) es única entre los procesos de soldadura en estado sólido, basados en la deformación, debido a la forma en que el material fluye y se junta para producir la unión. Si se realiza correctamente, conduce a propiedades excepcionales y esa ha sido la razón principal de su implementación exitosa en numerosas aplicaciones aeroespaciales, automotrices y de construcción naval.

La técnica FSW fue adoptada fácilmente por estas industrias, las cuales involucran en sus procesos la fabricación de componentes en aleaciones de aluminio, y también debido a la repetitividad de las soldaduras, su alta calidad, en contraste con algunos métodos de soldadura convencionales. La zona de soldadura consiste en material forjado en caliente, usualmente con un tamaño de grano menor que el del material original.

La soldadura por fricción con agitación (FSW) se inventó en The Welding Institute (TWI) del Reino Unido en 1991 como una técnica de unión de estado sólido, y se aplicó inicialmente a aleaciones de aluminio (Thomas et al., 1991; Dawes y Thomas 1995). El concepto básico de FSW es notablemente simple. La Figura 12, ilustra las partes del proceso para la herramienta empleada y la pieza de trabajo, en una configuración de junta a tope.

Una herramienta giratoria no consumible con un **pin** y un **hombro** especialmente diseñados se inserta en los bordes contiguos de las hojas o placas para unirlos y posteriormente se hace avanzar a lo largo de la línea de unión [62]

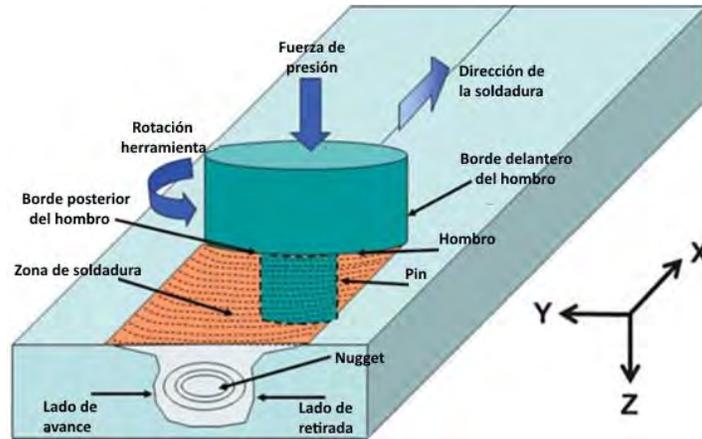


Figura 12. Proceso de Soldadura por Fricción con Agitación [62].

El lado de avance siempre se encuentra del lado de rotación de la herramienta, si esta gira a favor de las manecillas del reloj el avance se encuentra del lado izquierdo de los materiales a unir y la retirada al lado derecho, pero si el giro de la herramienta es en contra de las manecillas del reloj, el avance estará del lado derecho y la retirada al lado izquierdo. La soldadura por fricción con agitación implica un calentamiento por fricción producidos en los materiales y una intensa deformación plástica, el ciclo de soldadura suele ser bastante corto, en la Figura 13 se muestra una gráfica simple de la aplicación de presión y tiempo, durante la soldadura por fricción con agitación [62].



Figura 13. Gráfica de presión y tiempo involucrados en los procesos de deformación y unión por difusión [62].

Durante el proceso FSW la dependencia del calor por fricción y el trabajo plástico generado en los materiales, impide una fusión significativa en la pieza de trabajo, evitando muchas de las dificultades derivadas de un cambio de estado, como cambios en la solubilidad del gas y cambios volumétricos, que a menudo plagan los procesos de soldadura por fusión. Además, la baja temperatura de soldadura hace posible una distorsión y tensiones residuales considerablemente menores, lo que permite un rendimiento a la fatiga mejorada, nuevas técnicas de construcción y la posibilidad de soldar materiales muy finos y muy gruesos. Debido a las *fuerzas típicamente altas* en el proceso, el FSW generalmente se practica como un proceso completamente mecanizado, lo que aumenta el costo del equipo en comparación con las técnicas de soldadura por arco, al tiempo que reduce el grado de habilidad del operador requerido. También se ha demostrado que FSW elimina o reduce drásticamente la formación de humos peligrosos y reduce el consumo de energía durante la soldadura, reduciendo el impacto ambiental del proceso de unión. Además el proceso FSW se puede utilizar en cualquier orientación sin tener en cuenta la influencia de los efectos gravitacionales en el proceso. Estas distinciones en comparación de los procesos de soldadura por arco eléctrico convencionales hacen que FSW sea un nuevo y valioso proceso de fabricación con innegables beneficios técnicos, económicos y medioambientales [63, 64].

### **3.2. Equipos utilizados en el proceso de soldadura FSW.**

La física detrás del proceso FSW se traduce en ciertas demandas que debe cumplir el equipo utilizado para realizar las soldaduras. Para comenzar una soldadura, la herramienta FSW gira a una velocidad predefinida y luego se introduce en la pieza que se va a soldar. Se genera calor por fricción y el material de la pieza plastifica y alcanza una temperatura relativa de estado estacionario. Una vez que se alcanza este estado plastificado, la herramienta se mueve a lo largo de una trayectoria de soldadura predefinida. El material que se desplaza del pasador que ingresa y viaja a través de la pieza intenta salir del orificio del pin, pero se mantiene en su lugar por el hombro de la herramienta [63].

Para determinar los requisitos del equipo FSW, es necesario comprender el rango de rendimiento que se requiere del proceso para las piezas que se van a soldar. Los cuatro

parámetros críticos del proceso controlados por la máquina FSW son la posición, la orientación, las cargas, la rotación y las velocidades de desplazamiento de la herramienta. Los elementos de sujeción de la pieza a soldar deben diseñarse de manera tal que se asegure un ajuste apropiado, sujeción firme y rigidez para garantizar que la pieza se mantenga en su lugar, así como para disipar el calor que se genera durante el proceso. Además, es importante tener en cuenta el uso final del equipo, ¿Es una aplicación de producción o investigación? ¿Cuál es el nivel de experiencia y conocimiento requerido para un operador? ¿Cuál es el rendimiento previsto para el sistema? ¿Cuánta automatización se desea? ¿Hay algún proceso posterior y posterior a la integración en la máquina? Las respuestas a estas preguntas tendrán ramificaciones en los requisitos de equipos de FSW [63,64,65].

Hay muchos tipos diferentes de máquinas utilizadas para FSW, Figura 14. Algunos están configurados para aplicaciones específicas y otros tienen una configuración más general que les permite soldar una mayor gama de materiales y piezas. Los detalles de cómo se diseñó la máquina determinan el rango de aplicaciones que es capaz de soldar. Por ejemplo, las aplicaciones de producción generalmente usan máquinas FSW que están diseñadas específicamente para el trabajo de producción, la funcionalidad y los parámetros de soldadura asociados (tipo de soldadura, torque, RPM, cargas, velocidades de desplazamiento). Se puede enfatizar la racionalización del diseño de manera que solo los atributos requeridos absolutos estén integrados en el equipo. Para institutos de investigación y grupos de investigación y desarrollo, las máquinas de FSW generalmente tendrán diversas funcionalidades incorporadas en el diseño, de modo que se pueda soldar una gama más amplia de aplicaciones. En el nivel más básico, los requisitos para una máquina FSW deben incluir la funcionalidad y el rendimiento, para generar las soldaduras deseadas. Un buen punto de partida para especificar los requisitos del equipo, es decidir sobre el tipo de soldadura que se va a realizar; pin fijo, pin ajustable o de retracción. Sin embargo también es posible adaptar equipos de control numérico de arranque de viruta para realizar el proceso FSW, el requerimiento mínimo que se exige a estos equipos es una potencia mínima de 3 HP, para aleaciones de aluminio, si se intentara soldar otro tipo de material más duro que el aluminio, se requerirá una mayor potencia del equipo [63, 66, 67].



Figura 14. Equipos empleados para el proceso FSW, a) Equipo diseñado para FSW, b) Fresadora de control numérico [68].

### 3.3. Elementos de sujeción empleados en el proceso FSW.

Los requisitos para las herramientas son relativamente sencillos; las herramientas deben ser capaces de mantener la pieza en una ubicación fija y reaccionar a las fuerzas generadas por el proceso de soldadura, es decir, debe hacerse lo suficientemente rígida para no desviarse por las fuerzas axiales y radiales que se generan. Dentro de la soldadura FSW, se requieren dos elementos adicionales a la herramienta, estos son; 1) elementos de sujeción y 2) placa de respaldo, Figura 15. Los mecanismos de sujeción deben permitir que la herramienta del proceso FSW acceda de manera fácil al material a soldar, por otro lado también deben de ser lo suficientemente rígidos para evitar que durante la unión los materiales se deslicen longitudinalmente, se doble o se separe debido a las fuerzas de torsión generadas por la herramienta. Además, la conductividad térmica entre la superficie de soldadura y el sistema de sujeción pueden afectar la calidad de la soldadura y los parámetros de soldadura.



Figura 15. Elementos de Sujeción Empleados en el Proceso FSW [69].

Por otro lado la placa de respaldo debe proporcionar una superficie lo suficientemente rígida que soporte directamente y presione contra el lado posterior del material a soldar. Si no hay un ajuste adecuado, la herramienta tenderá a sumergirse en el material, ya que habrá una disminución en la carga durante la soldadura, y el material se moverá como reacción al cambio de fuerza. Otro punto a considerar en las placas de respaldo es el impacto que esta pueda tener en el flujo térmico del material soldado, dependiendo del material empleado en la placa de respaldo y el material a soldar, este flujo térmico que se genera por los distintos materiales afecta directamente en los parámetros del proceso, en la Tabla 4 se enumera la conductividad térmica de distintos materiales empleados en la fabricación de los elementos de sujeción y las placas de respaldo. [63-65].

| Tabla 4. Conductividad térmica en materiales empleados en elementos de sujeción/respaldo [63] |                              |
|---|------------------------------|
| Material  | Conductividad térmica (W/mK) |
| Acero Dulce   | 40-60                        |
| Acero Inoxidable  | 15-25                        |
| X33CrS16 (1.2085)   | 17                           |
| RAMAX   | 24                           |
| Latón   | 110-150                      |
| Cobre   | 380-400                      |
| Aleaciones de Aluminio  | 110-235                      |

La calidad de la soldadura también depende de la presión que soporta la placa de respaldo durante el proceso de soldadura y del sistema de sujeción. La placa de respaldo y el material a soldar deben estar al mismo nivel que la mesa de trabajo del equipo para que no haya desajustes entre las piezas que se están soldando. El sistema de sujeción debe garantizar la sujeción de las piezas de trabajo de forma fiable para que no se produzca ningún espacio durante la operación de soldadura. Además, el proceso de soldadura es más fácil de manejar

si la placa de soporte o el material a soldar están en un plano absoluto (es decir, sin distorsiones o variaciones no mayores a 0.1 mm) [62, 63].

### 3.4. Herramientas empleadas en el proceso FSW.

El diseño de la herramienta de soldadura es fundamental para el proceso FSW, la herramienta empleada desde el nacimiento de este proceso constaba originalmente de dos partes principales, la primera consiste en un **hombro** que se desplaza sobre la superficie de la pieza de trabajo, y un **pin** de menor diámetro que el del hombro [70,71]. El pin penetra el material generando con esto un calentamiento por fricción y una deformación plástica severa en los materiales a unir. El hombro desempeña esencialmente el papel de "barrera", lo que evita el escape del material plastificado a medida que la herramienta gira y se presiona a lo largo de la unión, este giro-presión que el hombro aplica al material origina un calentamiento adicional por fricción, las geometrías que puede presentar el hombro son variadas, pueden ir desde las planas hasta las formadas por espirales. El pin comúnmente emplea distintas geometrías en su cuerpo, que van desde geometrías totalmente lisas, geometrías roscadas y geometrías más compleja, en la Figura 16 Se muestran las partes principales de la herramienta [63, 72].

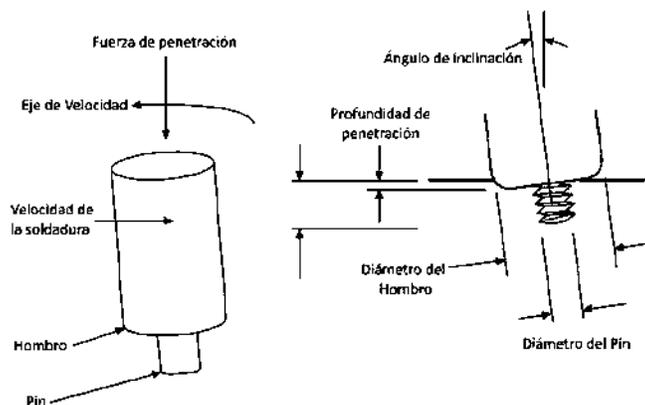


Figura 16. Partes principales de la herramienta empleada en FSW [63].

Desde su desarrollo original, los avances en la soldadura por fricción con agitación han sido impulsados a menudo por el desarrollo de nuevas herramientas de soldadura y nuevos

equipos de soldadura. El desarrollo de las herramientas de soldadura, tiene dos aspectos; en primer lugar el diseños de las herramientas de soldadura y el desarrollo de nuevos materiales para la manufactura de las mismas. Los diseños de las herramientas se pueden dividir en dos clases principales: convencionales y de tipo bobina. Las herramientas convencionales, son aquellas en las cuales se acercan está a la pieza de trabajo desde un lado del material, generalmente mientras la pieza de trabajo está sujeta a la placa de respaldo. Este tipo de herramienta solo penetra parcialmente el material a soldar, dejando un espacio muy delgado entre este y el extremo del pin [73].

A diferencia de la herramienta convencional, las herramientas de tipo bobina constan de dos hombros que están conectados por el pin, y los tres elementos giran a las mismas revoluciones. Los dos hombros actúan como una barrera para contener el material ablandado (plastificado) desde cualquier lado, Figura 17, mientras generan calor por fricción y deformación plástica. La función que desempeña el pin es principalmente distorsionar las superficies de contacto y generar calor adicional para mantener el proceso, al tiempo que proporciona la conexión mecánica entre los hombros. Las herramientas de bobina pueden permitir soldaduras sin distribuir una fuerza normal al plano de la pieza de trabajo, y eliminan la posibilidad de una penetración incompleta en el material a unir [74, 75].



Figura 17. Herramientas empleadas en el proceso FSW [76].

### 3.5. Influencia de los parámetros empleados en el proceso FSW.

Las variables del proceso de soldadura por fricción con agitación tienen mucho en común con otros procesos de soldadura, las condiciones son completamente diferentes, como habría de esperarse. Las principales variables del proceso en la soldadura por fricción y agitación se enumeran en la Tabla 5. Todas estas variables actúan para determinar el resultado de la soldadura. El interés principal en estudiar el efecto de los parámetros durante el proceso FSW, radica en comprender el efecto que aportan estos en las propiedades mecánicas estáticas de la unión, resistencia a la fatiga, propiedades de corrosión, resistencia a la corrosión en tensión y tenacidad, con el objetivo de maximizar la productividad y el rendimiento y reproducibilidad [63].

Tabla 5. Principales variables del proceso de soldadura FSW [63].

| <b>VARIABLES DE DISEÑO DE HERRAMIENTAS</b>   | <b>VARIABLES DE LA MAQUINA</b>   | <b>OTRAS VARIABLES</b>  |
|--|--|---|
| Materiales para hombro/pin<br>Diámetro Pin<br>Diámetro Hombro<br>Largo del Pin<br>Paso de Rosca<br>Características de la geometría | Velocidad de la Soldadura<br>Velocidad de Rotación<br>Fuerza de Penetración o profundidad<br>Ángulo de inclinación | Material de la placa de refuerzo<br>Tamaño de la placa de refuerzo<br>Tamaño de la pieza de trabajo<br>Propiedades de la pieza de trabajo |

El proceso de soldadura afecta estas propiedades conjuntas principalmente a través de la generación y disipación de calor, por lo que se debe prestar atención al efecto de los parámetros del proceso en la generación de calor y los resultados relacionados. Otras áreas de estudio relacionadas con los parámetros involucrados en este proceso, incluyen el efecto en el flujo de material, formación de defectos, fuerzas generadas durante el proceso, tamaño de grano, entre muchas otras. Numerosos estudios en modelo experimentales y

computacionales se han desarrollado sobre el efecto de los parámetros en la generación de calor se han publicado desde que este proceso surgió [77, 78]. Estos trabajos han demostrado que, aunque al principio fundamental del proceso FSW puede parecer simple, el hecho de que sea un proceso termomecánico totalmente soldado puede conducir a relaciones contraintuitivas entre los parámetros y el resultado de las propiedades mecánicas y flujo de material resultantes. En la soldadura por arco, la entrada de calor está determinada enteramente por los parámetros controlables en la máquina (voltaje y corriente), mientras que en el proceso FSW la entrada de calor al material dependen de la relación existente entre todos los parámetros, como resultado de esto, parámetros aparentemente no relacionadas pueden participar en la generación de calor. Por ejemplo, el tamaño y el tipo de material pueden tener un efecto en las fuerzas generadas y la generación de calor durante la soldadura. Esta relación autorreferencial contribuye a la estabilidad del proceso de soldadura, pero al mismo tiempo complica la determinación del efecto de las variables del proceso en la generación de calor [79, 80].

### 3.6. Zonas características en la soldadura por FSW.

Al igual que los procesos tradicionales de soldadura por fusión, en la soldadura por fricción con agitación, se encuentran zonas características en la zona de unión de los materiales, en la Figura 18, se muestra una sección transversal de las zonas principales en la unión de una aleación de aluminio 6061-T6 [81].

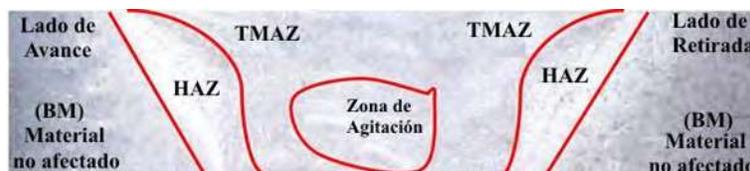


Figura 18. Zonas Características de la Soldadura por FSW.

La soldadura está limitada en ambos lados por material base no afectado (BM). Aunque el material base cerca de la zona de soldadura experimenta una temperatura elevada durante la soldadura, este material exhibe esencialmente las mismas propiedades originales del material. Más cerca de la soldadura se encuentra la zona afectada por el calor (HAZ), que se

calienta lo suficiente durante la soldadura para alterar sus propiedades mecánicas sin que la deformación plástica afecte la estructura del grano original [82]. La alteración de las propiedades en HAZ puede incluir cambios en la resistencia, ductilidad, susceptibilidad a la corrosión y dureza del material soldado, pero por lo general no incluirán cambios en el tamaño del grano o la composición química. El calentamiento en la HAZ es generalmente lo suficientemente alto en aleaciones de aluminio para dar como resultado la recuperación por trabajo en frío y el engrosamiento de los precipitados, que es la causa de los cambios en las propiedades en esta región [83]. La zona afectada termomecánicamente (TMAZ) abarca todo el material deformado plásticamente dentro de la región de agitación. En esta región, la pieza de trabajo se calienta y ablanda suficientemente y las fuerzas del proceso son suficientemente altas para dar como resultado la deformación plástica de la estructura del grano original. La zona TMAZ se puede dividir en; zona TMAZ no recristalizada y zona TMAZ recristalizada (Pepita - nugget). En las aleaciones de aluminio, la TMAZ no recristalizada puede ser una característica importante en la soldadura, ya que puede tener un tamaño significativo y puede representar una región de baja microdureza y susceptibilidad a la corrosión [84]. Además, en las aleaciones de aluminio, el material en la pepita generalmente está compuesto por material de grano fino y se considera que ha sufrido una deformación plástica severa debido a la interacción con el pin de la herramienta de soldadura y en algunos casos puede imitar la forma del perfil del pin. Sin embargo, en materiales que experimenten una transformación de fase inducida térmicamente, la TMAZ puede consistir completamente de material recristalizado, mientras que en otros materiales la TMAZ puede no estar completamente recristalizada, independientemente del tamaño o la forma del pin [63, 85].

## **CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

### **4.1. Introducción.**

El desarrollo experimental se dividió en cuatro partes: 1) Selección de los materiales a soldar y para la fabricación de las herramientas, 2) Adaptación de un centro de maquinado para realizar la soldadura, 3) Fabricación de la sujeción y las herramientas empleadas en el proceso, 4) Soldadura, tratamientos térmicos y pruebas mecánicas en los materiales.

### **4.2. Definición de los materiales para soldar.**

Los materiales que se seleccionaron para realizar la presente investigación, se basa en su amplia aplicación industrial y porque los datos que se tienen hasta el momento de los mismos bajo la condición de soldadura por fricción agitación no son concluyentes y en otros casos aún no se realiza suficiente investigación experimental, los materiales seleccionados son:

- Aleaciones metálicas: Aluminio 6061-T6.
- Plásticos de alta resistencia: Polipropileno, ABS.

La selección de la aleación de aluminio 6061-T6 es establecida por el gran uso que tiene en múltiples industrias como la aeroespacial, automotriz, alimentos, empaques, aplicaciones estructurales, entre muchas otras [86]. El principal interés que se tiene es analizar esta aleación de aluminio bajo condiciones de soldadura por fricción con agitación, esto porque los datos que se han obtenido hasta el momento no son suficientes y mucho menos normalizados, dejando un amplio abanico de posibilidades por abordar en cuanto a la aplicación de este tipo de soldadura en este tipo de aleación de aluminio, cabe destacar que los datos obtenidos hasta este momento son aportes que se han realizado en distintos centros de investigación e industrias, es verdad que este proceso de soldadura ya está siendo empleado cada vez más y está desplazando a los métodos convencionales de soldadura por fusión, de ahí el beneficio que se tiene de seleccionar y estudiar esta aleación de aluminio

tan ampliamente utilizada en la vida moderna, en las Tablas 6 y 7 se enlistan las propiedades químicas y mecánicas respectivamente de esta aleación de aluminio, dadas por el fabricante.

| Tabla 6. Composición Química en Peso de la AA 6061-T6. |       |
|--|-------|
| Cr   | 0.375 |
| Cu   | 0.275 |
| Fe   | 0.6   |
| Mg   | 1.0   |
| Mn   | 0.15  |
| Si   | 0.7   |
| Ti   | 0.14  |
| Zn   | 0.24  |
| Otro   | 0.15  |

| Tabla 7. Propiedades Mecánicas AA 6061-T6. |                        |
|--|------------------------|
| Densidad                                   | 2700 Kg/m <sup>3</sup> |
| Resistencia Última de Tensión              | 310 MPa                |
| Límite Elástico                            | 275 MPa                |
| Módulo Elástico                            | 69 GPa                 |
| Límite de Resistencia a la Fatiga          | 95 MPa                 |
| Módulo Poisson                             | 0.33                   |
| Dureza Brinell                             | 95 (500 Kg/10 mm)      |

El proceso de soldadura por fricción con agitación hace viable la posibilidad de unir casi cualquier material, es por ello que se abre la posibilidad de implementación de esta técnica de unión en estado sólido en plásticos de alta resistencia de características iguales o diferentes, lo anterior es de relevancia porque las industrias que emplean plásticos para desarrollar sus productos, constantemente están buscando nuevos métodos de unión, los cuales no dañen el medio ambiente, resistan de manera adecuada a las diversas condiciones de uso a los que serán sometidos y sean económicamente aplicables. La selección de los dos tipos de plásticos polipropileno y ABS, se fundamenta en parte en los capítulos anteriores y porque al igual que la gran variedad de materiales ya sean metálicos o plásticos que son

sometidos a este proceso de soldadura por fricción con agitación no cuentan con una base de datos sólida y confiable que permitan una aplicación de este proceso de unión en estado sólido, en la Tabla 8 se enlistan las propiedades del ABS y el polipropileno, dadas por el fabricante.

Tabla 8. Propiedades físicas y mecánicas del polipropileno y ABS.

| Propiedad                | Polipropileno          | ABS                    |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Densidad                 | 0.9 g/cm <sup>3</sup>  | 1.05 g/cm <sup>3</sup> |
| Módulo de elasticidad    | 1300 N/mm <sup>2</sup> | 2.3 KN/mm <sup>2</sup> |
| Resistencia a la tensión | 25-40 GPa              | 41-45 GPa              |
| Dureza Rockwell          | 80-100                 | 105-110                |
| Punto de fusión          | 105 °C                 | 130 °C                 |

#### 4.3. Materiales para las herramientas y los elementos de sujeción empleados en la soldadura por fricción con agitación.

Dentro de las características que deben tener los materiales empleados en la fabricación de las herramientas empleadas en proceso de soldadura por fricción con agitación se pueden mencionar cuatro, las cuales son: buena resistencia al desgaste, punto de fusión mayor que el material a soldar, buena resistencia a la abrasión y dureza mayor que el material a soldar, es por ello que se seleccionaron dos aleaciones de acero que cumplen con estas características uno de ellos es un acero grado herramienta denominado H-13 y el otro es un acero grado maquinaria denominado 9840-R, estos dos aceros cumplen con los requerimientos necesarios para poder ser utilizados en la manufactura de las herramientas, sin embargo se les aplico un tratamiento térmico de templado, para mejorar las características mecánicas que poseían y con esto aumentar el tiempo de vida útil de las mismas. Mientras que para los elementos de sujeción se seleccionó un acero más comercial como lo es el A-36. En la Tabla 9 se enlistan las características químicas de estos tres aceros, proporcionadas por el fabricante, mientras que en la Tabla 10 se enlistan algunas aplicaciones industriales de los mismos

Tabla 9. Propiedades químicas de los aceros H-13 Y 9840-R.

| Material      | C    | Si          | Mn   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   | W  | V    | Otros | BHN/HR    |
|---------------|------|-------------|------|-------|-------|------|------|------|----|------|-------|-----------|
| <b>H-13</b>   | 0.37 | 0.90        | 0.30 | ≤     | ≤     | 4.80 | -    | 1.20 | -  | 0.90 | -     | 241/23    |
|               | 0.43 | 1.20        | 0.50 | 0.030 | 0.030 | 5.50 |      | 1.50 |    | 1.10 |       |           |
| <b>9840-R</b> | 0.38 | 0.15        | 0.70 | 0.04  | 0.04  | 0.70 | 0.85 | 0.20 | -  | -    | -     | 230/21    |
|               | 0.43 | 0.35        | 0.90 |       |       | 0.90 | 1.15 | 0.30 |    |      |       |           |
| <b>A-36</b>   | 0.25 | 0.40<br>max | --   | 0.04  | 0.05  | --   | --   | --   | -- | --   | --    | 125-200/- |

Tabla 10. Aplicaciones industriales de los aceros H-13 Y 9840-R.

| Material      | Aplicaciones Industriales  |
|---------------|--|
| <b>H-13</b>   | Acero con adecuada resistencia al desgaste en caliente, debido a su resistencia a la fatiga térmica, es adecuado para su uso en moldes de fundición refrigerados, dados extrusores para aluminio y latón, cuchillas, dados forjadores. |
| <b>9840-R</b> | Acero al Cr-Ni-Mo, de fácil temple para fabricación de partes sujetas a gran esfuerzo de fatiga, engranes, tornillos sinfín, flechas, piñones, husillos, espárragos, pernos, levas tornillos opresores.                                |
| <b>A-36</b>   | Este tipo de acero se emplea principalmente en perfiles estructurales, planchas, tubos, laminas, barras, angulos   |

#### 4.4. Adaptación de un centro de maquinado DYNA MYTE DM-4800.

Para poder iniciar con el estudio del proceso de soldadura por fricción con agitación, se adaptó un centro de maquinado de tres ejes de la marca Dyna Myte DM-4800, el cual su principal función o para lo que fue fabricado desde un inicio es para fabricar piezas de manufactura por arranque de viruta por medio de control numérico y mediante distintas herramientas de corte. Una de las primeras cosas que se tuvieron que verificar antes de poner en marcha las primeras pruebas de la soldadura por fricción con agitación en este equipo, fue ver el correcto funcionamiento de todos sus elementos, como lo son: velocidad de rotación

del spindle, desplazamientos en los tres ejes (x, y, z), funcionamiento de todos los controles del panel de mando principal del equipo, verificar niveles de aceite, liberar memoria de almacenamiento de programas del equipo y verificar la potencia del motor, este último elemento, la potencia del motor, es el más importante de todos porque nos da un parámetro para saber qué tan robusto es el equipo para poder realizar la soldadura, en la Tabla 11 se muestran las características con que cuenta este centro de maquinado y en la Figura 19 se muestra el equipo utilizado.

Tabla 11. Características del Equipo Dyna Myte DM-4800.

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Marca/Modelo                      | Dyna Myte / DM-4800                          |
| Año de Fabricación                | 1994   |
| Desplazamiento del eje X          | 32 pulgadas                                  |
| Desplazamiento del eje Y          | 20 pulgadas                                  |
| Desplazamiento del eje Z          | 20 pulgadas                                  |
| Tamaño de la mesa                 | 47.5 pulgadas x 25 pulgadas                  |
| Velocidad del Spindle             | 0-6000 RPM                                   |
| Potencia del Motor                | 15/12 HP                                     |
| Numero de Herramientas            | 24   |
| Capacidad de Carga de la Mesa     | 1100 libras                                  |
| Máximo Diámetro de la Herramienta | 3.94 pulgadas                                |
| Máximo Largo de la Herramienta    | 9.84 pulgadas                                |
| Máximo Peso de la Herramienta     | 15.4 libras                                  |
| Dimensiones del Equipo (L×W×H)    | 146.5 pulgadas x 117 pulgadas x 105 pulgadas |
| Peso del Equipo                   | 11 440 libras                                |
| Control CNC                       | Mitsubishi Meldas 500                        |
| Pantalla del Equipo               | 9 pulgadas monocromatica                     |



Figura 19. Centro de Maquinado Dyna Myte DM-4800.

Adicionalmente a estas revisiones técnicas, también se tuvo que aprender los comandos de programación de este equipo (código CNC), a continuación se muestra el código empleado para realizar la soldadura por fricción con agitación.

Programa:

```
0006061 (Nombre del programa)  F 4.0 ;
N1 G54 ;                          N10 G1 Z-0.03 ;
N2 G21 ;                          N11 G04 X5. ;
N3 G43 H0 ;                       F60. ;
N4 G90 ;                          N12 G01 Y110.0 ;
N5 G94 F90 ;                      F10. ;
N6 M03 S1000 ;                   N13 G01 Z20. ;
N7 G0 Z20 ;                      N14 M05 ;
N8 G0 X0 ;                       N15 M30 ;
G00 Y0 ;                          %
N9 G0 Y20 ;
G01 Z4 ;
```

Lista de comandos empleados en el programa:

G54: Origen de coordenadas.

G21: Medidas en mm.

G43: Compensación positiva de la longitud de la herramienta.

G90: Coordenadas absolutas.

G94: Velocidad de avance por minuto.

F: Avance en mm.

M03: Activación del spindle.

S: Revoluciones del spindle.

G0: Posicionamiento rápido.

G1: Interpolación lineal.

G04: Temporizador en segundos.

M05: Detener spindle.

M30: Fin del programa con reinicio y rebobinado.

%: Carácter que indica el final del código.

#### **4.5. Fabricación de los elementos de sujeción.**

Otro aspecto fundamental para la realización de una buena soldadura por el proceso de soldadura por fricción con agitación es la sujeción de los materiales a soldar, esta sujeción tiene que ser lo suficientemente rígida y adecuada para resistir la fuerza de empuje y fricción que se generan durante el proceso, para evitar daños tanto en el equipo, herramienta y daños al personal que esté operando el mismo. Esta sujeción se llevara a cabo mediante sujetadores a lo largo del material y lo más cerca posible de la zona de soldadura. El medio de sujeción seleccionado para esta investigación consiste en una placa de respaldo de 19.05 milímetros de espesor por 300 milímetros de ancho y 300 milímetros de largo, y 8 sujetadores tipo garra de 25.40 milímetros de espesor por 32 milímetros de ancho y 150 milímetros de largo, el material seleccionado para estos elementos de sujeción como ya se había mencionado es un acero A-36, se optó por este tipo de acero porque es un acero económico, de fácil obtención y no muy complicado de maquinar, la unión entre la placa de respaldo, el material a soldar y los sujetadores fue por medio de 8 tornillos de cabeza hexagonal de 1/2 pulgada de diámetro

por 1 ½ pulgada de largo y de 4 tornillos de cabeza allen de 1/2 pulgada de diámetro por 1 ¼ de largo, estos últimos son para fijar la placa base al centro de maquinado, en las figuras 20, 21 y 22 se muestran los elementos de sujeción.

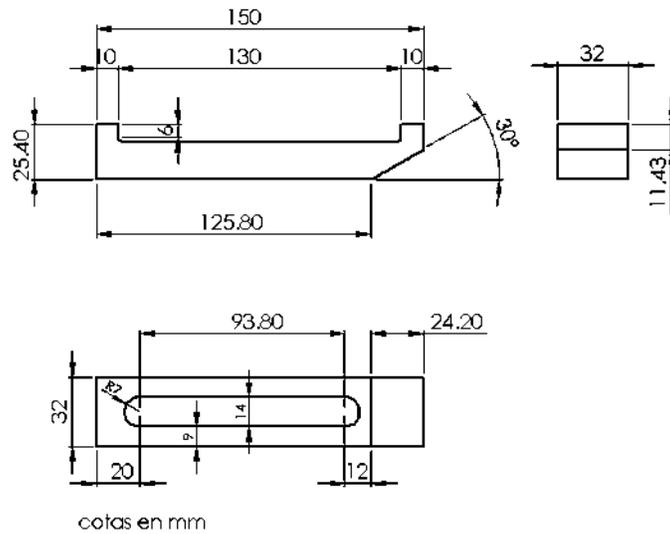


Figura 20. Sujetadores tipo garra.

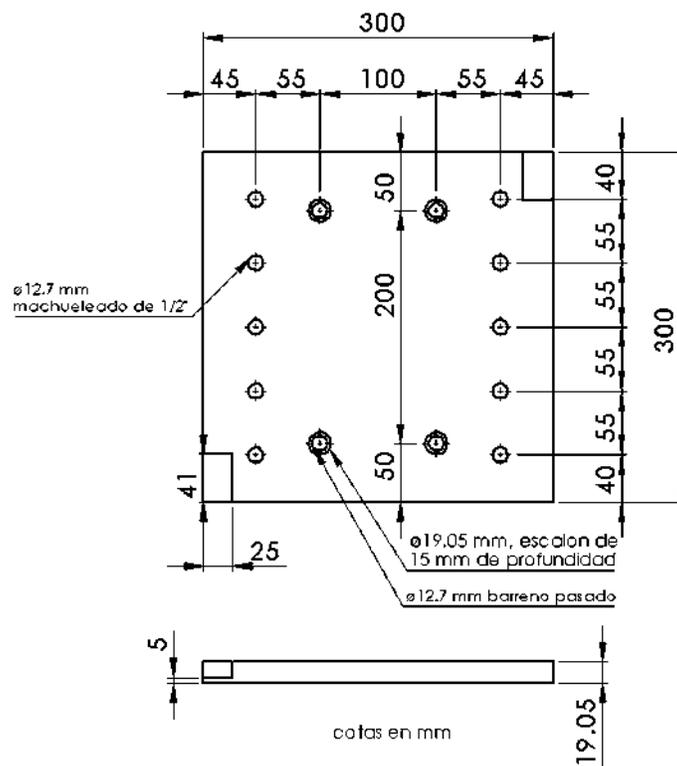


Figura 21. Placa de respaldo.

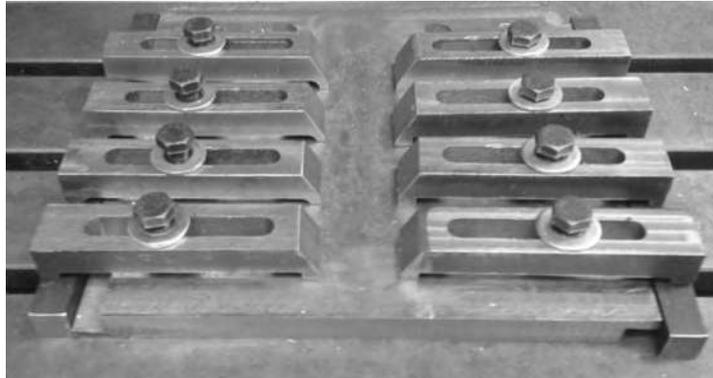


Figura 22. Unión de placa de respaldo y sujetadores.

#### 4.6. Fabricación de las herramientas de soldadura.

Dentro del proceso de soldadura por fricción con agitación las herramientas juegan un papel fundamental en la realización de una soldadura de buenas características, en conjunción con unos parámetros de proceso adecuados y una buena geometría. La herramienta utilizada en el proceso de soldadura por fricción con agitación, está conformada por tres partes principales, en primera instancia tenemos el cuerpo de la herramienta, en segundo lugar tenemos el hombro de la herramienta y finalmente se tiene el pin de la herramienta, Figura 16, la utilización de estas tres partes que conforman la herramienta es para lograr la soldadura del material.

Una parte importante a considerar al fabricar las herramientas del proceso de soldadura por fricción con agitación es la selección de la geometría que tendrá el pin y el hombro, siendo el pin la parte de la herramienta que juega un papel crucial al momento de realizar las soldaduras, esto debido a que dependiendo del tipo de pin seleccionado y de los parámetros seleccionados durante la soldadura, se podrán obtener ciertas propiedades mecánicas en los materiales a soldar, esto se puede asemejar a los procesos por arco eléctrico, en los cuales el electrodo o material de aporte en conjunto con la corriente eléctrica empleada y la polaridad de la misma, darán como resultado una soldadura de ciertas características. Dentro de las geometrías del pin que se pueden llegar a utilizar en la herramienta para este proceso de soldadura, se cuenta con una amplia variedad, como pueden ser: cilíndrico o cónico, con o sin rosca; cuadrado, triangular u otras geometrías más complejas, mientras que para el

hombro de igual manera se puede contar con una amplia variedad de morfologías desde la más sencilla como puede ser hombro plano hasta las más complejas como hombro con hélices, entre muchas otras, en la Figura 23 se pueden observar solo algunas de las muchas geometrías con las cuales puede contar el pin y hombro.

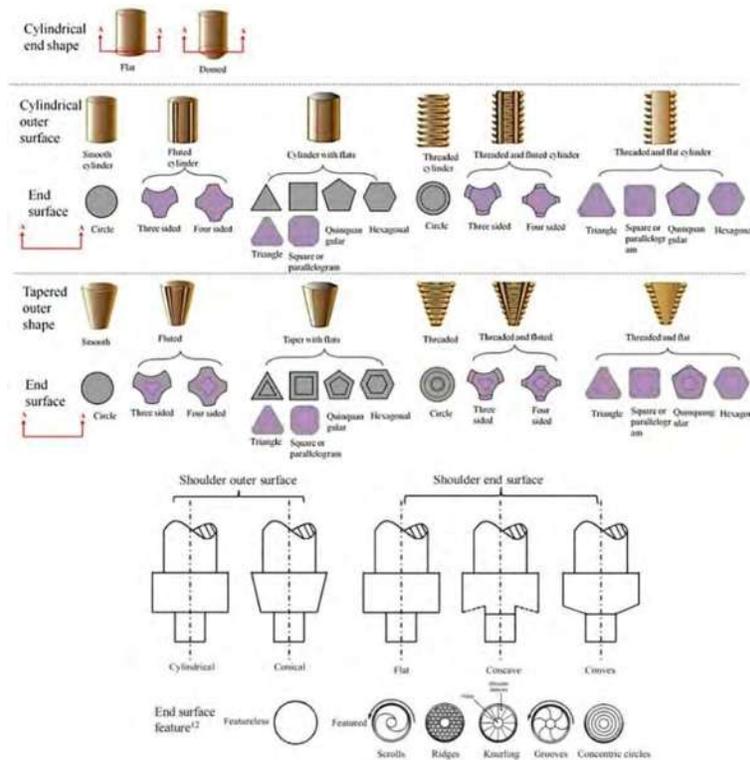


Figura 23. Geometrías Pin / Hombro [87].

Se han analizado siete distintas geometrías en las herramientas a lo largo de esta investigación, desde geometrías básicas en el pin, como son cuadradas, cónicas, hexagonales y una denominada hexagonal tipo "cabeza de clavo" (desarrollada en el marco de este trabajo); mientras que en el hombro solo se han manejado dos tipos de geometrías: a) hombro plano y b) hombro de círculos concéntricos. Los materiales empleados para la fabricación de estas herramientas son dos aceros diferentes: a) el H-13, y b) 9840; estos aceros después del maquinado de la geometría, han pasado por un tratamiento térmico de templado para mejorar sus propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste. El templado, se llevó a cabo elevando la temperatura de los aceros a  $850^{\circ}\text{C}$  y teniendo un tiempo de sostenimiento de esta temperatura por un periodo de 30 minutos para asegurar la uniformidad de la temperatura en

toda la pieza, posteriormente se realizó el enfriamiento del material de forma inmediata en aceite automotriz, Figuras 24 y 25 respectivamente.

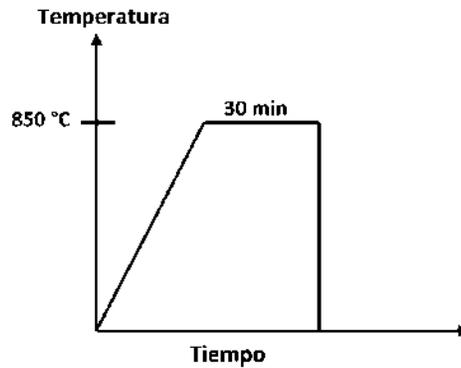


Figura 24. Tratamiento Térmico de Templado en las Herramientas.



Figura 25. Tratamiento Térmico: a) Extracción de la herramienta del horno y b) Enfriamiento inmediato en aceite.

En la Tabla 12 se muestran las distintas configuraciones de los modelos para las herramientas y en las Figuras de la 26 a 32 se muestran las geometrías y dimensiones de las mismas; cabe destacar que los modelos de herramienta M1, M4 y M6 son iguales en cuanto a la geometría del hombro que en este caso es plano y para el pin las herramientas M1 y M4 conservan la misma geometría que es hexagonal, mientras que para la herramienta M6 se conserva de igual manera la forma hexagonal en el pin solo que con una ligera variación en la punta de este al cual, como mencionado anteriormente, se le denomina tipo clavo. Debido a estas similitudes es que se considera a este conjunto de herramientas pertenecientes a una misma familia; de igual manera las herramientas M5 y M7 se consideran pertenecientes a una segunda familia, caracterizada por presentar hombros con círculos concéntricos.

Tabla 12. Modelos de Herramientas.

| Modelo         | Pin              | Hombro   | Material   | Dimensión Pin(mm) | Dimensión Hombro(mm) |
|----------------|------------------|----------|------------|-------------------|----------------------|
| Modelo 1(M1)   | Hexagonal        | plano    | Acero H-13 | 6                 | 19.05                |
| Modelo 2 (M2)  | Cuadrado         | Plano    | Acero 9840 | 9                 | 19.05                |
| Modelo 3 (M3)  | Cónico           | Plano    | Acero H-13 | 9                 | 19.05                |
| Modelo 4 (M4)  | Hexagonal        | plano    | Acero H-13 | 9                 | 25.4                 |
| Modelo 5 (M5)  | Hexagonal        | Círculos | Acero 9840 | 9                 | 25.4                 |
| Modelo 6 (*M6) | Hexagonal-Clavo  | Plano    | Acero H-13 | 9                 | 25.4                 |
| Modelo 7 (*M7) | Hexagonal-Clavo  | Círculos | Aero 9840  | 9                 | 25.4                 |
| Modelo 8 (M8)  | Cilíndrica       | Plano    | Aero 9840  | 9                 | 25.4                 |
| Modelo 9 (M9)  | Cilíndrica-Clavo | Plano    | Acero H-13 | 9                 | 25.4                 |

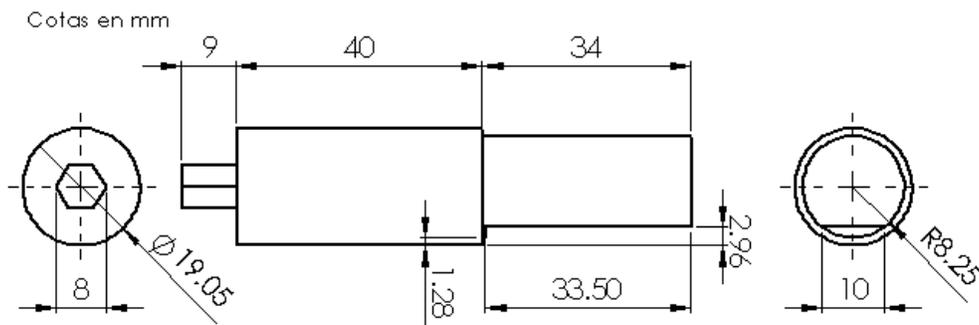


Figura 26. Herramienta Modelo 1.

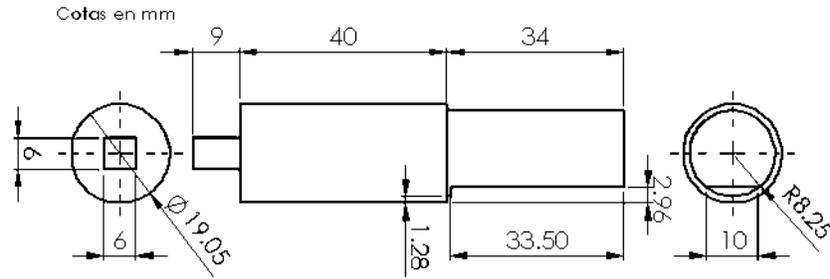


Figura 27.- Herramienta Modelo 2.

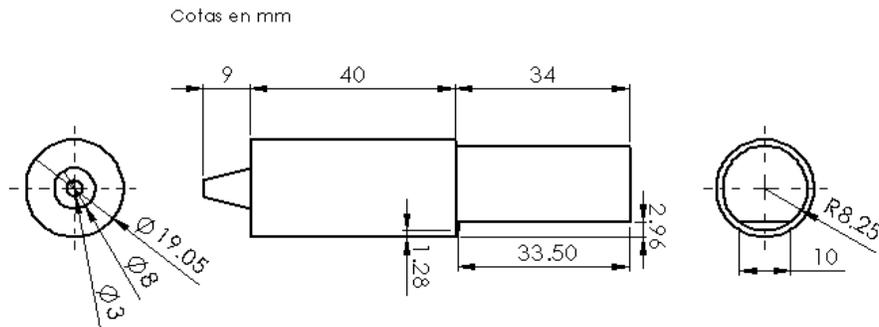


Figura 28.- Herramienta Modelo 3.

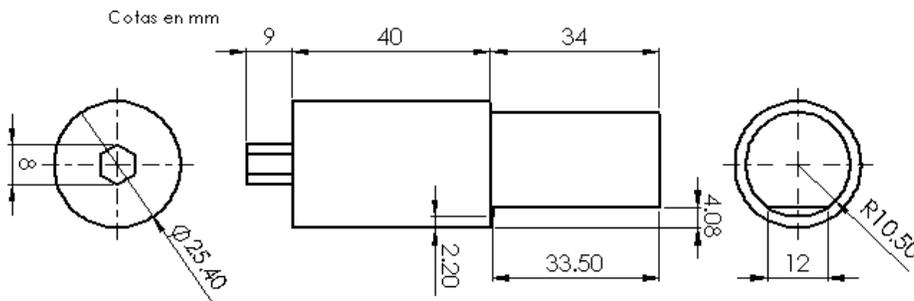


Figura 29.- Herramienta Modelo 4.

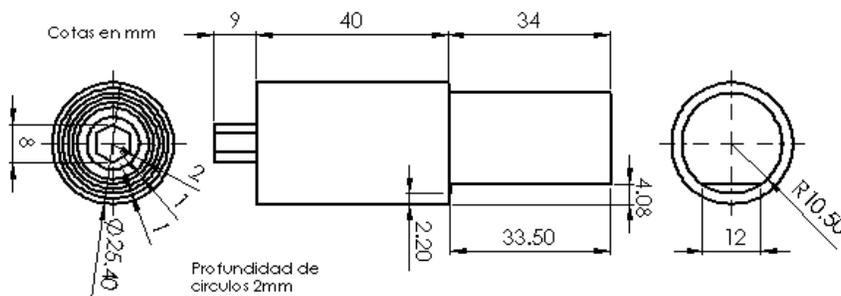


Figura 30.- Herramienta Modelo 5.

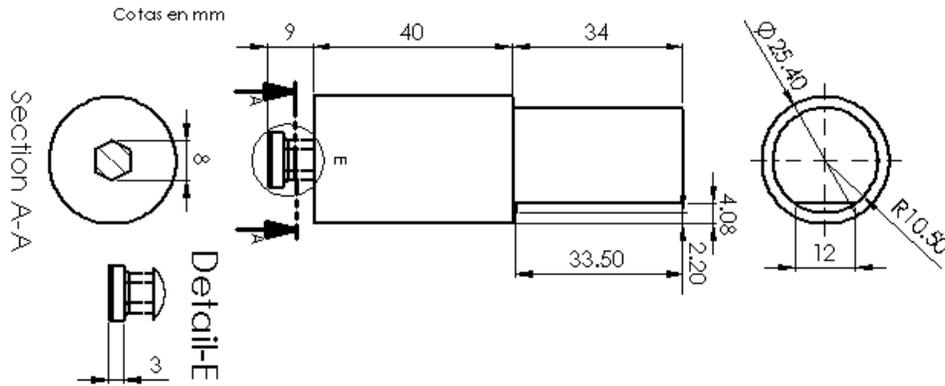


Figura 31.- Herramienta Modelo 6.

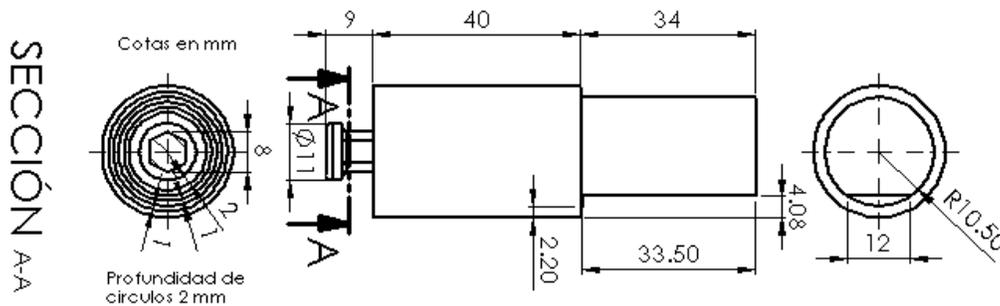


Figura 32.- Herramienta Modelo 7.

Un punto a remarcar en la fabricación de las herramientas, es el hecho que en una primera etapa de la investigación solo se planteó el uso de tres tipos de herramientas cuadrada, cónica y hexagonal, sin embargo estos perfiles de herramientas no dieron buenos resultados sobre la aleación de aluminio 6061-T6, es por ello que se decide modificar el perfil de la herramienta a uno tipo clavo, figuras 7 y 8, este tipo de geometría de herramienta cabe resaltar que no se encontraba reportada aun en la literatura existente, este tipo de geometría en la herramienta subsano los problemas que se habían tenido con las geometrías de herramientas iniciales.

Los modelos de herramienta M8 y M9, de igual manera no se habían contemplado desde un inicio en la investigación, sin embargo por las observaciones y experiencia adquirida se decidieron fabricar, esto se discutirá con más detalle en los capítulos siguientes.

#### **4.7. Pruebas preliminares de la soldadura por fricción con agitación en polipropileno y una aleación de aluminio 1010.**

Antes de comenzar a realizar la soldadura por fricción con agitación en los materiales de estudio, se decidió hacer unas pruebas preliminares en dos materiales, el primero de ellos es un plástico industrial denominado polipropileno y el otro es un aluminio 1010 el cual es denominado comercialmente puro 1010.

##### **4.7.1. Soldadura preliminar por fricción con agitación en el plástico industrial polipropileno.**

Verificado el correcto funcionamiento del centro de maquinado, se procedió a realizar la primera prueba del proceso de soldadura por fricción con agitación, esta prueba se realizó en un material plástico denominado como polipropileno y con un pin cuadrado en la herramienta, se decidió hacer la primera prueba en este material porque se presentaría una menor resistencia a la penetración de la herramienta de soldadura, una temperatura de soldadura menor y un menor riesgo de sufrir un accidente debido a las fuerzas generadas durante la soldadura, esto se asegura debido a las características mecánicas del polipropileno. Con esto podríamos familiarizarnos con todos los parámetros que están implicados dentro de este proceso de soldadura en estado sólido y así también poder observar el funcionamiento y comportamiento del centro de maquinado, para saber si podría este equipo realizar esta soldadura en materiales de mayor dureza, cabe mencionar una vez más que este equipo no estaba diseñado en un principio para realizar este tipo de tarea, es por ello que era de suma importancia comenzar con un material que no presentara gran riesgo de daño al equipo, a las herramientas fabricadas y a los operarios del mismo. El material de estudio consistió en dos placas de polipropileno de 9 mm de espesor por 50 mm de ancho y 120 mm de largo, con una junta a tope, Figura 33.



Figura 33. Sujeción y posicionamiento de la herramienta en polipropileno.

Una vez colocadas y fijadas las placas dentro del centro de maquinado, se procedió a realizar la programación de los parámetros principales de este proceso de soldadura en la memoria interna del equipo, estos parámetros son: velocidad de rotación de la herramienta, velocidad de penetración de la herramienta, profundidad de penetración de la herramienta, tiempo de sostenimiento de la herramienta, velocidad de desplazamiento de la herramienta y velocidad de retirada de la herramienta, a continuación se muestra el código empleado para realizar la soldadura por fricción con agitación en polipropileno.

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| 0006061 (Polipropileno) | F 6.0 ;          |
| N1 G54 ;                | N10 G1 Z-0.03 ;  |
| N2 G21 ;                | N11 G04 X5. ;    |
| N3 G43 H0 ;             | F40. ;           |
| N4 G90 ;                | N12 G01 Y110.0 ; |
| N5 G94 F70 ;            | F30. ;           |
| N6 M03 S650 ;           | N13 G01 Z20. ;   |
| N7 G0 Z20 ;             | N14 M05 ;        |
| N8 G0 X0 ;              | N15 M30 ;        |
| G00 Y0 ;                | %                |
| N9 G0 Y10 ;             |                  |
| G01 Z4 ;                |                  |

En la primera prueba de este proceso de soldadura en el polipropileno se tuvo un resultado no satisfactorio, esto debido a que la herramienta no bajo lo suficiente, provocando con esto que el hombro de la misma no estuviera en contacto con el material y esto provocará que el material que estaba siendo agitado y deformado plásticamente por el pin saliera de la interface de ambos materiales y aunado a esto no se tuviera una entrada de calor suficiente para generar la soldadura, obteniendo como resultado un cordón superficial e inadecuado. Teniendo en cuenta este error se modificó la penetración de la herramienta la cual se encontraba en G01 Z4 y se modificó a G01 Z8, esta modificación dio como resultado una soldadura adecuada y con una buena repetitividad, en la Figura 34 se muestran dos soldaduras realizadas en el polipropileno con resultados satisfactorios. La temperatura máxima registrada durante el proceso en el polipropileno fue de  $60^{\circ}\text{C}$  , esta medición se realizó por medio de un termómetro laser.



Figura 34. Soldadura por Fricción con Agitación en Polipropileno.

#### **4.7.2. Soldadura por fricción con agitación de una aleación de aluminio 1100.**

Al igual que en la soldadura por fricción con agitación del polipropileno en la soldadura para el aluminio 1010 se siguió el mismo procedimiento, el material empleado fueron dos placas de aluminio 1100 (comercialmente puro) de 6 mm de espesor por 80 mm de ancho y 207 mm

de largo, con una junta a tope y una herramienta de pin hexagonal, como se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Sujeción y posicionamiento de la herramienta en la aleación de aluminio 1100.

En la primera prueba que se realizó en esta aleación de aluminio, también se presentó la misma problemática que con la soldadura en polipropileno, no se tuvo un contacto adecuado del hombro de la herramienta con el material y por ende no se obtuvo una soldadura correcta, en la Figura 36 se puede apreciar este error el cual está marcado como zona I placa A, donde se aprecia que el material plastificado se desbordo al no encontrar una barrera que lo contuviera, que en este caso sería el hombro de la herramienta.



Figura 36.- Cordón de soldadura deficiente en la placa A, aluminio 1010.

Se modificaron los parámetros de penetración de la herramienta para asegurarse que tanto el pin como el hombro presentaran un contacto adecuado en el material a soldar, el programa final que se obtuvo después de hacer las correcciones se presenta a continuación, este programa dio como resultado una soldadura buena y también buena repetitividad.

Programa para la aleación de aluminio 1100:

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| 0006061 (Nombre del programa) | F 4.0 ;          |
| N1 G54 ;                      | N10 G1 Z-0.06 ;  |
| N2 G21 ;                      | N11 G04 X10. ;   |
| N3 G43 H0 ;                   | F60. ;           |
| N4 G90 ;                      | N12 G01 Y198.0 ; |
| N5 G94 F70 ;                  | F40. ;           |
| N6 M03 S750 ;                 | N13 G01 Z20. ;   |
| N7 G0 Z20 ;                   | N14 M05 ;        |
| N8 G0 X0 ;                    | N15 M30 ;        |
| G00 Y0 ;                      | %                |
| N9 G0 Y9 ;                    |                  |
| G01 Z7 ;                      |                  |

En la Figura 37 se muestra la soldadura final obtenida en la placa A, en esta placa se pueden observar dos zonas:

Zona I placa A: Es la zona que en un principio presentaba una soldadura incorrecta por la penetración inadecuada de la herramienta, pero que con los parámetros finales de soldadura, pudo corregirse este error en el cordón, el cual presenta una buena homogeneidad.

Zona II placa A: Esta zona no presentaba ningún problema anterior, por lo tanto se puede apreciar un cordón de soldadura adecuado.

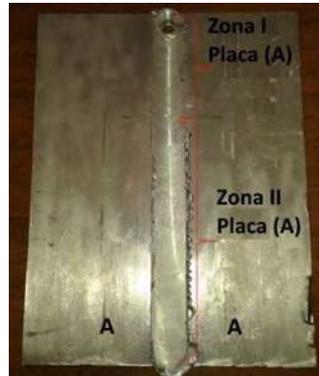


Figura 37. Cordón de soldadura en la placa A, aluminio 1010.

Como se mencionó anteriormente, el error que se tuvo en un principio con la placa A, se pudo corregir en el cordón con los parámetros finales, no siendo así con la raíz de la soldadura, la cual presenta falta de material entre ambas placas en la zona I de la placa A, mientras que en la zona II de la placa A se puede apreciar una raíz continua con material suficiente entre ambas placas, esto se puede observar en la Figura 38.

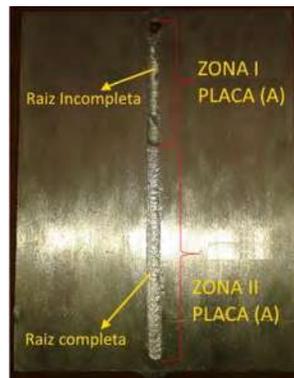


Figura 38.- Raíz de la soldadura en placa A, aluminio 1010.

Se soldaron otro par de placas de aluminio de la misma aleación 1010 (placa B), en esta soldadura no se presentó ningún tipo de problema, teniendo como resultado un cordón continuo que presentaba una soldadura de buena apariencia y una raíz sana sin ninguna zona dañada, en la figura 39 y 40 se puede ver el cordón y la raíz respectivamente de esta segunda soldadura. La temperatura máxima registrada por el aluminio durante el proceso de soldadura fue de  $160^{\circ}C$  , esta medición se realizó por medio de un termómetro laser.

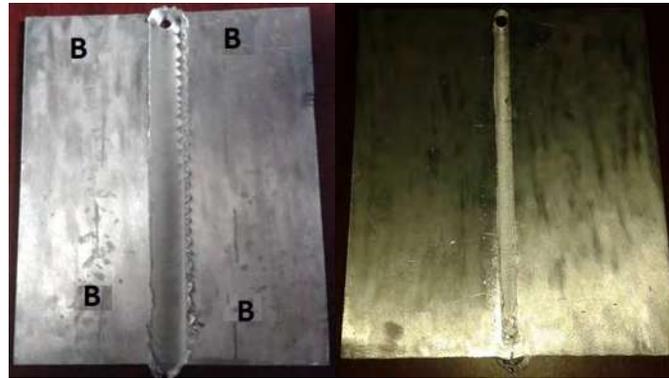


Figura 39.- Cordón de soldadura de la placa B. Figura 40. Raíz de la soldadura en la placa B.

Un inconveniente que surgió después de efectuar las soldaduras en esta aleación de aluminio (o en cualquier otro tipo de aleación de aluminio), fue la presencia de material de aluminio adherido a la herramienta de soldadura, este material no podía ser retirado fácilmente de forma manual y aplicar algún medio mecánico para su limpieza implicaría un posible daño a la herramienta, es por ello que se utilizó una limpieza química para retirar esas incrustaciones. El medio químico empleado para la limpieza de la herramienta fue ácido muriático, este ácido tiene la particularidad que va desintegrando el aluminio sin afectar de manera significativa al material del cual está fabricada la herramienta, en la figura 41 a) se puede apreciar las incrustaciones de aluminio y el figura 41 b) se observa la limpieza final de la herramienta.

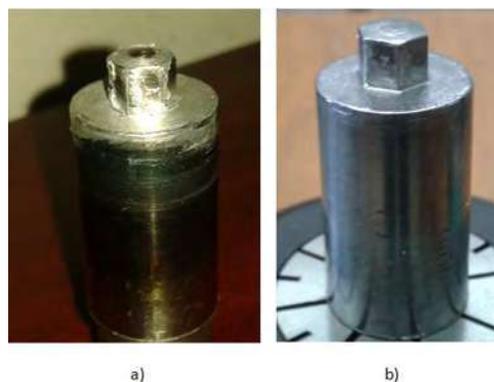


Figura 41.- a) incrustaciones de aluminio y b) limpieza final.

#### 4.8. Características de los tratamientos térmicos aplicados al aluminio 6061-T6.

Las placas de aluminio de 9.5 mm de espesor de la aleación 6061-T6, serán sometidas a dos tratamientos térmicos, antes de realizar la soldadura por fricción con agitación para mejorar con ellos sus propiedades mecánicas, específicamente su resistencia a la tensión. El primer tratamiento térmico al que se someterá las placas de aluminio es un solubilizado, este tratamiento térmico consiste en calentar las piezas a una temperatura entre la línea solvus y solidus (480 °C a 560 °C, según la aleación), se mantiene el metal por un periodo de tiempo (según la aleación) a esta temperatura hasta obtener una solución sólida homogénea de la matriz (los elementos endurecedores de la aleación se disuelvan logrando una solución sólida homogénea) inmediatamente se realiza un enfriamiento rápido, generalmente a temperatura ambiente y el medio de enfriamiento habitualmente es agua. El segundo tratamiento térmico consistirá en un envejecimiento parcial, el cual consiste en endurecer el material para aumentar la dureza y resistencia, en este tratamiento se somete a los materiales a una temperatura relativamente baja (entre la ambiente y 160 °C) y por tiempos controlados, dependientes del tipo de aleación de las piezas, para así lograr la precipitación de finas partículas en toda la matriz metálica. Se sometieron seis placas de Al6061-T6 a estos tratamientos térmicos bajo las siguientes condiciones: Tratamiento térmico de **solubilizado**, se llevó a una temperatura de 530 °C por un periodo de una hora, enfriando los materiales inmediatamente en agua a temperatura ambiente, estas condiciones del tratamiento térmico se mantuvieron para todos los casos de estudio, Figura 42.

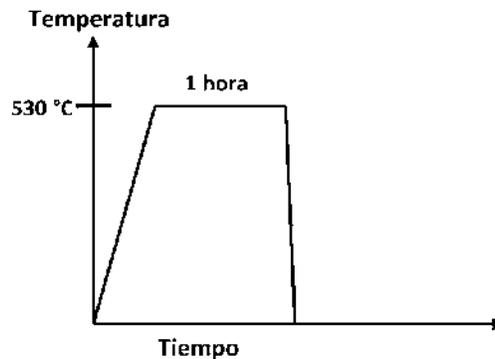


Figura 42. Grafica del tratamiento térmico de solubilizado.

El tratamiento térmico de envejecimiento parcial, se llevó a una temperatura de 160 °C por diferentes periodos de tiempo, dependiendo del tiempo de envejecimiento que se quisiera evaluar, de igual manera los materiales se enfriaron inmediatamente en agua a temperatura ambiente, Figura 43.

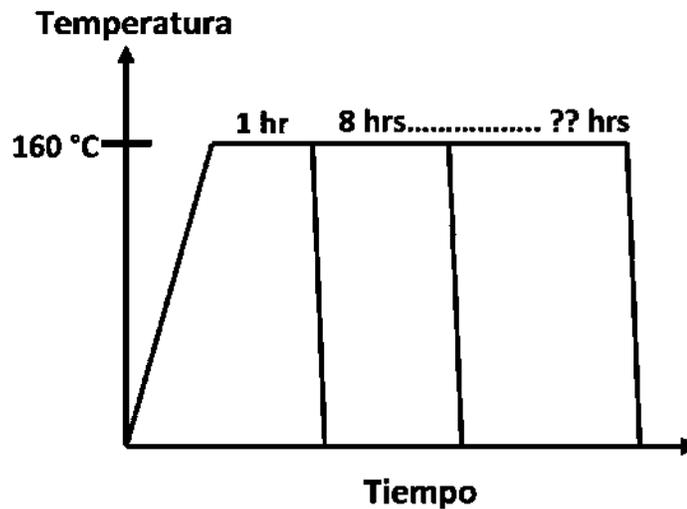


Figura 43. Grafica del tratamiento térmico de envejecimiento parcial.

Después de realizar los dos tratamientos térmicos, se soldaron inmediatamente las placas de aluminio, esto para evitar que las mismas se envejecieran naturalmente.

#### **4.9. Soldadura por fricción con agitación en una aleación de aluminio 6061-T6.**

Una vez fabricadas las herramientas se realizaron las uniones a tope de dos placas de aluminio 6061-T6, las placas de aluminio se seleccionaron en espesor de 9.5 mm, las cuales contaban con 150 mm de largo por 100 mm de ancho, antes de la soldadura se realizó una limpieza de los materiales por medio de un cepillo de acero inoxidable, la profundidad de penetración de la herramienta se realizó a 9.3 mm del espesor total de los materiales, el sentido de giro de las herramientas fue en sentido horario a las manecillas del reloj, esto quiere decir que el lado de avance ocurre del lado izquierdo mientras que el lado de retiradas ocurre del lado derecho del material .

Para lograr la unión de los materiales se controlaron la gran mayoría de los parámetros principales dentro del proceso de soldadura por fricción con agitación, únicamente el parámetro de la inclinación de la herramienta no se modificó (se mantuvo a 90° respecto de la placa) debido a las características del centro de maquinado, el programa utilizado cuenta con el mismo código de las secciones anteriores, la única diferencia es que se va ir variando lo que son: velocidades de giro, velocidades de avance, velocidad de penetración, tiempo de sostenimiento y velocidad de salida. Los casos de estudio se dividieron en cuatro:

- 1) Soldaduras del material base con herramientas convencionales.
- 2) Soldaduras del material base con herramienta tipo clavo.
- 3) Soldaduras del material base tratado térmicamente antes de la unión.
- 4) Soldaduras del material base tratado térmicamente después de la unión.

Durante la investigación se realizaron 44 soldaduras en la aleación de aluminio 6061-T6, estas 44 soldaduras se repartieron entre materiales base y materiales base tratados térmicamente, es por ello que se designara una nomenclatura más fácil de interpretar para cada caso de investigación, esto se hace porque muchas de las soldaduras pertenecientes a un mismo grupo se realizaron en distintos momento de la investigación, dándoles una nomenclatura conforme a la fecha, si dejáramos esta designación sería muy complicado leerla, es por ello que todos los datos se agruparan para cada caso como si se hubieran realizado en los mismo periodos de tiempo, esto aplica de igual forma para los parámetros empleados durante el proceso.

En la Tabla 13 se muestran los parámetros para cada ensayo, empleados en las soldaduras de las placas de aluminio 6061-T6.

Tabla 13. Parámetros del Proceso.

| Condición | Velocidad de Giro (rpm) | Velocidad de Avance (mm/min) | Velocidad de Penetración (mm/min) | Tiempo de Sostenimiento (segundos) |
|-----------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| C1        | 800                     | 40                           | 3                                 | 20                                 |
| C2        | 1000                    | 60                           | 3                                 | 60                                 |
| C3        | 1000                    | 80                           | 3                                 | 60                                 |
| C4        | 1000                    | 90                           | 9                                 | 10                                 |
| C5        | 1000                    | 300                          | 9                                 | 10                                 |
| C6        | 1200                    | 60                           | 3                                 | 60                                 |
| C7        | 1200                    | 90                           | 9                                 | 10                                 |

El empleo y variación de estos cuatro parámetros en conjunción con los diferentes modelos de herramientas otorgaran al material una serie de características mecánicas particulares, estas características se ven reflejadas tanto en resistencia como en microestructura, en un primer análisis se observó que la geometría de la herramienta es la que desempeña una función primordial a la hora de obtener una soldadura libre de defectos. En la Tabla 14 se presenta la designación dada a cada caso de estudio, esta designación se da por medio de una letra específica.

Tabla 14. Designación para los distintos tipos de soldadura.

| Caso de estudio   | Designación |
|---|-------------|
| Soldaduras del material base con herramientas convencionales          | A           |
| Soldaduras del material base con herramientas tipo clavo              | B           |
| Soldaduras del material base tratado térmicamente antes de la unión   | CA(t)       |
| Soldaduras del material base tratado térmicamente después de la unión | CD(t)       |

En las tablas 15 a 18, se observan las distintas condiciones de ensayo, herramientas empleadas y si se presentó defecto o no en la unión de las placas de aluminio 6061-T6.

Tabla 15. Condiciones de ensayo para el caso de estudio A.

| Ensayo | Modelo de Herramienta | Condición de parámetros | Defecto Presente |
|--------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| A 1    | C1                    | M1                      | SI               |
| A 2    | C1                    | M1                      | SI               |
| A 3    | C1                    | M2                      | SI               |
| A 4    | C2                    | M2                      | SI               |
| A 5    | C2                    | M3                      | SI               |
| A 6    | C3                    | M3                      | SI               |
| A 7    | C6                    | M3                      | SI               |
| A 8    | C4                    | M3                      | SI               |
| A-9    | C4                    | M3                      | SI               |
| A 10   | C7                    | M3                      | SI               |
| A 11   | C1                    | M1                      | SI               |
| A 12   | C1                    | M1                      | SI               |
| A 13   | C4                    | M1                      | SI               |
| A 14   | C4                    | M5                      | SI               |
| A 15   | C4                    | M1                      | SI               |
| A 16   | C7                    | M5                      | SI               |
| A 17   | C1                    | M1                      | SI               |
| A 18   | C4                    | M5                      | SI               |
| A 19   | C7                    | M5                      | SI               |
| A 20   | C4                    | M1                      | SI               |
| A 21   | C5                    | M5                      | SI               |
| A 22   | C1                    | M8                      | SI               |

Tabla 16. Condiciones de ensayo para el caso de estudio B.

| Ensayo | Modelo de Herramienta | Condición de parámetros | Defecto Presente |
|--------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| B 1    | C1                    | M7                      | NO               |
| B 2    | C7                    | M7                      | NO               |
| B 3    | C1                    | M6                      | NO               |
| B 4    | C4                    | M7                      | NO               |
| B 5    | C4                    | M6                      | NO               |
| B 6    | C4                    | M6                      | NO               |
| B 7    | C4                    | M6                      | NO               |
| B 8    | C4                    | M6                      | NO               |
| B 9    | C4                    | M6                      | NO               |
| B 10   | C4                    | M6                      | NO               |

Tabla 17. Condiciones de ensayo para el caso de estudio CA.

| Ensayo        | Modelo de Herramienta | Condición de parámetros | Defecto Presente |
|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| CA 1-12 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 2-15 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 3-16 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 4-4 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 5-6 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 6-8 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 7-6 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 8-14.5 HRS | C4                    | M6                      | NO               |
| CA 9-6 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |

Tabla 18. Condiciones de ensayo para el caso de estudio CD..

| Ensayo        | Modelo de Herramienta | Condición de parámetros | Defecto Presente |
|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| CD 1-12.5 HRS | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 2-13 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 3-13.5 HRS | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 4-14 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 5-14.5 HRS | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 6-15 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 7-16 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 8-6 HRS    | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 9-14.5 HRS | C4                    | M6                      | NO               |
| CD 10-6 HRS   | C4                    | M6                      | NO               |

#### 4.10. Características de los ensayos de tensión, microdureza y microscopia electrónica.

Las probetas de tensión y microdureza se obtuvieron de una sección perpendicular a la soldadura, la descripción del proceso de soldadura y la obtención de las probetas de tensión y microdureza se muestran en la Figura 44 y 45. Las probetas de tensión para los tres casos de estudio, se ensayaron en una maquina universal, modelo Zwick /Roell Z100, con una carga máxima de prueba de 100 KN, los ensayos se efectuaron a una velocidad de desplazamiento constante de 6 mm/min, las dimensiones y tolerancias se seleccionaron en base a la norma ASTM-E8M. Los perfiles de Microdureza, se obtuvieron en un microdurómetro Mitutoyo modelo HM 200, a una carga aplicada de 0.1 Kg por un tiempo de 10 segundos, en la Figura 45 se muestran las dimensiones de las probetas de tensión y microdureza. Se realizó un pulido de los materiales seleccionados para hacer análisis microestructural, este pulido se realizó por medio de lijas de agua con granulometrias a partir de 360 hasta 1000, posteriormente se le dio un pulido final por medio de pasta de diamante de 3µm y 6µm, para finalmente realizar un ataque químico en secciones perpendiculares a la

soldadura para revelar su microestructura, estas secciones comparten las mismas dimensiones que las probetas de dureza, los reactivos empleados fueron, ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (Hf) y agua destilada ( $H_2O$ ), las cantidades fueron las siguientes, 4.5 ml de HCl + 3 ml Hf + 25.5 ml  $H_2O$ , el tiempo de exposición del material a esta solución fue de 30 segundos, un tiempo de exposición mayor a este quemaría el material y no revelaría la microestructura, se retiró del material el sobrante de la solución mediante un chorro de agua. La microscopía electrónica de barrido se llevó a cabo a partir de las zonas de fractura de las probetas de tensión, de igual manera se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos X sobre las mismas zonas de fractura.

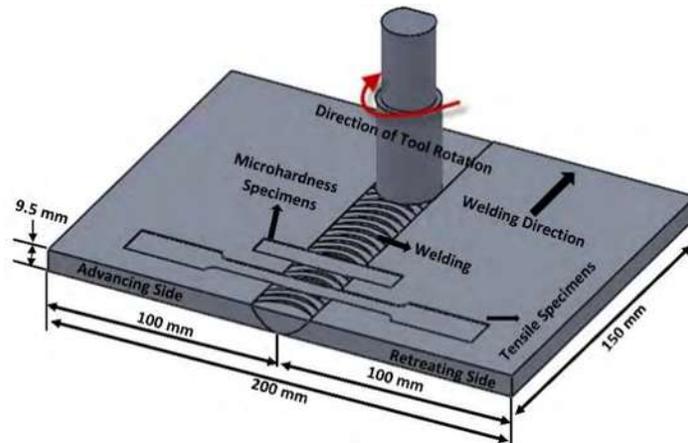


Figura 44. Descripción de la obtención de las probetas de Tensión y Microdureza. .

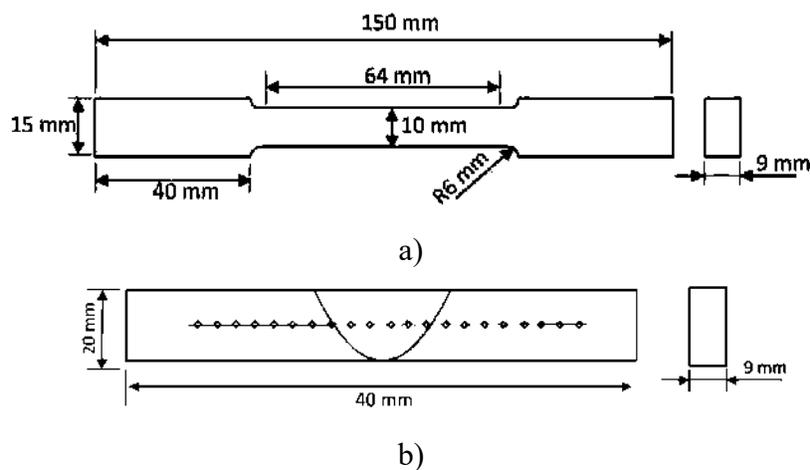


Figura 45. Dimensiones de las probetas, a) Tensión, b) Microdureza.

#### 4.11. Monitoreo de temperatura.

Durante los ensayos se monitoreo, mediante una cámara termografía las temperaturas presentes tanto en la soldadura como en el equipo empleado para este fin, esto se realizó para verificar que el calentamiento generado durante el proceso no fuera excesivo para el equipo, las temperaturas alcanzadas durante la soldadura en los distintos puntos de interés tanto en el equipo como en el material de estudio se muestran en la tabla 19 y en las Figuras 46 a 50.

Tabla 19. Temperatura presentes en el proceso de soldadura cámara termografía.

| Elemento                          | Temperatura °C |
|-----------------------------------|----------------|
| (1) Interfaz material/herramienta | 282            |
| (2) Porta herramienta 1           | 52             |
| (3) Porta herramienta 2           | 35             |
| (4) Spindle                       | 20             |
| (5) Mesa de trabajo               | 20             |
| (6) Placa base alrededores        | 54             |
| (7) Sujetadores                   | 90             |
| (8) Interior del spindle          | 20             |
| (9) Motor                         | 20             |

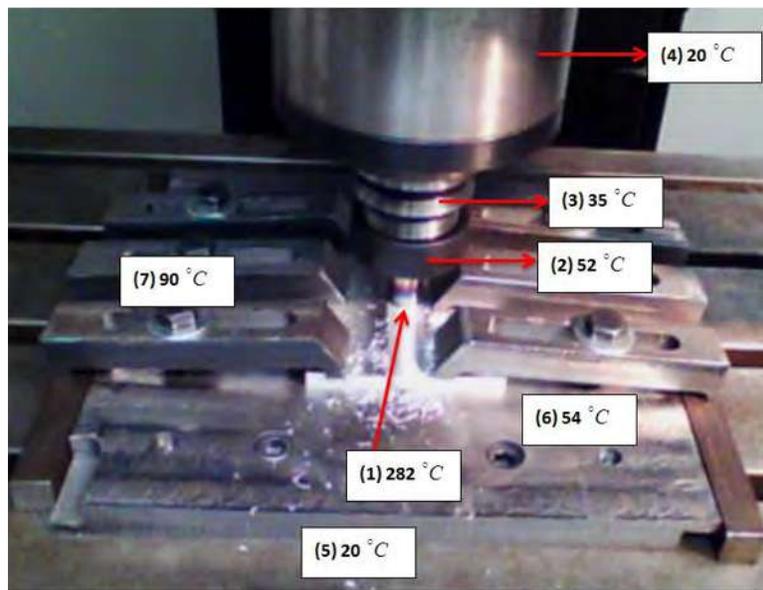


Figura 46. Elementos presentes durante el proceso de soldadura por fricción con agitación.

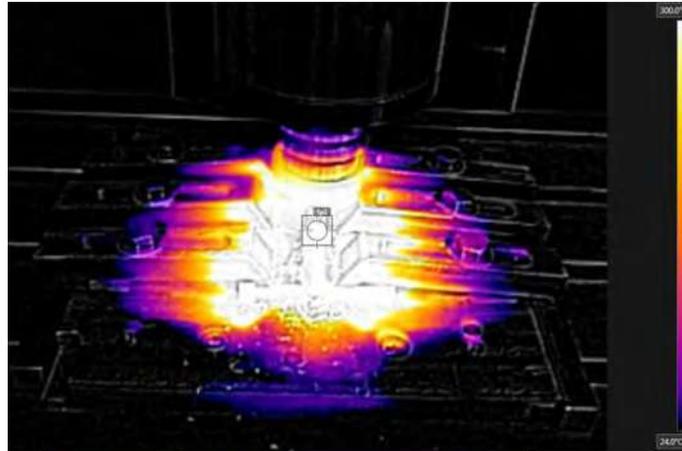


Figura 47. Distribución de temperaturas durante el proceso de soldadura.

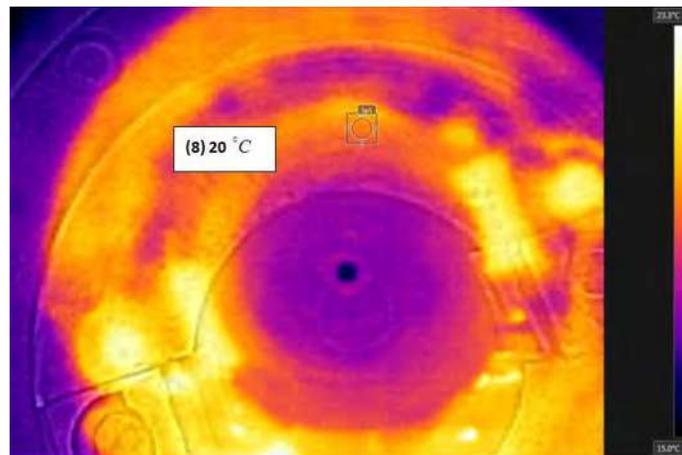


Figura 48. Distribución de temperaturas dentro del spindle porta herramientas.

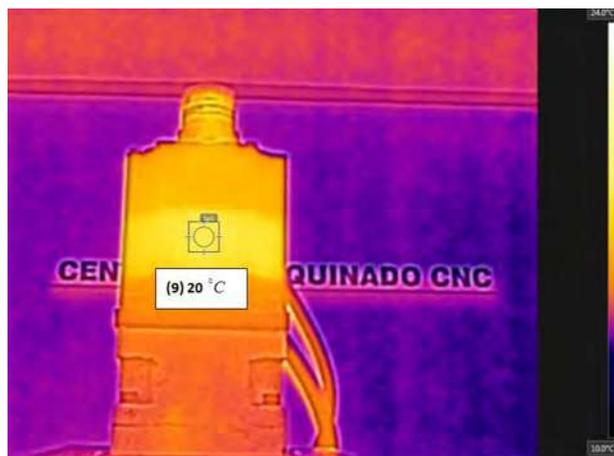


Figura 49. Distribución de las temperaturas en el motor del equipo.

Adicionalmente se realizó un monitoreo de temperaturas durante el proceso de soldadura por fricción con agitación, por medio de termopares, estos se colocaron al inicio de la soldadura y al final de la soldadura, las temperaturas registradas con estos termopares alcanzaron un valor de 277 °C, Figura 50.



Figura 50. Temperatura registrada con termopares en la soldadura FSW.

Con los resultados obtenidos de las temperaturas se puede concluir que los valores alcanzados por estas durante el proceso de soldadura FSW, no pueden llegar a afectar el funcionamiento del equipo, esto se asegura viendo que donde es la mayor temperatura, interfaz material / herramienta, se alcanza una temperatura de 282 °C en promedio y esta no es transferida de forma inmediata al equipo.

## CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

### 5.1. Microdureza.

#### 5.1.1. Perfil de Microdureza en la aleación de aluminio 6061-T6.

Se realizó un perfil de micro dureza para determinar en qué horas se podría llevar a cabo el tratamiento térmico de envejecimiento parcial, y evitar un sobre envejecimiento en la aleación de aluminio 6061-T6 que trajera como consecuencia una disminución en las propiedades mecánicas del mismo, para llevar a cabo este perfil se sometieron a tratamiento térmico 30 probetas de forma rectangular, Figura 51, en la Figura 52 se muestra el perfil de microdureza a distintas horas de envejecimiento.



Figura 51. Probetas empleadas para obtener el perfil de microdureza.

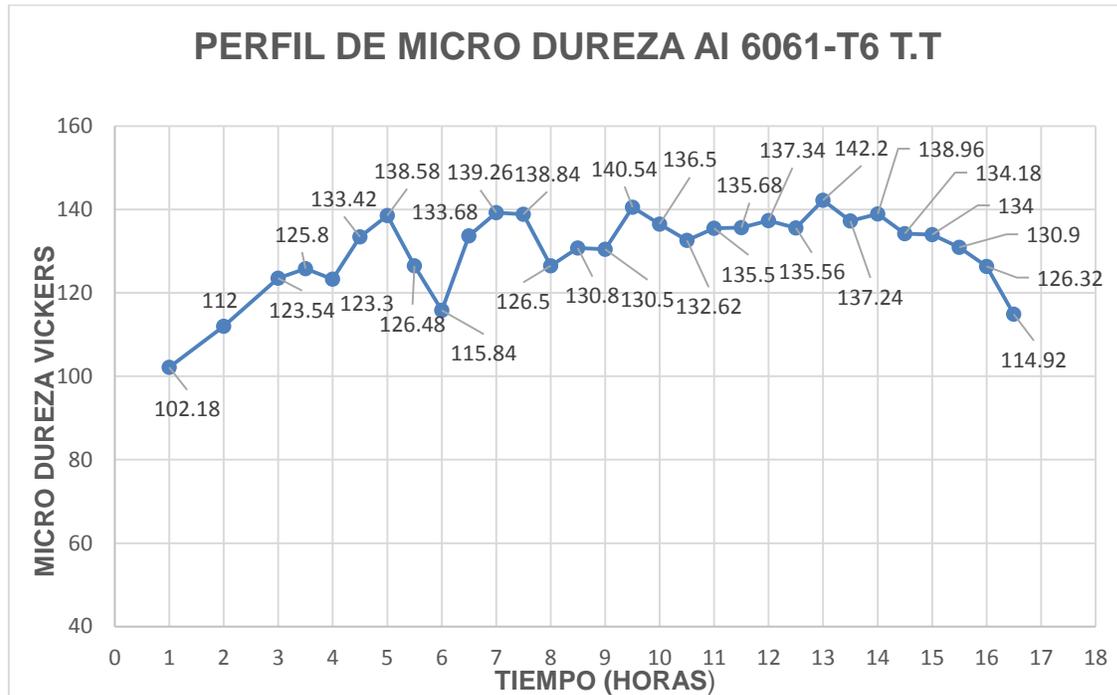


Figura 52. Perfil de Microdureza en la aleación de aluminio 6061-T6.

En base a los resultados de durezas se decidió seleccionar para los casos de tratamientos térmicos antes de la soldadura los siguientes tiempo: 4, 6, 8, 12, 14.5, 15, 16 horas. Mientras que para el caso de tratamiento térmico después de la soldadura se seleccionaron los siguientes tiempos: 6, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5, 15, 15.5, 16.5 horas. Con estas horas y aplicando el proceso de soldadura por fricción con agitación se espera obtener una mejora en la resistencia a la tensión de las ya obtenidas en la aleación de aluminio 6061-T6 sin ningún tipo de tratamiento térmico y la cual fue sometida al mismo proceso de soldadura. En la sección de resultados de tensión, se harán unas observaciones más puntuales sobre los tiempos seleccionados para los tratamientos térmicos.

### 5.1.2. Resultados de microdureza en la soldadura.

Los perfiles de microdureza de las soldaduras se realizaron en la sección transversal de la soldadura para cada caso de estudio, Figura 53. Se distinguen cuatro zonas características de

la soldadura por fricción con agitación, zona de agitación (stir zone), zona afectada termomecánicamente (TMAZ), zona afectada térmicamente (HAZ) y material no afectado (UFM). La microdureza del material base tuvo un valor de 110 HV, mientras que para el caso BMW la microdureza en la zona de agitación obtuvo un valor de 85 HV y para el caso HTBW se obtuvo una microdureza de 109HV, sin embargo para el caso HTAW se obtuvieron valores de microdureza de 134 HV en la zona de agitación, este valor es superior a la propia dureza del material base.

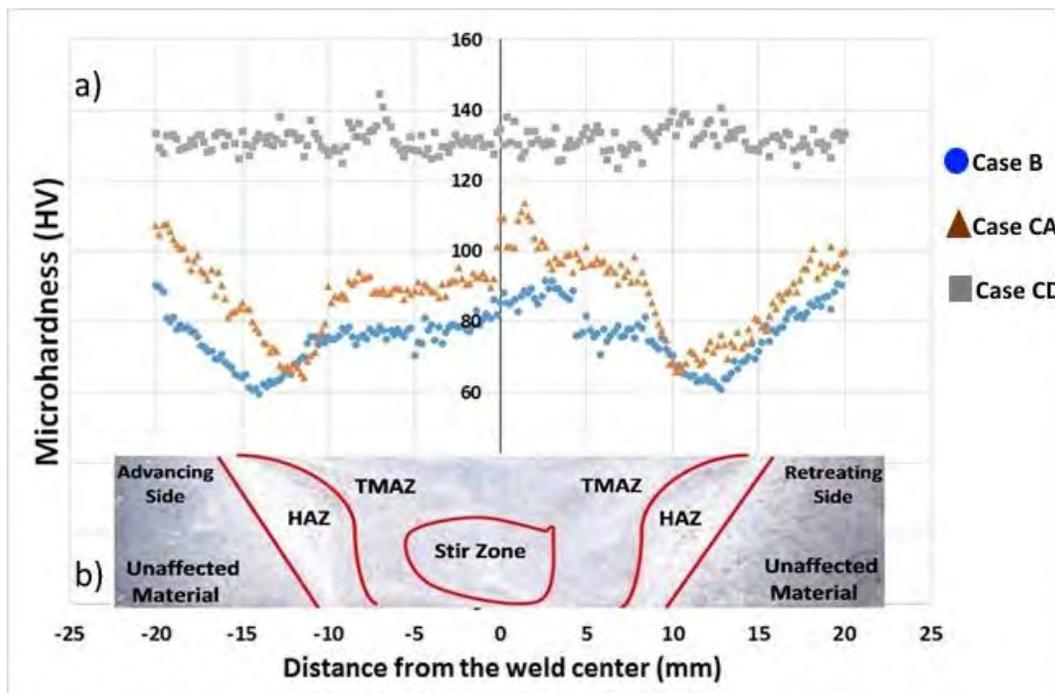


Figura 53. Perfil de microdureza en la soldadura por FSW.

Con los resultados obtenidos se aprecia que la aplicación de tratamientos térmicos antes y después de la soldadura, mejora la dureza del material, esto se debe a que el ciclo térmico que sufre el material al momento de realizar la soldadura, en el caso de estudio CA afecta en menor medida que al material que no ha sido tratado térmicamente (Caso B), mientras que para el caso de estudio CD, el ciclo térmico que pudo sufrir el material durante la soldadura, queda destruido, por los tratamientos térmicos, restableciendo así sus máximas propiedades mecánicas.

## 5.2. Análisis macroestructural en las soldaduras por FSW.

Los procesos de soldadura por fusión presentan una serie de defectos característicos de este proceso, estos defectos ya se encuentran completamente identificados [59, 88], sin embargo el proceso de soldadura por fricción con agitación presenta sus propios defectos característicos, pero a diferencia de los procesos de soldadura por fusión, estos no se encuentran aun totalmente caracterizados. La aparición o no de estos defectos depende de varios factores, entre los que podemos mencionar: Velocidad de rotación de la herramienta, Velocidad de desplazamiento de la soldadura, Fuerza axial aplicada (profundidad de penetración de la herramienta), Angulo de inclinación de la herramienta, Diseño de la herramienta (hombro-pin), Holgura entre las piezas a soldar, Variación del espesor en los materiales a soldar, Óxidos propios del material que quedan atrapados en la zona de agitación de la soldadura [63].

Los resultados que se obtuvieron en las soldaduras con herramientas convencionales, caso de estudio (A), no fueron satisfactorios, esto porque en la unión se presentó un defecto de **tipo túnel** en la sección transversal de las mismas, de igual manera se presentó en la soldadura superficial un par de grietas a lo largo de la unión, este fenómeno se presentó en la gran mayoría de soldaduras, Figura 54 y 55, respectivamente.

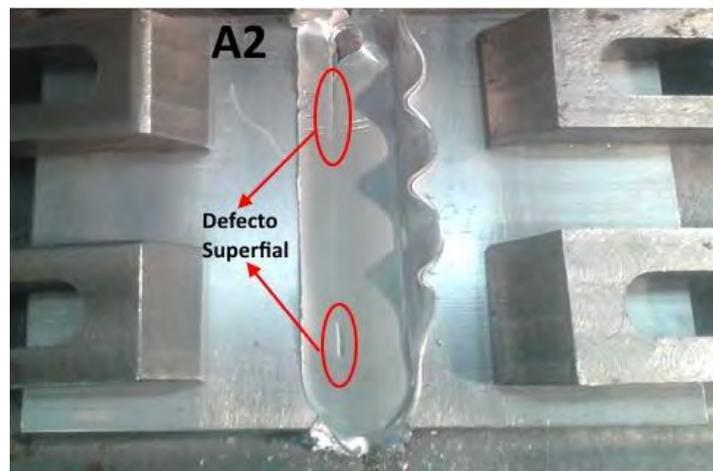


Figura 54. Soldadura superficial para el caso de estudio (A).

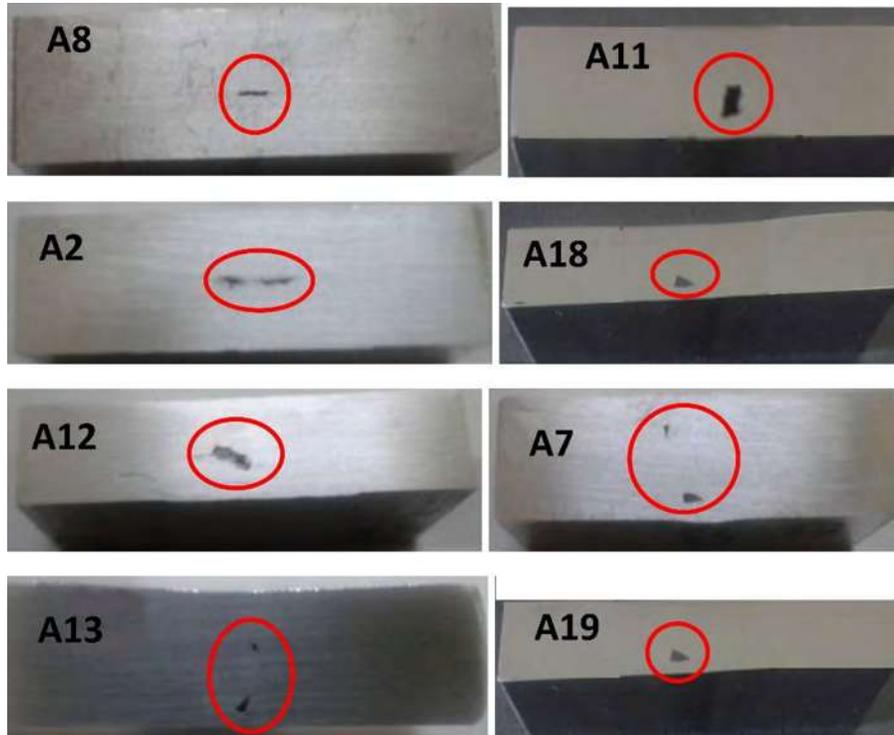


Figura 55. Defectos presentes en el caso de estudio (A).

Como se puede apreciar en la Figura 55, la soldadura presentó en todos los ensayos realizados con las herramientas convencionales un efecto tipo túnel justo en la parte central de la unión, este tipo de defecto se siguió presentado a pesar que se modificaron tanto las geometrías de las herramientas como los parámetros principales del proceso FSW. Este tipo de defecto se presenta debido a la falta de calentamiento de los materiales durante la soldadura, esta falta de calentamiento provoca una menor deformación plástica, ocasionando con esto un flujo lento de material entre las superficies adyacentes dando como resultado una mezcla inadecuada y generando este tipo de defectos.

Por otro lado se obtuvieron resultados satisfactorios con el empleo de herramientas tipo clavo, en todos los ensayos realizados se obtuvieron soldaduras libres de defectos, tanto en la superficie exterior de la soldadura como en la sección transversal de esta, ver las Figuras 56 y 57.

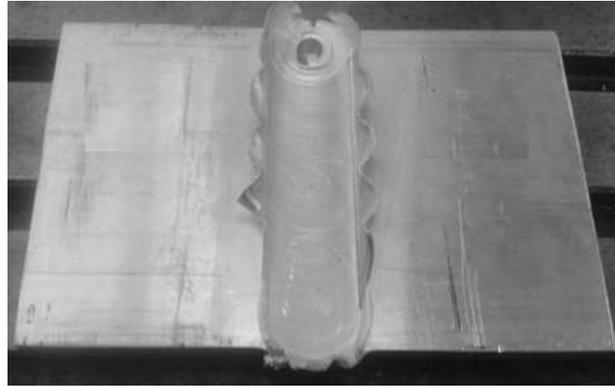


Figura 56. Soldadura superficial para el caso de estudio (B).

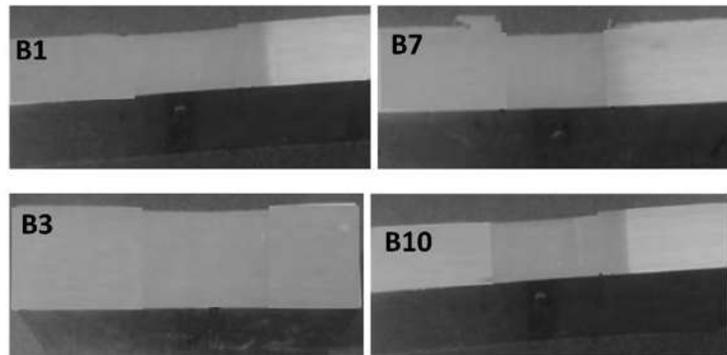


Figura 57. Soldaduras sin defectos para el caso de estudio (B).

De igual manera para los casos de estudio CA y CD (tratamiento térmico antes y después de la soldadura), no se encontraron defectos presentes ni en la soldadura superficial así como tampoco en la sección transversal de la misma, Figura 58.

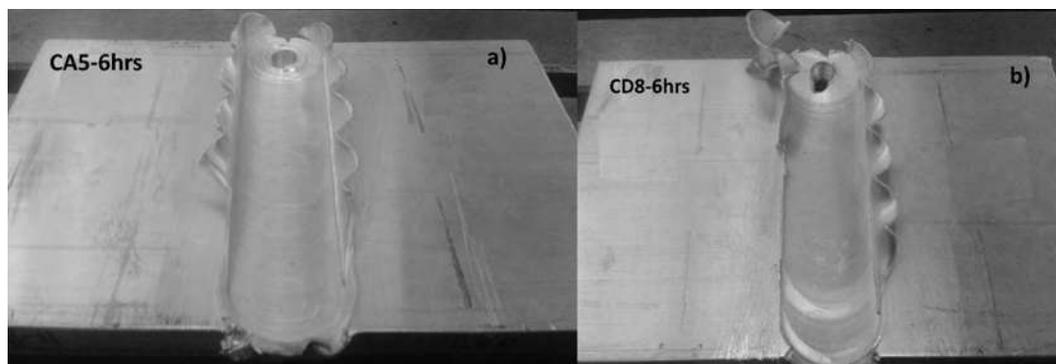


Figura 58. Soldadura superficial para el caso de estudio a) CA y b) CD.

El empleo de la herramienta tipo clavo más que los propios parámetros del proceso para los casos de estudio B, CA y CD, fue el factor primordial para lograr una unión libre de defectos, esto porque la geometría que presenta la herramienta, mejora sustancialmente el calentamiento que ocurre entre las interfaces del material y con esto se aumenta la deformación plástica, dando como resultado un mejor flujo de material en la zona de agitación de la soldadura y logrando una unión totalmente consolidada, esta mejora en el calentamiento se debe a que la herramienta presenta un área mayor de contacto entre los materiales a unir debido a su morfología la cual presenta dos hombros.

### 5.3. Análisis microestructural.

Como ya se mencionó anterior mente la soldadura por fricción con agitación tiene tres zonas características en la unión, la primera de ellas es la zona de agitación (TMAZ), en la cual se encuentra un refinamiento de grano debido al trabajo mecánico que sufre el material debido a la deformación plástica, este refinamiento de grano se ve reflejado en una mayor dureza del material, en la zona afectada térmicamente se presentan granos refinados y granos de gran tamaño, estos cambios en los tamaños de grano es lo que provoca que el material se debilite y tenga una menor dureza, por ultimo encontramos la zona no afectada o material base (BM), en esta zona se distinguen tamaños de granos más grandes y consistentes, que presentan los mismos tamaños y durezas que los de un material sin ningún tipo de soldadura, en las Figuras 59 a 62 Se muestran las microestructura de las distintas zonas de la soldadura.

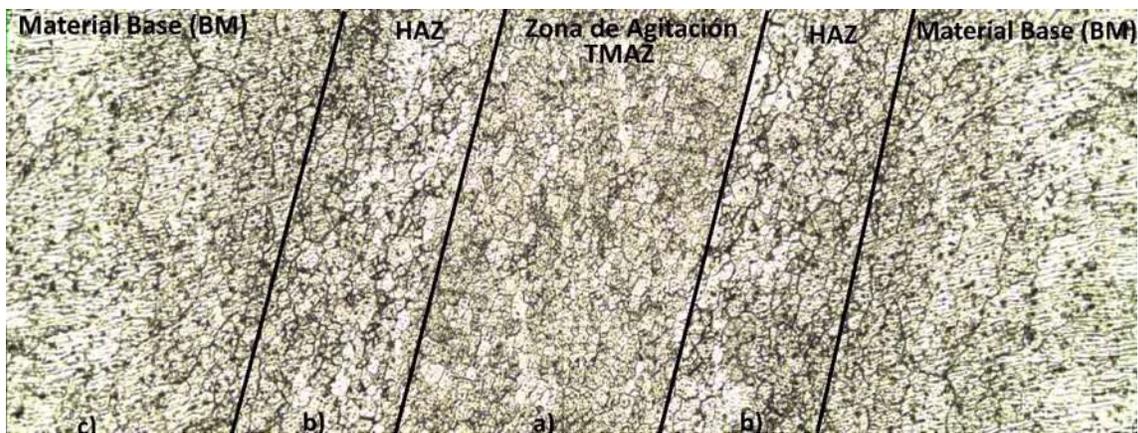


Figura 59. Microestructura en el perfil de soldadura obtenido por FSW, a) TMAZ, b) HAZ y c) BM.



Figura 60. Zona de agitación 100x.

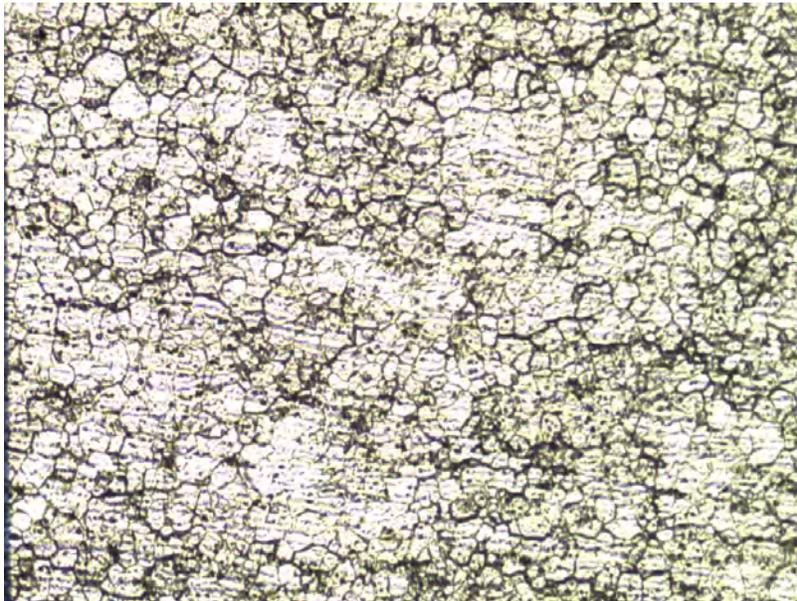


Figura 61. Zona afectada térmicamente (HAZ) 100x.

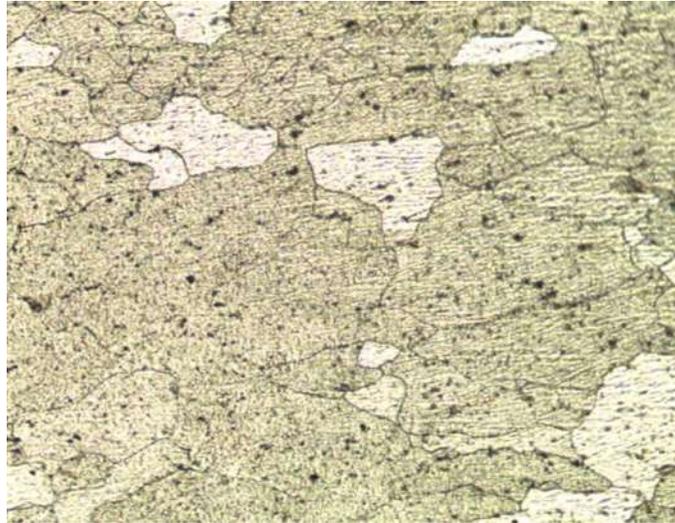


Figura 62. Zona no afectada (BM) 100X.

#### 5.4. Resistencia a la tensión.

Los resultados de tensión obtenidos para el caso de estudio de soldadura por medio de fricción con agitación con herramientas convencionales (caso A), se muestran en la Tabla 20.

| Tabla 20. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio A. |                          |                  |                                     |                  |                                |
|---|--------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Soldadura   | Limite elástico al 0.2 % | Elongación (MPa) | Resistencia ultima de tensión (MPa) | Lado de fractura | Eficiencia de la soldadura (%) |
| A8-2  | 115                      | 5.8              | 140                                 | Centro           | 45.16                          |
| A8-3  | 113                      | 4.7              | 146                                 | Centro           | 47.09                          |
| A8-4  | 118                      | 6.2              | 150                                 | Centro           | 48.38                          |
| A9-2  | 113                      | 7.1              | 128                                 | Centro           | 41.29                          |
| A9-3  | 115                      | 3.8              | 120                                 | Centro           | 38.7                           |
| A9-4  | 121                      | 8.2              | 125                                 | Centro           | 40.32                          |
| A10-2   | 110                      | 3.9              | 108                                 | Centro           | 34.83                          |
| A10-3   | 106                      | 4.0              | 114                                 | Centro           | 36.77                          |
| A10-4   | 108                      | 6.6              | 121                                 | Centro           | 39.03                          |

A pesar de que las uniones en estos casos de estudio presentaban el defecto de túnel, se decidió seleccionar los casos en los cuales este defecto no fuera muy grande, y poder observar que tanto soportan los materiales a pesar de contar con esta limitante, la norma ASTM E8M marca como requerimiento mínimo para considerar una soldadura de aluminio como buena una resistencia última de tensión de 160 MPa, en base a esto se puede apreciar que el defecto como era de esperarse redujo considerablemente la resistencia a la tensión, siendo una unión que no cumple con los requerimientos mínimos establecidos. En las Figuras 63 y 64 Se muestran las zonas de macro fracturas ocurridas en este caso de estudio.



Figura 63. Zona de fractura para el caso de estudio A.

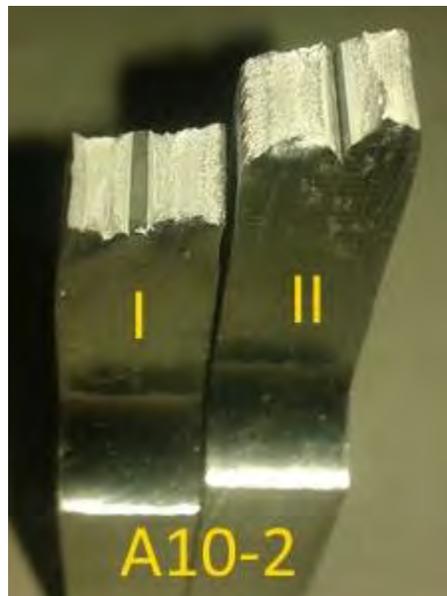


Figura 64. Superficie fractura para el caso de estudio A.

El tipo de fractura ocurrida en estos casos de estudio es del tipo frágil la cual ocurrió al centro de la soldadura, esto es lógico por el defecto de túnel se encontraba en esta misma posición y atraviesa por completo al material, Figura 64, adicionalmente se observa que la fractura no presento una deformación apreciable lo que indica que se dio una propagación rápida de la fractura.

Para los casos de estudio de soldaduras por fricción con agitación con el empleo de la herramienta tipo clavo (caso B), los resultados obtenidos cumplen y superan con los requerimientos establecidos por la norma ASTM-E8M, en la Tabla 21 Se muestran estos resultados.

| Soldadura | Limite elástico al 0.2 % | Elongación (MPa) | Resistencia ultima de tensión (MPa) | Lado de fractura | Eficiencia de la soldadura (%) |
|-----------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| B1-2      | 114                      | 10.2             | 161                                 | Avance           | 51.93                          |
| B1-3      | 108                      | 10.2             | 168                                 | Retirada         | 54.19                          |
| B1-4      | 115                      | 10.8             | 163                                 | Retirada         | 52.58                          |
| B2-2      | 114                      | 10.5             | 176                                 | Avance           | 56.77                          |
| B2-3      | 110                      | 4.8              | 170                                 | Avance           | 54.38                          |
| B2-4      | 124                      | 9.5              | 177                                 | Avance           | 57.96                          |
| B3-2      | 111                      | 11.1             | 162                                 | Avance           | 52.25                          |
| B3-3      | 109                      | 12.3             | 168                                 | Avance           | 54.19                          |
| B3-4      | 111                      | 11.3             | 162                                 | Avance           | 52.25                          |
| B4-2      | 119                      | 8.7              | 161                                 | Retirada         | 51.93                          |
| B4-3      | 116                      | 5.8              | 172                                 | Avance           | 55.48                          |
| B4-4      | 115                      | 9.0              | 176                                 | Avance           | 56.77                          |
| B5-2      | 116                      | 4.3              | 169                                 | Avance           | 54.51                          |
| B5-3      | 115                      | 9.6              | 171                                 | Retirada         | 55.16                          |
| B5-4      | 116                      | 10               | 176                                 | Avance           | 56.77                          |
| B6-2      | 134                      | 8.4              | 188                                 | Retirada         | 60.64                          |

|       |     |      |     |          |       |
|-------|-----|------|-----|----------|-------|
| B6-3  | 131 | 8.4  | 187 | Retirada | 60.32 |
| B6-4  | 132 | 8.7  | 183 | Retirada | 59.03 |
| B7-2  | 127 | 8.5  | 188 | Retirada | 60.64 |
| B7-3  | 125 | 8.2  | 186 | Avance   | 60    |
| B7-4  | 127 | 9.0  | 185 | Avance   | 59.67 |
| B8-2  | 127 | 6.4  | 187 | Avance   | 60.32 |
| B8-3  | 124 | 6.7  | 186 | Avance   | 60    |
| B8-4  | 126 | 6.4  | 184 | Avance   | 59.35 |
| B9-2  | 126 | 4.6  | 168 | Avance   | 54.19 |
| B9-3  | 125 | 6.4  | 187 | Avance   | 60.32 |
| B9-4  | 123 | 7.2  | 186 | Avance   | 60    |
| B10-2 | 111 | 10.4 | 170 | Retirada | 54.83 |
| B10-3 | 112 | 11.2 | 167 | Retirada | 53.87 |
| B10-4 | 112 | 11.0 | 168 | Avance   | 54.19 |

Las fracturas ocurridas en el caso de estudio B, se presentaron fuera de la soldadura, en la zona afectada térmicamente y mayormente del lado de avance de la herramienta, Figuras 65, mientras que en la Figura 66 se muestra una probeta de tensión atacada químicamente, donde se aprecia con más claridad la zona de fallo y la soldadura.

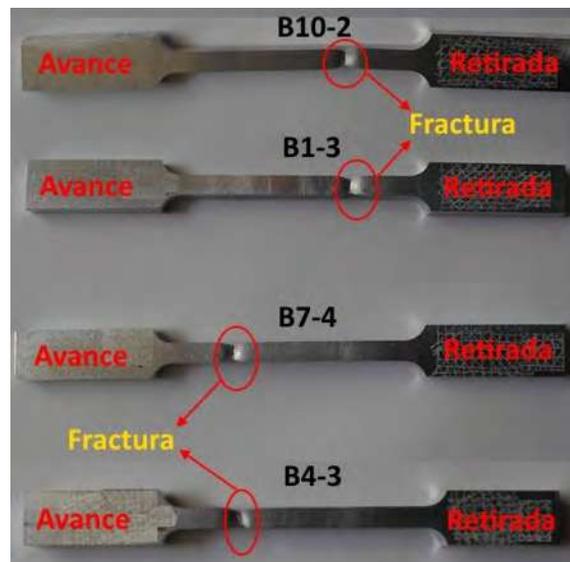


Figura 65. Zona de fractura para el caso de estudio B.

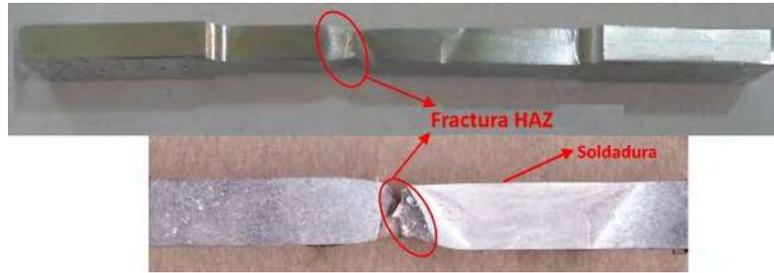


Figura 66. Macrografía de la zona de fractura para el caso de estudio B.

Los resultados de los ensayos de tensión para el caso de estudio B, muestra que todas las probetas tuvieron una fractura dúctil, independientemente del lado en que ocurrió la fractura, porque a diferencia de las fracturas obtenidas para el caso A, estas si presentaron una deformación mayor, presentado la morfología de copa y cono característica para este tipo de fractura, Figura 67.



Figura 67. Superficie fractura para el caso de estudio B.

Para los casos de estudio CA, los resultados de resistencia a la tensión, Tabla 22, cumplen con los requerimientos mínimos marcados por la norma ASTM-E8M y supera los resultados que se obtuvieron para los casos A y B, logrando con esto mejorar las propiedades mecánicas del material mediante la aplicación de tratamientos térmicos, las fracturas ocurrieron mayormente del lado de avance de la herramienta, presentaron un comportamiento de fractura dúctil y la zona de fallo se dio en la zona afectada térmicamente, Figuras 68 y 69.

Tabla 22. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio CA.

| Soldadura | Tiempo de envejecimiento (HRS) | Limite elástico al 0.2 % (MPa) | Elongación (%) | Resistencia última de tensión (MPa) | Lado de fractura | Eficiencia de la soldadura (%) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| CA1-2     | 12                             | 107                            | 11.8           | 142                                 | Retirada         | 45.80                          |
| CA1-3     |                                | 107                            | 5.2            | 142                                 | Retirada         | 45.80                          |
| CA1-4     |                                | 106                            | 17.5           | 142                                 | Avance           | 45.80                          |
| CA2-2     | 15                             | 105                            | 14.6           | 143                                 | Avance           | 46.12                          |
| CA2-3     |                                | 106                            | 14.5           | 144                                 | Avance           | 46.45                          |
| CA2-4     |                                | 106                            | 14.3           | 143                                 | Avance           | 46.12                          |
| CA3-2     | 16                             | 106                            | 15.3           | 147                                 | Avance           | 47.41                          |
| CA3-3     |                                | 105                            | 15.7           | 142                                 | Avance           | 45.80                          |
| CA3-4     |                                | 105                            | 15.0           | 142                                 | Retirada         | 45.80                          |
| CA4-2     | 4                              | 126                            | 9.1            | 184                                 | Avance           | 59.35                          |
| CA4-3     |                                | 140                            | 9.1            | 190                                 | Avance           | 61.29                          |
| CA4-4     |                                | 137                            | 8.5            | 193                                 | Avance           | 62.25                          |
| CA5-2     | 6                              | 140                            | 10.0           | 206                                 | Avance           | 66.45                          |
| CA5-3     |                                | 136                            | 10.1           | 204                                 | Avance           | 65.80                          |
| CA5-4     |                                | 140                            | 10.2           | 203                                 | Avance           | 65.48                          |
| CA6-2     | 8                              | 136                            | 9.7            | 194                                 | Avance           | 62.58                          |
| CA6-3     |                                | 141                            | 9.2            | 192                                 | Retirada         | 61.93                          |
| CA6-4     |                                | 138                            | 9.6            | 195                                 | Retirada         | 62.9                           |
| CA7-2     | 6                              | 125                            | 3.5            | 167                                 | Avance           | 53.87                          |
| CA7-3     |                                | 127                            | 3.3            | 169                                 | Avance           | 54.51                          |
| CA7-4     |                                | 132                            | 4.5            | 169                                 | Avance           | 54.51                          |
| CA8-2     | 14.5                           | 125                            | 4.9            | 178                                 | Avance           | 57.41                          |
| CA8-3     |                                | 125                            | 5.6            | 176                                 | Retirada         | 56.77                          |
| CA8-4     |                                | 126                            | 6.0            | 179                                 | Avance           | 57.74                          |
| CA9-2     | 6                              | 135                            | 3.9            | 200                                 | Retirada         | 64.51                          |
| CA9-3     |                                | 142                            | 4.5            | 201                                 | Avance           | 64.83                          |
| CA9-4     |                                | 135                            | 3.8            | 205                                 | Avance           | 66.12                          |
| CA9-5     |                                | 135                            | 4.6            | 203                                 | Retirada         | 65.48                          |

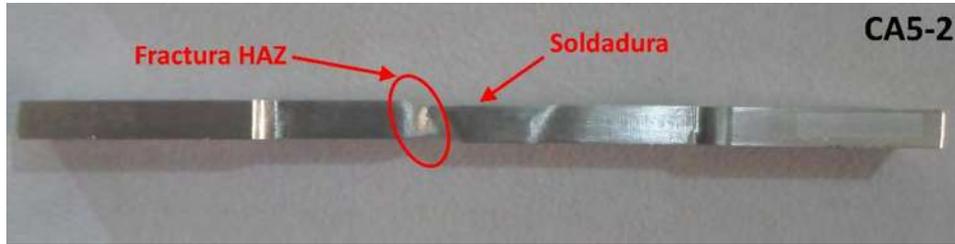


Figura 68. Zona de fractura para el caso de estudio CA.



Figura 69. Superficie fractura para el caso de estudio B.

De los resultados obtenidos se observa que los tratamientos térmicos de 12, 15 y 16 horas dieron resultados por debajo de lo marcado por la norma y de los resultados obtenidos para el caso de estudio B, este decaimiento en las propiedades mecánicas se debe a al fenómeno de sobre envejecimiento que sufre el material al momento de realizar la soldadura. Para el tratamiento térmico de 14.5 horas los resultados de resistencia a la tensión igualan a los obtenidos en el caso de estudio B, estos resultados aunque son buenos no es lo que se esperaba de la aplicación de tratamientos térmicos antes de la soldadura. Para los tiempos de tratamiento térmico de 4 y 8 horas, se mejora la resistencia a la tensión, aumentando la eficiencia de la junta a un 61.50% para el tratamiento térmico de 4 horas, mientras que para el tratamiento térmico de 8 horas se aumentó la eficiencia de unión a 62.27 % en comparación a los materiales sin ningún tipo de tratamiento térmico, caso B, los cuales obtuvieron una eficiencia de unión del 54.48 %. Por ultimo para el caso de tratamiento térmico a 6 horas se observan dos resultados, la soldadura CA7 con una resistencia a la tensión promedio de 168.3 MPa (54.29%), mientras que para las soldadura CA5 y CA9 la resistencia a la tensión promedio obtenida es de 203.14 MPa (65.52%), aunque las tres soldadura se llevaron a la

misma hora de tratamiento térmico y con los mismos parámetros de soldadura, se encuentran dos resultados muy distintos, esto se debe a que para los casos CA5 y CA9, se llevó a cabo el siguiente procedimiento: 1) solubilizado de los materiales, 2) refrigeración de los materiales a 0 °C por un periodo de 24 horas, 3) aplicación del envejecimiento parcial a 6 horas, con 2 horas de diferencia entre la salida de refrigeración y la aplicación del tratamiento, 4) soldadura de los materiales, con una hora de diferencia entre el termino del envejecimiento parcial y la aplicación de la soldadura, 5) pruebas mecánicas. Para el caso CA7 se realizó el siguiente procedimiento: 1) solubilizado de los materiales, 2) refrigeración de los materiales a 0 °C por un periodo de una semana (168 horas), 3) envejecimiento parcial a 6 horas, con 2 horas de diferencia entre la salida de refrigeración y la aplicación del tratamiento 4) soldadura de los materiales, con un día de diferencia entre el termino del envejecimiento parcial y la aplicación de la soldadura, 5) pruebas mecánicas. Estos periodos tan largos de tiempos transcurridos entre tratamientos térmicos y aplicación de la soldadura, son los que provocaron que el aluminio se envejeciera naturalmente a pesar de que se encontrara en refrigeración, este fenómeno de envejecimiento natural es característico en esta aleación de aluminio, es por esta razón que aunque se llevaron bajo los mismos parámetros de soldadura y bajo los mismos tiempos de tratamiento térmico, la resistencia a la tensión obtenida para CA7 registrara valores menores a los obtenidos en las soldaduras CA5 y CA9. Los resultados de resistencia a la tensión obtenidos para el caso de estudio CD se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Resultados de resistencia a la tensión para el caso de estudio CA.

| Soldadura | Tiempo de envejecimiento (HRS) | Limite elástico al 0.2 % (MPa) | Elongación (%) | Resistencia ultima de tensión (MPa) | Lado de fractura | Eficiencia de la soldadura (%) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| CD1-2     | 12.5                           | 237                            | 15.8           | 286                                 | Material Base    | 92.26                          |
| CD1-3     |                                | 238                            | 17.3           | 291                                 | Material Base    | 93.87                          |
| CD2-2     | 13                             | 238                            | 2.1            | 259                                 | Material Base    | 83.55                          |
| CD2-3     |                                | 240                            | 3.0            | 265                                 | Material Base    | 85.48                          |
| CD3-2     | 13.5                           | 234                            | 18.0           | 297                                 | Material Base    | 95.81                          |
| CD3-3     |                                | 257                            | 15.4           | 293                                 | Material Base    | 94.52                          |

|        |      |     |      |     |               |        |
|--------|------|-----|------|-----|---------------|--------|
| CD4-2  | 14.2 | 245 | 18.5 | 297 | Material Base | 95.81  |
| CD4-3  |      | 244 | 18   | 295 | Material Base | 95.16  |
| CD5-2  | 14.5 | 253 | 17.5 | 300 | Material Base | 96.77  |
| CD5-3  |      | 260 | 14.0 | 298 | Material Base | 96.13  |
| CD6-2  | 15   | 242 | 15.8 | 288 | Material Base | 92.90  |
| CD6-3  |      | 243 | 15.6 | 290 | Material Base | 93.55  |
| CD7-2  | 15.5 | 252 | 17.9 | 296 | Material Base | 95.48  |
| CD7-3  |      | 266 | 18.9 | 297 | Material Base | 95.81  |
| CD8-2  | 16   | 250 | 16.3 | 293 | Material Base | 94.52  |
| CD8-3  |      | 241 | 13.5 | 295 | Material Base | 95.16  |
| CD9-2  | 16.5 | 246 | 2.4  | 250 | Material Base | 80.65  |
| CD9-3  |      | 251 | 3.1  | 245 | Material Base | 79.03  |
| CD10-2 | 6    | 305 | 1.0  | 309 | Material Base | 99.68  |
| CD10-3 |      | 279 | 2.8  | 299 | Material Base | 96.45  |
| CD10-4 |      | 302 | 1.2  | 308 | Soldadura     | 99.35  |
| CD11-2 | 6    | 273 | 3.9  | 295 | Material Base | 95.16  |
| CD11-3 |      | 277 | 1.5  | 289 | Material Base | 93.23  |
| CD11-4 |      | 272 | 2.5  | 290 | Material Base | 93.55  |
| CD11-5 |      | 210 | 0.7  | 210 | Soldadura     | 67.74  |
| CD12-2 | 14.5 | 290 | 1.6  | 299 | Material Base | 96.45  |
| CD12-3 |      | 283 | 6.8  | 304 | Material Base | 98.06  |
| CD12-4 |      | 287 | 4.5  | 313 | Material Base | 100.97 |
| BM-1   | ---- | 289 | 14.2 | 309 | ----          | ----   |
| BM-2   | ---- | 296 | 11.5 | 316 | ----          | ----   |
| BM-3   | ---- | 286 | 14.2 | 308 | ----          | ----   |

La aplicación de los tratamientos térmicos de solubilizado y envejecimiento total después de la soldadura, regreso a la aleación de aluminio 6061-T6 a sus propiedades mecánicas originales, eliminando por completo la afectación térmica que ocurre en el proceso de soldadura. En la tabla anterior se observan distintos periodos de tiempos en la aplicación del

tratamiento térmico de envejecimiento total, por un lado tenemos tiempos muy elevados de tratamiento térmico (13 hrs, 13.5 hrs.....16.5 hrs) y otros muy cortos (6 hrs), la selección de tratamientos térmicos arriba de 13 horas se basó en lo reportado en la literatura [36,37,55,56,89], la cual especifica que para aleaciones de aluminio de la serie 6xxx son necesarios elevados periodos de tiempo de tratamiento térmico para conseguir envejecer la aleación y lograr que se obtenga una resistencia mecánica máxima, eliminado con estos periodos de tiempo tan prolongados las afectaciones térmicas que pudo sufrir el material durante la soldadura, sin embargo estos periodos de tiempo son especificados para revertir la afectación térmica en procesos de soldadura tradicionales, no obstante se decidió probar los mismos periodos de tiempo en soldaduras de estado sólido, dando como resultados una eficiencia de soldadura arriba del 90 % en la mayoría de los casos. Mientras que para el tratamiento térmico de envejecimiento total a 6 horas, se observa por los resultados de resistencia a la tensión que el material regreso a sus propiedades mecánicas originales con un tiempo de tratamiento mucho menor, teniendo una eficiencia de soldadura también por arriba del 90 %, exceptuando la soldadura CD11-5 la cual tuvo una eficiencia del 67.74 %. Las fracturas ocurridas en todos los casos sucedieron en el material no afectado térmicamente (material base), sin embargo la soldadura CD10-4 la fractura ocurrió en la soldadura presentando un comportamiento igual a las fracturas ocurridas en el material base, para el caso CD11-5 la fractura ocurrió también en el centro de la unión, pero obteniendo una menor resistencia a la tensión. En la Figura 70, se muestran las fracturas ocurridas para este caso de estudio.

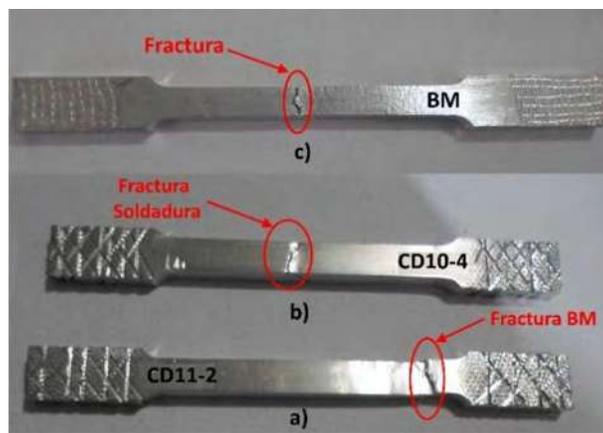


Figura 70. Zona de fractura para el caso de estudio C.

## 5.5. Superficies de fractura.

Las superficies de fractura de las probetas de tensión para los tres casos de estudio y el material base, se analizaron por microscopía electrónica de barrido y EDS, para caracterizar el tipo de fractura y precipitados presentes, Figuras 71 a 74. Los microhuecos presentes en las zonas de fractura para los casos B, CA y CD, es un indicativo de que la falla ocurrió por fractura dúctil, como ya se había mencionado anteriormente. En la Figura 71 se muestra la superficie de fractura del material base, en la cual se observa que los micro huecos presentan tamaños pequeños de cierta profundidad, mientras que para el caso B, Figura 72 y caso CA Figura 73, los micro huecos presenta un tamaño más grande, debido a que los sitios de nucleación son pocos y se encuentran muy espaciados entre ellos, para el caso CD los tamaños de los micro huecos presentan tamaños pequeños y de poca profundidad, esto debido a que hubo numerosos sitios de nucleación y esto origino que los micro huecos que se encontraran juntos se fusionaran e impidieran el crecimiento a un tamaño mayor, Figura 74. La aleación de aluminio 6061-T6, tiene como elementos endurecedores Mg-Si, por consiguiente su precipitado es el formado por  $Mg_2Si$ . Los tratamientos térmicos de solubilizado y envejecimiento parcial, son los encargados de la formación y distribución de los precipitados en el material.

En los análisis por EDS mostrados en las Figuras 71 a 74 se muestran los análisis de la composición química de los precipitados presentes en el material base y los tres casos de estudio (B, CA, CD), observando que para los casos B y CD los precipitados predominantes son el  $Mg_2Si$ , mientras que para el caso CA encontramos hierro y silicio (Fe-Si), en tanto en el material base se encuentra magnesio y titanio (Mg-Ti). La distribución y tamaño de los precipitados, la profundidad de los microhuecos y los elementos que conforman estos, son los causantes de mejorar o reducir las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6, por tales motivos para el caso B se observa que presenta unos precipitados pequeños y con una profundidad mayor en los microhuecos, mientras que para el caso CA se presentan precipitados de gran tamaño pero con una profundidad mucho menor en los microhuecos y finalmente para el caso CD se observa que hay precipitados de un menor tamaño y con muy poca profundidad en los microhuecos.

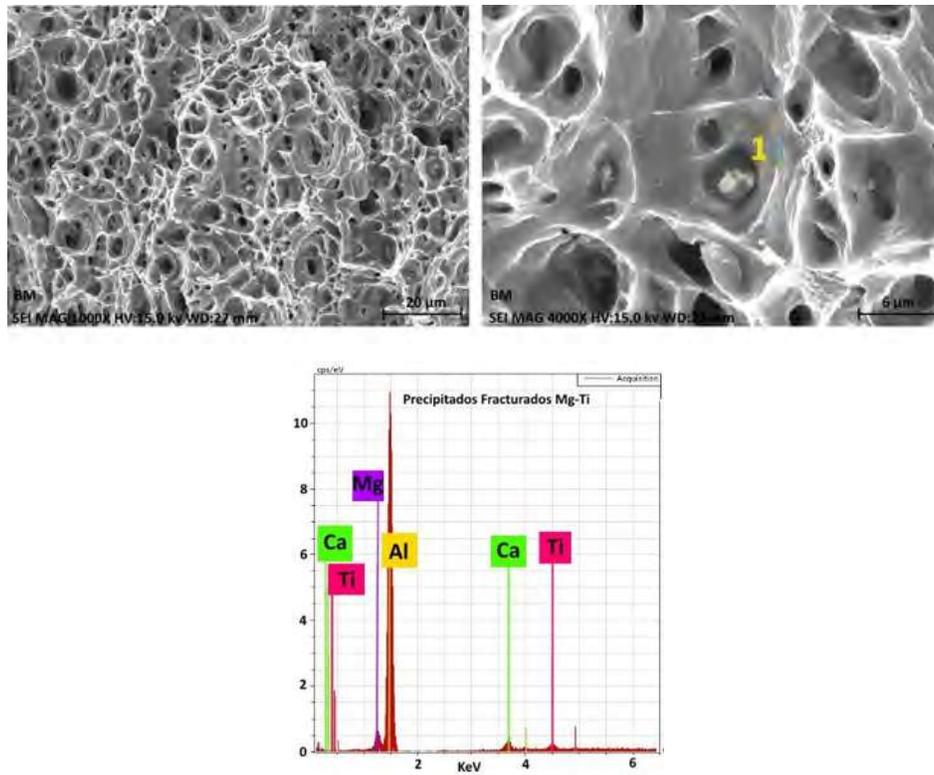


Figura 71. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, en el Material de base.

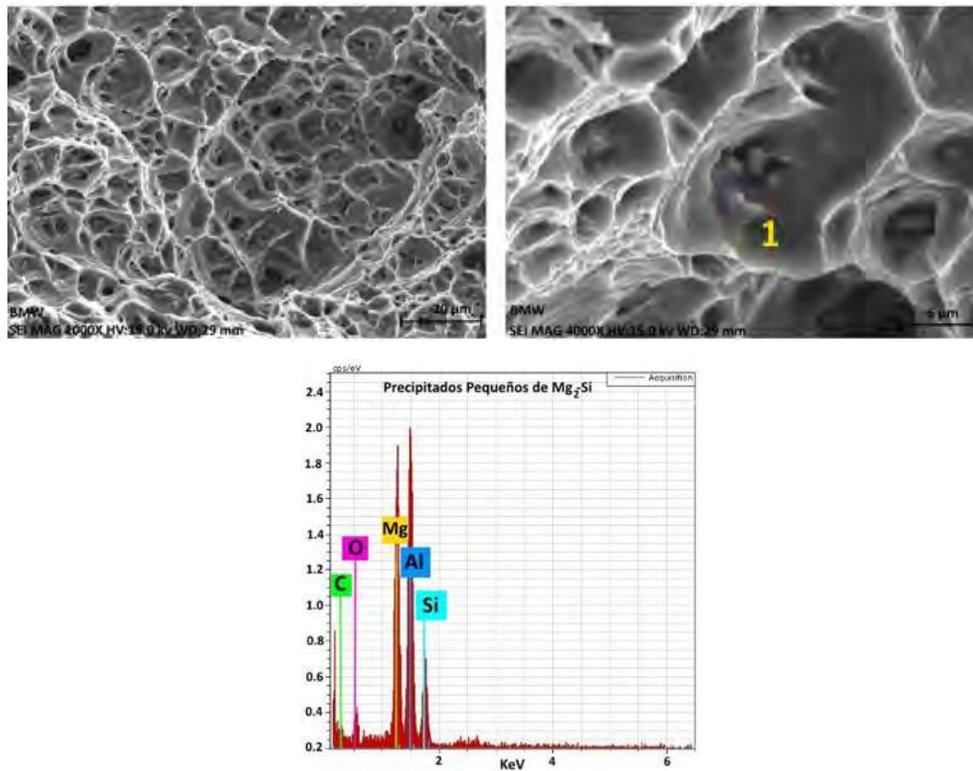


Figura 72. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso B.

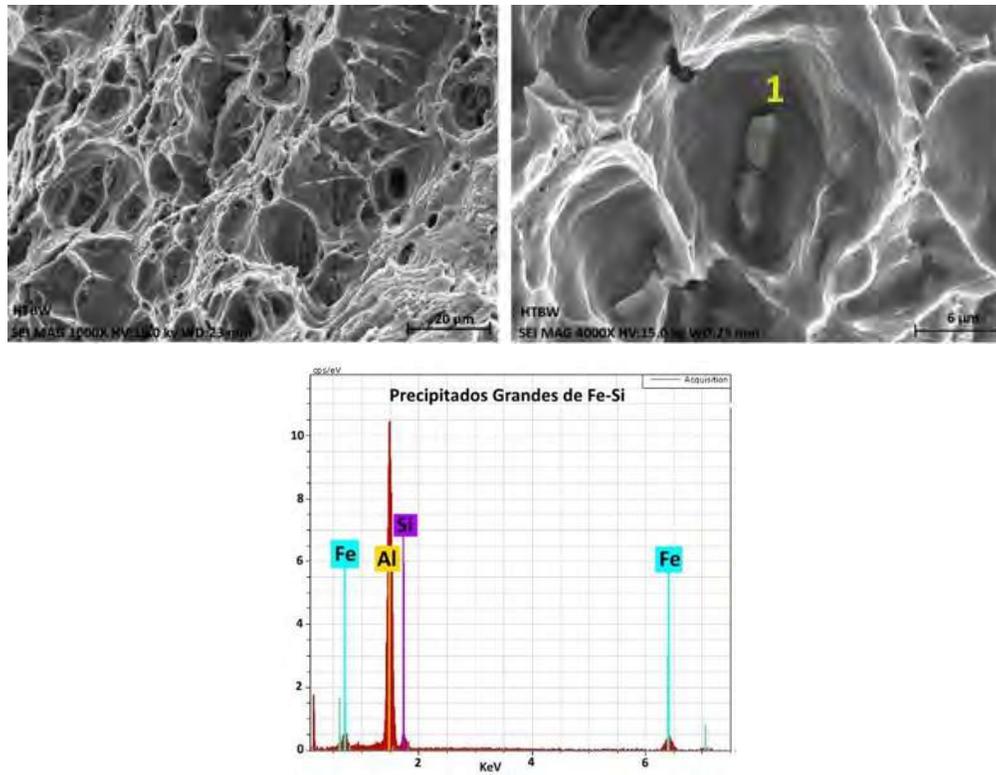


Figura 73. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso CA.

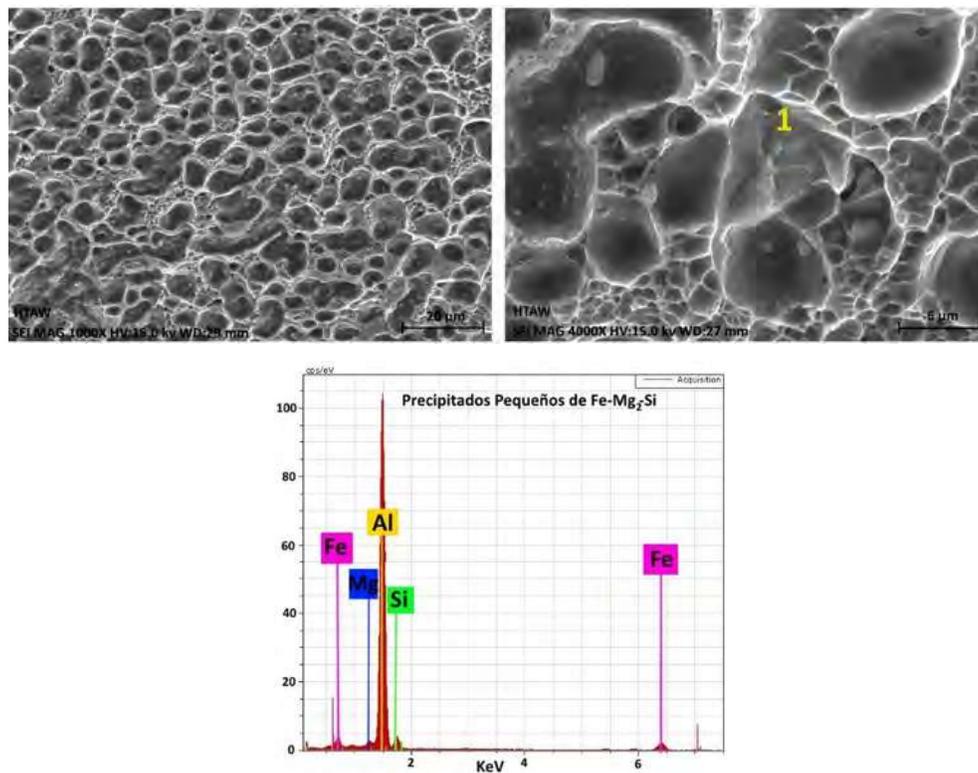


Figura 74. Superficies de fractura de la prueba de tensión y EDS, para el caso CD.

## 5.6. Soldadura por fricción con agitación en polímeros.

Se realizaron en total cinco soldaduras en materiales polímeros, tres en polipropileno y las dos restantes en ABS, cabe resaltar que en este apartado **no se realizaron ningún tipo de pruebas mecánicas**, solo se limitó el estudio aunque corto, a probar los parámetros de soldaduras presentes en el proceso y medir las temperaturas que alcanzan los materiales durante la unión, a pesar que esta temática de soldadura en estado sólido en polímeros está en el tema central de esta tesis, esta investigación solo se limitara a lo antes mencionado y se dejara para una segunda investigación los resultados preliminares que se obtuvieron. Se manufacturaron dos nuevas herramientas, una cilíndrica (modelo M10) y otra cónica (modelo M11), estas nuevas herramientas se tuvieron que maquinar por el cambio de dimensiones de los materiales de estudio, los cuales poseen 80 mm de ancho por 150 mm de largo y 12.7 mm de espesor, siendo este último el importante, porque las herramientas empleadas en la soldadura de aluminio tenían un largo de pin de 9 mm el cual está en función de espesor del material a soldar.

Se partió del estado del arte reportado por Adeel Zafar [36] y en base a esta recopilación se tomaron los datos experimentales para la soldadura del ABS reportados por Nasser Sadeghian [91], esta investigación pone como parámetros óptimos para soldar el ABS, los siguientes: 900 rpm, 6 mm/min, 0° el ángulo de inclinación y el empleo de una herramienta cónica de pin liso y hombro liso, se realizó la soldadura bajo estas condiciones y se obtuvo una unión inadecuada de los materiales, Figura 75, en la cual se aprecia que aunque hubo una unión solida existe una falta de material al centro de la unión.



Figura 75. Soldadura en ABS.

La segunda prueba en ABS, propiamente no fue una soldadura y si no más bien un reforzamiento de material por medio de la deformación plástica, esta técnica es una subdivisión de lo que es la soldadura por fricción con agitación, en la cual no se unen dos materiales si no que solo se cambian las propiedades de un material solido por medio de la deformación plástica, para estas pruebas se usaron los siguientes parámetros: reforzamiento 1, 900 rpm, 6 mm/min, 0° el ángulo de inclinación y el empleo de una herramienta cónica de pin liso y hombro liso, reforzamiento 2, 1400 rpm, 72 mm/min, 0° el ángulo de inclinación y el empleo de una herramienta cónica de pin liso y hombro liso, Figuras 76 y 77.



Figura 76. Reforzamiento de ABS por FSW.



Figura 77. Sección transversal del reforzamiento del ABS.

Como se aprecia en la Figura 77, el reforzamiento 1 presento un abultamiento a todo lo largo del material y se presentó un defecto de tipo túnel, esta problemática se debe a que el hombro de la herramienta no entro en contacto con la superficie del material, provocando un calentamiento inadecuado, por otro lado en el reforzamiento 2 se logró que el material no

presentara ningún tipo de defecto y que a todo lo largo del material se presentara una mezcla bien distribuida, esto es, que no se encontraron zonas en las cuales faltara material (valles) como lo ocurrido en la soldadura de ABS, Figura 75. Para la soldadura se registró una temperatura de 130 °C, mientras que para el reforzamiento se registró una temperatura de 100 °C. Como se mencionó en la parte de pruebas preliminares, se logró la unión del polipropileno, bajo las siguientes condiciones: 650 rpm, 70 mm/min, 0° el ángulo de inclinación y el empleo de una herramienta cuadrada de pin liso y hombro liso, Figura 78. Sin embargo se realizó una segunda soldadura tomando los mismos parámetros empleados en el ABS, 900 rpm, 6 mm/min, 0° el ángulo de inclinación y el empleo de una herramienta cónica de pin liso y hombro liso, estas condiciones dieron como resultado que el material se separara a todo lo largo del avance de la herramienta, Figura 79. La temperatura registrada en la soldadura de polipropileno fue de 80 °C.

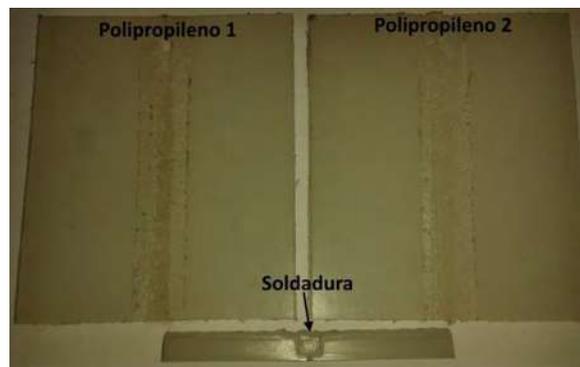


Figura 78. Soldadura de Polipropileno, Pin cuadrado.

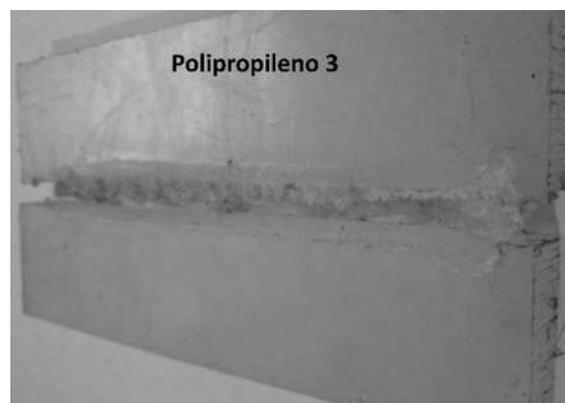


Figura 79. Soldadura Polipropileno, Pin Cónico.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES.

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

1. Fue posible adaptar un centro de maquinado de corte por viruta, para realizar en él un proceso de soldadura por fricción con agitación con buenos resultados.
2. Se implementó el proceso de soldadura por fricción con agitación, dentro de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, logrando esta investigación, ser la primera en realizar una soldadura en estado sólido dentro de la universidad.
3. Los defectos presentes en la aleación de aluminio 6061-T6, se deben a una falta de calor generado durante la soldadura (caso A), esta falta de calor provoca que no se genere una deformación plástica adecuada, impidiendo con esto un flujo de material entre las superficies a unir.
4. El diseño de la herramienta M6, mejora sustancialmente la generación de calor y la deformación plástica ocurrida en los materiales a unir, logrando con esto una soldadura libre de defectos.
5. Mediante la utilización de la herramienta modelo M6 y las condiciones de ensayo C4, es posible realizar una soldadura por fricción con agitación, en una aleación de aluminio 6061-T6 de 9.5 mm de espesor, que cumpla con los requerimientos mínimos establecidos por la norma ASTM-E8M, y que a de más que esté libre de defectos (caso B).
6. Por medio de la aplicación de dos tratamientos térmicos, solubilizado y envejecimiento parcial, antes de la soldadura (caso CA), se mejoran los resultados obtenidos para el caso B, esta mejora se ve reflejada en un aumento del 10% en resistencia a la tensión y una eficiencia de unión del 64%.

7. La aplicación de los tratamientos térmicos de solubilizado y envejecimiento total, después de la soldadura, regresa al material a sus máximas propiedades mecánicas, aumentando la resistencia a la tensión hasta 298 MPa, estando solo 12 MPa por debajo del material base y logrando una eficiencia de unión de un 96%.
8. Con un tiempo de envejecimiento de 6 horas, antes y después de la soldadura por fricción con agitación, fue posible mejorar las propiedades mecánicas de dureza y resistencia a la tensión en la aleación de aluminio 6061-T6, logrando con esto un ahorro significativo de energía aportada durante el tratamiento térmico de envejecimiento, siendo que los tiempos de envejecimiento normalmente se encuentran en el rango de 12 a 16 horas.
9. La utilización de un pin cuadrado, una velocidad de rotación de 650 rpm, una velocidad de avance de 70 mm/min, logra la soldadura en el polipropileno.
10. No fue posible unir el plástico ABS con el empleo de un pin cónico, velocidades de rotación de 900 rpm y velocidad de avance de 6 mm/min, esto debido a que la velocidad de avance fue muy lenta lo cual provocó que el material se deformara excesivamente.
11. Es posible mejorar a un más los resultados obtenidos en los tres casos de estudio (B, CA, CD), por medio de la combinación de distintas velocidades de giro y avance, distintas a las utilizadas en esta investigación.

## CAPÍTULO 7. TRABAJO FUTURO Y RECOMENDACIONES.

La soldadura por fricción con agitación, como ya se ha explicado en un proceso de soldadura que esta día a día desplazando a los métodos tradicionales de soldadura, esto se debe a que es un proceso de soldadura amigable con el medio ambiente y proporciona a los materiales unidos iguales o mejores características que los procesos de soldadura por fusión. Otra característica que hace a este proceso de soldadura en estado sólido mejor que los procesos tradicionales, es la posibilidad de unir materiales que por métodos de fusión no se podría lograr, unir materiales totalmente distintos entre sí, como podría ser un material metálico con un material polímero.

Bajo esta premisa, en esta investigación se comenzó al igual que en los plásticos con la unión de materiales disímiles aluminio-polipropileno, es por esto que se presenta en este capítulo los resultados preliminares que se obtuvieron en de esta unión disímil y los cuales abren la posibilidad de seguir investigando esta área de oportunidad en una futura investigación dentro de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, siendo que la unión de materiales disímiles es un tema de suma importancia en la vida moderna industrial.

Las técnicas para unir diferentes materiales que cuenten con peso ligero, se está convirtiendo en una necesidad muy importante dentro de las aplicaciones de ingeniería. La reciente tendencia de reducir peso en las industrias aeroespacial y automotriz ha llevado a una mayor exploración de los métodos de unión entre materiales metálicos ligeros y materiales polímeros, con el objetivo de optimizar las estructuras y reducir el consumo de combustibles y los costos de fabricación.

Es necesario investigar todos los métodos posibles de unión entre materiales disímiles, para lograr un balance entre unión, costo de unión y resistencia de la unión. Dentro de los métodos utilizados para unir un material metálico y un material polímero, podemos citar: unión por adhesivos, unión laser, unión mecánica, unión por ultrasonido y unión por *soldadura en estado sólido*, de estas cinco opciones con las que cuentan las industrias, se puede decir que la menos eficiente es la unión por medios mecánicos, la más costosa es la unión por láser y

ultrasonido, la unión por medios adhesivos es la la más empleada pero se degrada con el tiempo, por último se deja a la unión por estado sólido como un camino viable para solucionar el problema de unir dos materiales completamente distintos como lo son un metal y un polímero, desde el punto de vista de resistencia en la unión y costo de implementación, en la Figura 80 se muestra un ejemplo de los materiales empleados para la fabricación de un automóvil y con este ejemplo se reafirmar la necesidad de encontrar un método adecuado para unir los distintos materiales utilizados en los procesos de manufactura moderna.

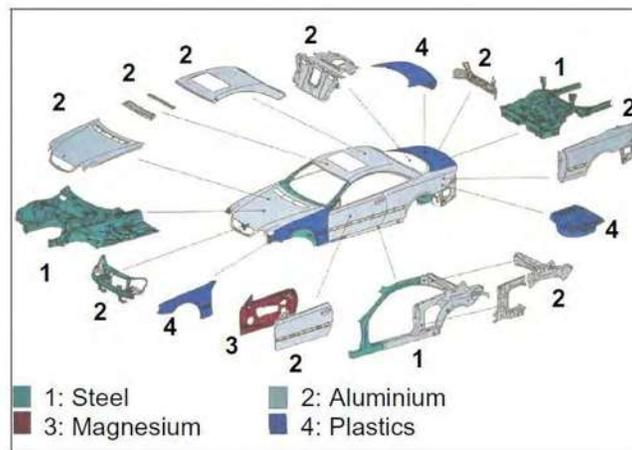


Figura 80. Materiales empleados en la construcción de un automóvil.

Como ya se explicó brevemente, la necesidad de encontrar un método de unión de materiales disimiles es un reto que ha surgido recientemente en todas las industrias de punta.

Para tales fines se seleccionó una aleación de aluminio 6061-T6 y un polímero denominado polipropileno, la selección de estos dos materiales es en base al amplio grado de aplicación que tienen los dos dentro de las distintas industrias. La unión de ambos materiales se realizó por medio de una unión a tope de dos placas de 9.5 mm de espesor de ambos materiales sin limpieza de las superficies. Se realizaron cuatro uniones de estos dos materiales, en la Tabla 24 se enlistan las condiciones bajo las cuales se realizaron las uniones.

| Tabla 24. Parámetros de soldadura para la unión de aluminio-polipropileno. |                         |                              |                                   |                                    |                       |
|--|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Unión Al-polipro   | Velocidad de giro (rpm) | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de penetración (mm/min) | Tiempo de sostenimiento (segundos) | Modelo de herramienta |
| D-1  | 800                     | 40                           | 3                                 | 10                                 | M4                    |
| D-2  | 800                     | 40                           | 3                                 | 20                                 | M6                    |
| D-3  | 1000                    | 90                           | 9                                 | 30                                 | M3                    |
| D-4  | 650                     | 70                           | 6                                 | 5                                  | M2                    |

De las cuatro uniones que se realizaron entre estos dos materiales solo la unión D-4 fue la que pudo lograr la unión parcial del aluminio con el polipropileno, fue una unión parcial por el hecho de que ambos materiales no se mezclaron adecuadamente, siendo más específicos el aluminio no se unió de forma adecuada con el polipropileno quedando esta interfaz muy quebradiza, mientras que en la parte del polipropileno la unión que se dio fue lo suficiente rígida para soportar una separación, las uniones restantes no se concretaron debido a problemas que se presentaron con las herramientas, en la Tabla 25 se enlistan los problemas presentes en las uniones y en las Figuras 81 a 84 se presentan las distintas pruebas de unión logradas.

Se puede concluir hasta este momento que la unión de un material metálico como lo es el aluminio y un material polímero es viable desde el punto de vista de unión por el proceso de soldadura por fricción con agitación, siendo que aún falta más investigación para encontrar las condiciones y herramientas adecuadas para lograr una unión adecuada o para descartar de forma definitiva la unión de estos dos materiales. La unión parcial que se consiguió de estos dos materiales abre la posibilidad de implementar este proceso de unión en un sinnúmero de materiales disímiles que no se han podido unir por los métodos antes mencionados o que se han unido de forma poco eficiente, pero aún falta mucha investigación en esta área de unión de materiales.

Tabla 25.- Problemas durante la unión de aluminio y polipropileno.

| Unión | Problemas durante la unión                                  | Características de la unión   |
|-------|---|---|
| D-1   | Nula mezcla de materiales.<br>La herramienta se rompió.     | No se logró ningún tipo de unión.   |
| D-2   | Vibración excesiva del equipo.<br>La herramienta se rompió. | La unión logro una mezcla de aluminio y polipropileno, pero no logro mantener ambos materiales juntos.                            |
| D-3   | Excesivo calentamiento.<br>La herramienta se deformato.     | No se logró ningún tipo de unión.   |
| D-4   | No se presentó ningún problema durante la unión.            | La unión presenta una mezcla de aluminio y polipropileno distribuida, logrando mantener ambos materiales juntos de forma parcial. |



Figura 81. Unión D-1.



Figura 82. Unión D-2



Figura 83. Unión D-3.



Figura 84. Unión D-4.

Las recomendaciones para un trabajo futuro son las siguientes:

1. Se tiene que mejorar los elementos de sujeción, para que ahora se tenga también un modo de sujetar lateralmente los materiales y con esto evitar que se abran al momento de realizar la unión.
2. Para la unión de plásticos se recomienda en base a los equipos con los que cuenta la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que a velocidades altas de rotación (en el rango de 900 a 1500 rpm) se tenga una velocidad de avance de soldadura tal que realice la soldadura en un minuto, esta velocidad de avance se calculara en base a la longitud del material a unir, mientras que para velocidades bajas ( en el rango de 300 a 850 rpm) se recomienda que la soldadura se realice en máximo dos minutos.
3. Para realizar la unión disímil aluminio-polímero, se recomienda que el polímero tenga un punto de fusión igual o mayor de 250 ° C, de no ser así se corre el riesgo que este se comience a plastificar mucho antes que la aleación de aluminio.
4. Es viable el estudio de reforzamiento de materiales por medio del método de fricción con agitación, siendo un área de mucho interés en la industria.
5. Se recomienda que la soldadura de materiales metálicos, polímeros y disímil sea evaluada en condiciones de fatiga convencional o ultrasónica, debido a que a un no se investiga lo suficiente en este apartado.
6. Se pueden mejorar las uniones de de materiales metálicos, polímeros y disímil, mediante la implementación de una geometría del pin-roscada, que provoque que el material plastificado reduzca su desbordamiento en el lado de retirada de la soldadura.
7. Se recomienda manufacturar un elemento que permita a los equipos CNC poder realizar soldaduras por fricción con agitación con algún grado de inclinación en la herramienta, esto porque es un parámetro que no se ha tomado en cuenta y el cual también es fundamental para obtener mejores propiedades mecánicas en los materiales a unir.
8. Implementar un sistema de medición de fuerza aplicada durante el proceso por medio de celdas de carga acopladas en la placa de respaldo.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] P. Prakash, S.K. Jha, S.P. Lal, A study of process parameters of friction stir welded aa 6061 aluminum alloy, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* 2 (2013) 2034–2309.
- [2] R.M. Indira, R.N. Marpu, K.A.C. S, A study of process parameters of friction stir welded AA 6061 aluminum alloy in o and t6 conditions, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 6 (2011) 61–66.
- [3] P. P., P.C.A.R. D, Effect of tool pin profiles and heat treatment process in the friction stir welding of AA 6061 aluminium alloy, *Am. J. Eng. Res.* 2 (2013) 7–15.
- [4] J. Shude, X. Jingwei, Y. Yumei, Z.L. Ma Yinan, G. Shuangsheng, Design of Friction Stir Welding Tool for Avoiding Root Flaws, *Materials (Basel).* 6 (2013) 5870–5877.
- [5] M.J. J., M.H. Tolephih, M.A. M, Effect of friction stir welding parameters (rotation and transverse) speed on the transient temperature distribution in friction stir welding of AA 7020-T53, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 7 (2012) 436.
- [6] Z. Z., M.Z.. Xiao B.L., Enhancing mechanical properties of friction stir welded 2219Al-T6 joints at high welding speed through water cooling and post-welding artificial ageing, *Mater. Charact.* 106 (2015) 255–265.
- [7] G. Çam, S. Mistikoglu, Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys, *J. Mater. Eng. Perform.* 23 (2014) 1936–1953.
- [8] A. Heinz, A. Haszler, S.M. C. Keidel, R. Benedictus, W.S. Miller, Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, *Mater. Sci. Eng.* 280(1). 102-107. 280 (2000) 102–107.

- [9] W.. Millera, L. Zhuanga, J. Bottemaa, A.J. Wittebrooda, P. De Smetb, A. Haszlerc, A.Vierggec, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Mater. Sci. Eng.* 280 (2000) 37–49.
- [10] T. Dursun, C. Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Mater. Des.* 56 (2014) 862–871.
- [11] S. Jannet, P.K. Mathews, R. Raja, Comparative investigation of friction stir welding and fusion welding of 6061-T6 and 5083-O aluminum alloy based on mechanical properties and microstructure, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 6 (2013) 181–186.
- [12] Y. BAI, H. GAO, LinWU, Zhao-huiMA, N. CAO, Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 20 (2010) 1392–1396.
- [13] G. Singh, A.S. Kang, K. Singh, J. Singh, Experimental comparison of friction stir welding process and TIG welding process for 6082-T6 Aluminium alloy, *Mater. Today Proc.* 4 (2017) 3590–3600.
- [14] H. Bang, H. Bang, H. Song, S. Joo, Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy/Ti–6%Al–4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding, *Mater. Des.* 51 (2013) 544–551.
- [15] W. Klas, *Welding Processes Handbook*, Second Edition, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2012.
- [16] M. Ericsson, R. Sandström. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG, Received 4 March 002; received in revised form 14 June 2002; accepted 1 July 2002.

[17] C.M. Chen, R. Kovacevic \*, Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1319–1326, Received 12 May 2003; accepted 10 June 2003.

[18] Yahya Bozkurt, Hüseyin Uzun, Serdar Salman, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p–T4 composite, *Journal of Composite Materials*, 45(2004) 2237-2245.

[19] Vijay Soundararajan, Srdja Zekovic, Radovan Kovacevic, Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1577–1587, Received 5 January 2005; accepted 15 February 2005, Available online 21 April 2005.

[20] Md. Aleem Pasha<sup>1</sup>, Dr. P. Ravinder Reddy, Dr. P. Laxminarayana and Dr. Ishtiaq Ahmad Kha, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Friction Stir Welded Joint of Aluminium Alloy 6061, All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference. (2006).

[21] P. Cavaliere<sup>a</sup>, R. Nobile<sup>a</sup>, F.W. Panella<sup>a</sup>, A. Squillace. Mechanical and micro structural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2006) 588–594.

[22] P.M.G.P. Moreira<sup>a</sup>, T. Santos, S.M.O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P.M.S.T. de Castro, Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials and Design*. 30 (2009) 180–187.

[23] Sandra Zimmer & Laurent Langlois & Julien Laye & Regis Bigot. Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque, Springer Verlag London Limited 2009, Received: 22 January 2009 / Accepted: 22 June 2009 / Published online: 21 July 2009.

[24] Yasunari Tozaki, Yoshihiko Uematsu, Keiro Tokaji, Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007) 2230-2236.

[25] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints, *Materials & Design*. 32(2011) 2878-2890.

[26] Diogo Mariano, Pedro Neto, Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 65(2013) 115-126.

[27] J.F. Guo, H.C. Chen, C.N. Sun, G. Bi, Z. Sun, J. Wei, Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, *Materials & Design*. 56(2013) 185-192.

[28] H.J. Liua, J.C. Houab, H. Guoa, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Materials & Design*. 50(2014) 872-878.

[29] Rajesh V, Subramanian. C, Analysis of Micro structural Grain Size and Temperature Distribution in Aluminum Alloy 6061 Using Friction Stir Welding , *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* . 4(2015) 334-337.

[30] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints, *Materials Characterization*. 59 (2016) 1168– 1177.

[31] Vikas Sharma, Chaitanya Sharma, Vikas Upadhyay\*, Shailendra Singh, Enhancing mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Si-Mg alloy through post weld heat treatments, *Materials Today: Proceedings*. 4(2017) 628–636.

[32] Zafar A., Awang M., Khan S.R. (2017) Friction Stir Welding of Polymers: An Overview. In: Awang M. (eds) 2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.

[32] James K. Wessel, Handbook of Advanced Materials, 1<sup>st</sup> edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, United States of America, 2004.

[33] Aluminum Association, Aluminum Brazing Handbook, Aluminum Association, Washington, DC, 1990.

[34] Aluminum Association and Aluminum Extrusion Council, The Aluminum Extrusion Manual, Aluminum Association and Aluminum Extrusion Council, Washington, DC, 1998.

[35] Larry Horath, Fundamentals Materials Science for Technologist, Second Edition, Waveland Press, Inc, United States of America, 2017.

[36] Myer Kutz, Handbook of Materials Selection, 1<sup>st</sup> Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, United States of America, 2002.

[37] American Society for Testing and Materials, Vol. 02.02 Aluminum and Magnesium Alloys, ASTM, Conshohoken, PA, 1999.

[38] J. B. Bralla, Design for manufacturability handbook, McGraw hill handbooks, 2nd Edition, New York, 2008.

[39] M. J. Troughton, Handbook of plastics joining, William andrew Inc, 2nd Edition, New York, 2010.

[40] John Norrish, Advanced welding processes, Woodhead Publishing, 2nd Edition, Cambridge, England, 2006.

[41] Chaudhary Kailash, A Review on Advance Welding Processes, International Journal of Engineering and Technique. 3(2017) 86-96.

[42] Howard B. Cary, Modern Welding Technology, 4<sup>th</sup> Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.

[43] Mikell P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4<sup>th</sup> Edition, A John Wiley & Sons, Inc., New York, 2010.

[44] Kalpakjian, Manufacturing Engineering and Technology, 5<sup>th</sup> Edition, Prentice Hall, New York, 2001.

[45] Sercer Mladen, Raos Pero, Joining of Plastics and Composites, Welding Engineering and Technology, Encyclopedia of Life Support, 2016.

[ 46] Osswald T.A., Baur E., Brinkmann S., Oberbach K., Schmachtenberg E., International Plastics Handbook, Hanser Publishers, Munich, 2006.

[47] Rotheiser J, Joining of Plastics.,Hanser Publishers, Munich, 2004.

[48] Jordan Rotheiser, Joining of Plastics Handbook for Designers and Engineers, 3rd Edition, Hanser Publishers, Munich, 2013.

[49] Charles A. Harpe, Modern Plastics Handbook, 1<sup>st</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, 2000.

[50] Berins, Michael L., Plastics Engineering Handbook, 5th Edition, The Society of the Plastics Industry, Inc., Chapman & Hall, New York, 1991.

[51] Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets, Materials & Design, 35(2012):440–445.

[52] Paoletti A, Lambiase F, Di Ilio A., Analysis of forces and temperatures in friction spot stir welding of thermoplastic polymers, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(2016) 1395–1407.

[53] Kiss Z, Czigány T, Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Polytech Mechanical Engineering*, 51 (2007) 15–18.

[54] Husain IM, Mechanical properties of friction-stir-welded polyamide sheets, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(2015) 1–8.

[55] B.C. R, Principles of Heat Treating of Nonferrous Alloys, in: S.M. Copley, E.L. Langer (Eds.), *ASM Handb. Vol. 4, Heat Treat.*, 9th Editio, ASM International, Ohio, United States, 1991: pp. 1826–1959.

[56] Totten George E., MacKenzie D. Scott, *Handbook of Aluminum*, 1<sup>st</sup> Edition, Marcel Dekker, inc., New York, 2003.

[57] Zolotarevsky Vadim S., Belov Nikolai A., Glazoff Michael V., *Casting Aluminum Alloys*, 1st Editio, Elsevier Science, Amsterdam, 2007.

[58] *Aluminum Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio. 1967,p. 530

[59] G. Mathers, *The Welding of Aluminium and Alloys*, 1st Editio, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2002.

[60] I.N. Fridlyander, *Physical Metallurgy of Aluminum and Its Alloys*, Moscow, 1983, p. 287.

[61] J.L. Bradt, *Properties of Pure Aluminum*, *Aluminum*, Vol. 1, Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams, ASM, 1967, P. 2.

[62] R.S.Mishra, Z.Y.Ma, Friction stir welding and processing, Mater. Sci. Eng. 50 (2005) 1–78.

[63] Lohwasser Daniela, Chen Zhan, Friction stir welding: From basics to applications, 1<sup>st</sup> Edition, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2010.

[64] Cooke, G. ‘Robotic Friction Stir Welding’, Industrial Robot, Vol 33(1) 2004, pp. 55–63.

[65] Mikael Soron ESAB AB, Welding equipment, Sweden mikael.soron@esab.se Friction stir welding of high-strength aluminium alloys using an industrial robot system: A feasibility study; 2008 FSW International Symposium, Japan.

[66] Marie, F., Development of the bobbin tool technique on various aluminum alloys, 5th International FSW Symposium, Metz, France, 14–16 September 2004.

[67] Subramanian, P.R., Bewlay, B.P., Helder, E.C. and Trapp, T.J., Apparatus and method for friction stir welding of high strength materials, and articles made therefrom, US Patent Application 2004/0238599, 2 December 2004.

[68] Ningbo Jinfeng Welding&Cutting Co., Ltd, 1987, Lunes 6 de Febrero 2018, <http://www.jinfeng-weldcut.com/en/>.

[69] Aerospace Technology, 2018, Lunes 6 de Febrero 2018, <https://www.aerospace-technology.com/mediapacks/>.

[70] Talwar, R., Bolser, D., Lederich, R.J. and Baumann, J., Friction stir welding of airframe structures, 2nd International FSW Symposium, gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000.

[71] Colligan, K.J., Xu, J. and Pickens, J.R., Welding tool and process parameter effects in friction stir welding of aluminum alloys, Friction Stir Welding and Processing II, Jata, K.V., Mahoney, M.W., Lienert, T.J. and Mishra, R.S., editors, TMS, 181–190, 2003.

[72] Colligan, K.J. and Mishra, R.S., A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum, Scripta Materialia, 58 (2008), 327–331.

[73] Zettler, R., Iomolino, S., dos Santos, J., Donath, T., Beckmann, F., Lippman, T. and Iohwasser, D., Effect of tool geometry and process parameters on material flow in FSW of an AA 2024-T351 alloy, 5th International FSW Symposium, Metz, France, September 14–16, 2004.

[74] Thomas, W.M., Threadgill, P.L. and Nicholas, E.D., Feasibility of friction stir welding steel, Science and Technology of Welding and Joining, 4(1999) 365–372.

[75] Russell, M.J., Threadgill, P.L. and Horrex, n.l., “Recent developments in the stationary shoulder FSW of Ti alloys,” 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan, May 2008, 20–22.

[76] Rai R. R., A. De, Bhadeshia H. K. D. H., DebRoy T., Tools for Friction Stir Welding, Science and Technology of Welding and Joining, 16 (2011) 325-342.

[77] Rhodes, C.g., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.a. and Bampton, C.C., Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 aluminum, Scripta Materialia, 36 (1997), 69–75.

[78] Posada, M., DeLoach, J., Reynolds, A.P., Skinner, M., Halpin, J.P., Friction stir weld evaluation of DH-36 and stainless steel weldments, Friction Stir Welding and Processing, Jata, K.V., Mahoney, M.W., Mishra, R.S., Semiatin, S.I. and Field, D.P., editors, TMS, 2001, 43–54.

[79] Thomas, W.M., Threadgill, P.L., Nicholas, E.D., Feasibility of friction stir welding steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(1999) 365–372.

[80] Xu, S., Deng, X., Reynolds, A.P. and Seidel, T.U., Finite element simulation of material flow in friction stir welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 6 (2001) 191–193.

[81] G.Liu, L.E.Murr, C-S.Niou, J.C.McClure, F.R.Vega, Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scr. Mater.* 37 (1997) 355–361.

[82] Chen Z.W. and Cui S., On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds, *Scripta Materialia* 58(2008) 417–420.

[83] Colegrove P.A., Shercliff H.R., Zettler R., Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(2007) 284–297.

[84] Fonda R.W., Knipling K.E. and Bingert J.F., Microstructural evolution ahead of the tool in aluminium friction stir welds, *Scripta Materialia*, 58 (2007) 343–348.

[85] Nandan R., Prabu B., De A., Debroy t., Improving reliability of heat transfer and fluid flow calculations during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys, *Welding Journal*, 86 (2007) 313–322.

[86] ASM International, *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM, Materials Park, OH, 1993.

[87] Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P., Review of tools for friction stir welding and processing, *Advances in High Temperature Joining of Materials*, 51(2012) 250-261.

[88] H. Juers Raymond, Naval Surface Warfare Center, Shielded Metal Arc Welding, ASM Handbook. Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, 9th Edition, ASM International, Ohio, United States, 1993: pp. 558-838.

[89] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints, Mater. Charact. 59 (2008) 1168–1177.

[90] Kiss Z, Czigány T, Applicability of friction stir welding in polymeric materials. Polytech Mech Eng, 51(2007)15–18.

[91] NasserSadeghian, Mohammad, Kazem Besharati Givi, Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets, Materials & Design, 67 (2015) 145-153.

[92] M.Guerra, C.Schmidt, J.CMcClure, L.EMurr, A.CNunes, Flow patterns during friction stir welding, Mater. Charact. 49 (2002) 95–101.

[93] V. Kerlins, M. Douglas, Modes of Fracture, in: R.F. Decker, E.L. Langer (Eds.), ASM Handb. Vol. 12, Factography, 9th Editio, ASM International, Ohio, United States, 1987: pp. 33–133.

[94] ] Meran , C., Canyurt, O.E., Friction Stir Welding of austenitic stainless steels (AISI 304 stainless steel), Jounal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 43 (2010) 829-835.

[95] Heurtiera P., Jonesb M.J., Desrayauda C., Drivera J.H., Mechanical and thermal modeling of Friction Stir Welding, Journal of Materials Processing Technology, Volume 171 (2006) 348–357.

[96] Ouyang, J.H., Kovacevic R., Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the Same and Dissimilar Aluminum Alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11 (2006) 51.

[97] Ouyang Jiahu, Yarcapareddy Eswar, Kovacevic Radovan, Microstructural evolution in friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, *Journal of Materials Processing Technology*, 172 (2006) 110-122.

[98] Zhihan Zhang, Wenya Li, Jinglong Li, Y. J. Chao, Numerical Analysis of Effect of Backplate Diffusivity on the Transient Temperature in Friction Stir Welding, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22 (2013) 2446-2450.

[99] L. Karthikeyan, M. Puviyarasan, S. Sharath Kumar and B.Balamugundan, experimental studies on friction stir welding of AA2011 and AA6063 aluminium alloys, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3 (2012) 144-145.

[100] A. Heidarzadeh, H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, E. Nazari, Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints, *Materials and Design*, 37 (2012) 166–173.

[101] García Bernal Marco Antonio, Propiedades súper-plásticas de la aleación AA5083 procesada por fricción-agitación, Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., Junio 2009.

[102] Angulo López José Manuel, Jiménez López Luis, López Domínguez Iván, Cruz Santos José, García García Adrián Luis, Microestructura y dureza del aluminio AA7075 soldado por fricción agitación, memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM, Pachuca, Hidalgo, México, 25 al 27 de septiembre, 2013.

[103] González León, J.A., Domínguez González, A., Hernández Franco, R.A., Calero Ramírez, P.G., Soldadura por fricción en materiales metálicos y polímeros, Tesis licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro, 2011.

## ACCIONES DE DIFUSIÓN.

**EFFECT OF MODIFIED PIN PROFILE AND PROCESS PARAMETERS ON THE FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOY 6061-T6.** J. C. Verduzco Juárez, G. M. Domínguez Almaraz, R. García Hernández, and J. J. Villalón López. Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2016 (2016). Pp.1-9.

<http://dx.doi.org/10.1155/2016/4567940>

**MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF INCONEL 718 FOR FUTURE ULTRASONIC FATIGUE TESTING.** Manuel Guzmán Tapia, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Ishvari Fernanda Zúñiga Tello, Alberto Gutiérrez Martínez, Julio Cesar Verduzco Juárez. Proceedings of the Symposium of Aeronautical and Aerospace Processes, Materials and Industrial Applications. XXU International Materials Research Congress. Cancun, Mexico, 2016.pp. 3-16. DOI 10.1007/978-3-319-65611-3\_1

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TORSION FATIGUE MACHINE: TORSION FATIGUE TESTS ON TWO INDUSTRIAL ALUMINUM ALLOYS.** **Jorge L. AVILA AMBRIZ**, Gonzalo M. DOMINGUEZ ALMARAZ, Julio C. VERDUZCO JUAREZ, Erasmo CORREA GOMEZ, Ishvari F. ZUÑIGA TELLO. U.P.B. Scientific Bulletin, Series D, mechanical engineering Vol. 79, Iss. 2, 2017. pp. 169-182. ISSN 1454-2358.

**ULTRASONIC FATIGUE TESTS ON THE NAFION PROTON EXCHANGE MEMBRANE, UNDER THE MODALITY OF THREE POINTS BENDING.** G.M. Domínguez Almaraz, R. Hernández Sánchez, A. Gutiérrez Martínez, E. Correa Gómez, J.C. Verduzco Juárez, V. López Garza. ELSEVIER. Procedia Structural Integrity. Volume 3, 2017, pp 571–578. ISSN: 2452-3216. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.021>

**ULTRASONIC FATIGUE TESTING ON THE POLYMERIC MATERIAL PMMA, USED IN ODONTOLOGY APPLICATIONS.** G.M. Domínguez Almaraz, A. Gutiérrez Martínez, R. Hernández Sánchez, E. Correa Gómez, M. Guzmán Tapia, J.C. Verduzco Juárez. ELSEVIER. Procedia Structural Integrity. Volume 3, 2017, pp 562–570. ISSN: 2452-3216. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.039>

**RESISTENCIA A LA FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA Y POR TORSIÓN DEL ALUMINIO 6063-T5 FATIGUE ENDURANCE OF THE 6063-T5 ALUMINUM UNDER TORSION AND ROTATING BENDING.** Ávila-Ambriz, J.L., Domínguez-Almaraz, G.M., Verduzco-Juárez, J.C., Correa-Gómez, E. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, (RIIIT). Noviembre – Diciembre 2016, Vol. 4, No. 23. ISSN: 2007-9753.  
[http://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=5039&item\\_id=84328&id=5039](http://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=5039&item_id=84328&id=5039)

**TORSION FATIGUE ENDURANCE AND LOAD RATIO CONFRONTATION R=0 VS. R=-1 ON THE AISI 6061-T6 ALUMINUM ALLOY.** Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmo Correa Gómez, Julio C. Verduzco Juárez. International Journal of Advanced Research. Diciembre 2015, VOL 3, Issue 12, 1428-1433. ISSN NO. 2320-5407.  
<http://www.journalijar.com/article/7422/torsion-fatigue-endurance-and-load-ratio-confrontation-r=0-vs.-r=-1-on-the-aisi-6061-t6-aluminum-alloy./>

**CRACK INITIATION AND PROPAGATION ON THE POLYMERIC MATERIAL ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE), UNDER ULTRASONIC FATIGUE TESTING.** G. M. Domínguez Almaraz, E. Correa Gómez, J.C. Verduzco Juárez, J.L. Avila Ambriz. Frattura ed Integrità Strutturale, 34 (2015) pp. 498-506; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.55. ISSN 1971-8993.  
<http://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/IGF-ESIS.34.55/1632>

**FATIGUE ENDURANCE UNDER ROTATING BENDING AND TORSIÓN TESTING, OF AISI 6063-T5 ALUMINUM ALLOY.** Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmo Correa Gómez, Julio C. Verduzco Juárez. International Journal of Advanced Materials Research (IJAMR). Vol. 1, No. 4 (Sep), 2015, pp. 120-125.

**ISSN Print: 2381-6805**

**ISSN Online: 2381-6813**

<http://files.aiscience.org/journal/article/html/70120020.html>

**PARAMETRIC NUMERICAL ANALYSIS OF J INTEGRAL AND THE STRESS INTENSITY FACTOR K, OF PLANE STRAIN PLATE UNDER UNIAXIAL LOADING.** Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmo Correa Gómez, Jorge L. Ávila Ambriz, Julio Cesar Verduzco Juárez. IPASJ International Journal of Mechanical Engineering (IIJME). Volume 2, Issue 10. Pp. 17-21, Octubre 2014. ISSN 2321-6441.

**FATIGUE ENDURANCE OF WELDED (GMAW-MIG PROCESS) ALUMINUM ALLOY 6061-T6 UNDER ROTATING BENDING FATIGUE TESTING.** G. M. Domínguez Almaraz, J. C. Verduzco Juarez, R. Gonzalez Bernal, J. L. Avila Ambriz, Erasmo Correa Gomez. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE).

**ISSN 2250-2459**, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 4, Issue 10, Octubre 2014. pp. 583-593.

[http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue10/IJETAE\\_1014\\_88.pdf](http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue10/IJETAE_1014_88.pdf)