

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE SOLDADURA
POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN ALEACIONES DE ALUMINIO USANDO UN
MODELO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

JENNIFER LUZ VILLA DOMÍNGUEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2016

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE SOLDADURA
POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN ALEACIONES DE ALUMINIO USANDO UN
MODELO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

JENNIFER LUZ VILLA DOMÍNGUEZ

TESIS DE MAESTRÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTORES:

JIMY UNFRIED SILGADO, PhD.

FRANZ QUESADA TATIS, MSc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BARRANQUILLA

2016

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla 10 de Octubre 2016

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a Dios que siempre me regalo fortaleza para seguir trabajando en este proyecto. A mi familia en especial a mis padres Marvel y Javier, mi hermana Kathy, mis abuelos Norma y José y a mi novio Alfonso, por alentarme a siempre emprender nuevos retos y culminar todo lo que me propongo. A todos mis maestros, colegas y amigos que me brindaron su sabiduría y apoyo incondicional. A todas las personas que han contribuido directa o indirectamente en mi desarrollo personal y profesional, espero retribuir a la sociedad toda la dedicación, disciplina y paciencia a mi entregada. A todos los ingenieros mecánicos comprometidos con la investigación, que poseen pasión y vocación por su trabajo. Espero este documento pueda contribuir al desarrollo de estudios futuros.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme lograr culminar esta etapa en mi vida. A mi madre Marvel por brindarme su amor infinito, y mi padre Javier por ser un gran ejemplo de persona; la disciplina, ética y constancia con la que trabajas cada día para que tengamos una buena calidad de vida es admirable. A mis abuelos, José y Norma, quienes me han brindado su apoyo en cada instante de este proceso y a quienes puedo consultar en cualquier momento. A mi hermana Kathy, por ser mi amiga y confidente hoy y siempre. A mi novio Alfonso por brindarme su comprensión, paciencia y apoyo; tú me haces mejor persona. A mis colegas y amigos Jonathan, Camilo, Jorge, Saúl y Luis, sé que con ustedes cuento en las buenas y en las malas. Soy muy afortunada de contar con su amistad.

A mi director de tesis PhD Jimy Unfried, quien tiene mi gratitud hoy y siempre. Eres un gran maestro y amigo. Gracias por creer en mí, por los regaños, las charlas motivadoras y tu apoyo paternal. Espero algún día ser tan buena investigadora, docente y persona como lo es tu. Al grupo de docentes que labora en el programa de Ingeniería Mecánica que ha sido mi hogar desde que empecé a estudiar mi pregrado; agradezco la calidez humana con la que siempre soy recibida y la guía que siempre encuentro sin importar el momento o asunto a tratar. En especial quiero agradecer al profesor Iván Tobar por colaboración en el transporte inesperado de las herramientas, que fue una correndilla total y aun así él lo hizo con todo el gusto. A Armando Robledo, Mauricio Márquez y Franz Quesada por su colaboración en la gestión académica de la maestría. A mis evaluadores Kriscia Utria y Jorge Pacheco por su colaboración en la revisión y evaluación diligente de este documento.

Al laboratorio de Nanotecnología del CNPEM, por permitirme realizar mi pasantía y abrirme las puertas de sus instalaciones. En especial a Jonathan, Victor, Yoel y Michel por su desbordada amabilidad, paciencia y guía durante todo el desarrollo del proceso investigativo. La experiencia fue inolvidable y muy enriquecedora. Espero volver. Al profesor Chamorro y su novia Suranny por ser unos excelentes anfitriones en mi pasantía. Me atrevo a decir que son los colombianos más chéveres de todo Brasil. Gracias por acogerme y mostrarme la cultura académica y propia de Brasil. Aprendí y me divertí como nunca.

A Colciencias y Climet Ltda. por su apoyo en la beca de Joven Investigador con la cual se sustentó en buena parte este trabajo.

CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	15
1.1.	RESUMEN	15
1.2.	INTRODUCCIÓN	16
1.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.4.	JUSTIFICACIÓN	20
1.5.	OBJETIVOS.....	21
1.5.1.	GENERAL.....	21
1.5.2.	ESPECIFICOS.....	21
2.	MARCO REFERENCIAL.....	22
2.1.	MARCO TEÓRICO	22
2.1.1.	Generalidades de la soldadura	22
2.1.2.	Soldadura por fricción-agitación.....	28
2.1.3.	Análisis Energético Del Proceso	38
2.2.	ESTADO DEL ARTE.....	47
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	59
3.1.	Método.....	59
3.2.	Materiales	61
3.3.	HERRAMIENTAS	62
3.4.	EQUIPOS.....	66
3.4.3.	Dispositivos de medición de variables del proceso SFA	70
3.5.	MONTAJE DEL EXPERIMENTO.....	72
3.6.	PARÁMETROS OPERACIONALES PARA EL PROCESO SFA	74
3.7.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	75
3.8.	CRITERIOS DE SANIDAD DE CORDONES.....	82
3.9.	METODO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA.....	83
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
4.1.	VENTANA DE PROCESO	85
4.1.1.	VENTANA DE PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA	85
4.1.2.	VENTANA DE PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA FRESADORA ADPATADA PARA EL PROCESO	90

4.2 SOLDADURA DEFINITIVAS.....	96
4.2.1 SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	96
4.2.2 SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	105
4.3 ANALISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN.....	107
4.3.1 Análisis del proceso de soldadura por fricción agitación en una maquina especializada en SFA.....	108
4.3.2 Análisis del proceso de soldadura por fricción agitación en una maquina fresadora adaptada para SFA.....	117
5. CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES.....	132
BIBLIOGRAFIA.....	133

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA [20].	25
TABLA 2. EFICIENCIAS DE ARCO DE ALGUNOS PROCESOS DE SOLDADURA [24].	27
TABLA 3. DEPENDENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN CON RESPECTO A LA TEMPERATURA PARA ALUMINIO-ACERO [33].	44
TABLA 4. PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y VARIABLES DE SALIDA DE LA APLICACIÓN 1 BAJO TRES CONDICIONES DIFERENTES PARA EL PROCESO FSW [26].	51
TABLA 5. CICLOS TÉRMICOS, FUERZA AXIAL Y CALOR REGISTRADO DURANTE EL PROCESO SFA PARA LA APLICACIÓN 1 [26].	52
TABLA 6. CORRELACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO EN FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO PARA LA PRIMERA ETAPA DE INVESTIGACIÓN APLICACIÓN 2 [26].	53
TABLA 7. FUERZAS MEDIDAS PARA LAS APLICACIONES 1 Y 2, Y EVALUACIÓN DE EFICIENCIA TÉRMICA CON SU CORRELACIÓN PARA LA APLICACIÓN 2 [26].	54
TABLA 8. DETALLES DE LAS SOLDADURAS UTILIZADAS PARA EL TRABAJO EXPERIMENTAL [48].	55
TABLA 9. TASA DE ENTRADA DE CALOR A LA PIEZA Y HERRAMIENTA DE TRABAJO PARA LAS DOS CONDICIONES ESTABLECIDAS [51].	57
TABLA 10. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE.	58
TABLA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO PARA TRABAJO EN CALIENTE H13 [53].	64
TABLA 12. CALCULO DETALLADO DEL ÁREA DE CONTACTO PARA CADA PERFIL DE HERRAMIENTA PARA EL PROCESO SFA.	65
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MÁQUINA PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.	66
TABLA 14. FICHA TÉCNICA MOTOR PRINCIPAL MAQUINA FRESADORA EMPLEADA PARA EL PROCESO SFA.	68
TABLA 15. FICHA TÉCNICA MOTOR SECUNDARIO MAQUINA FRESADORA EMPLEADA PARA EL PROCESO SFA.	68
TABLA 16. PARÁMETROS OPERACIONALES EMPLEADOS PARA EL PROCESO SFA BAJO LOS DIFERENTES TIPOS DE HERRAMIENTAS.	75
TABLA 17. VALORES DE LA FUERZA DE PENETRACIÓN FZ EMPLEANDO UNA DE HERRAMIENTA DE PIN CÓNICO ROSCADO CON DIFERENTES PERFILES EN LA GEOMETRÍA DEL HOMBRO [14].	79
TABLA 18. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL NÚMERO DE RÉPLICAS CON POTENCIA >90% EMPLEANDO LAS CURVAS DE OPERACIÓN CARACTERÍSTICA DE PROBABILIDAD DE ERROR TIPO II CONTRA EL PARÁMETRO Φ .	81
TABLA 19. CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA CORDONES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN [52].	82

20. PRUEBAS PRELIMINARES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN PLACAS DE AA1100-H14 EN LA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	86
TABLA 21. CONDICIONES ÓPTIMAS DE TRABAJO PARA LAS SOLDADURAS DE AA1100-H14 EN MAQUINA ESPECIALIZADA CON HOMBRO CONCÉNTRICO Y PLANO.	89
TABLA 22. PRUEBAS PRELIMINARES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN PLACAS DE AA1100-H14 EN LA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA PARA EL PROCESO SFA EMPLEANDO HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO.	91
TABLA 23. PRUEBAS PRELIMINARES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN PLACAS DE AA1100-H14 EN LA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA PARA EL PROCESO SFA EMPLEANDO HERRAMIENTA DE HOMBRO EN ESPIRAL.	92
TABLA 24. CONDICIONES ÓPTIMAS DE TRABAJO PARA LAS SOLDADURAS DE AA1100-H14 EMPLEANDO UNA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA CON HOMBRO EN ESPIRAL Y PLANO...	95
TABLA 25. CONDICIONES DE TRABAJO DE SOLDADURA DEFINITIVAS DE AA1100-H14 POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.	97
TABLA 26. PRUEBAS DEL PROCESO SFA REALIZADAS CON MAQUINA ESPECIALIZADA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA PARA HERRAMIENTA CON HOMBRO PLANO Y CONCÉNTRICO EN MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	101
TABLA 27. PRUEBAS DEL PROCESO SFA REALIZADAS CON MAQUINA ESPECIALIZADA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA PARA HERRAMIENTA CON HOMBRO PLANO Y CONCÉNTRICO EN MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	106
TABLA 28. RANGO DE TEMPERATURA TRABAJADOS DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN PARA VARIAS ALEACIONES [28].	108
TABLA 29. PUNTOS DE TEMPERATURA A ANALIZAR PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA ESPECIALIZADA SFA CON HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO...	110
TABLA 30. ESFUERZOS DE FLUJO Y FLUENCIA CALCULADO PARA LA ZONA AGITADA EN SOLDADURAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN MAQUINA SFA CON HERRAMIENTAS DE HOMBRO PLANO.	113
TABLA 31. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO PARA EL ENFOQUE DE ADHERENCIA.	114
TABLA 32. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO PARA EL ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO.	114
TABLA 33. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO PARA EL ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO.	116
TABLA 34. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO CONCÉNTRICO PARA EL ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO.	116
TABLA 35. PUNTOS DE TEMPERATURA A ANALIZAR PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN FRESADORA ADAPTADA CON HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO.	120
TABLA 36. PUNTOS DE TEMPERATURA A ANALIZAR PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HERRAMIENTA DE HOMBRO EN ESPIRAL EMPLEANDO UNA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA.	121

TABLA 37. ESFUERZOS DE FLUJO Y FLUENCIA CALCULADO PARA LA ZONA AGITADA EN SOLDADURAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA CON HERRAMIENTAS DE HOMBRO PLANO.....	123
TABLA 38. ESFUERZOS DE FLUJO Y FLUENCIA CALCULADO PARA LA ZONA AGITADA EN SOLDADURAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA CON HERRAMIENTAS DE HOMBRO EN ESPIRAL.....	124
TABLA 39. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO PARA EL ENFOQUE DE ADHERENCIA	125
TABLA 40. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO PARA EL ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO.	125
. TABLA 41. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO EN ESPIRAL PARA EL ENFOQUE DE ADHERENCIA	126
TABLA 42. CÁLCULOS DE EFICIENCIA TÉRMICA PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA EMPLEANDO UNA HERRAMIENTA DE HOMBRO EN ESPIRAL PARA EL ENFOQUE DE DESPLAZAMIENTO.	126
TABLA 43. APLICACIÓN DEL MODELO DE ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO AL TRABAJO REALIZADO POR CUI ET. AL. [41]	128
TABLA 44. APLICACIÓN DEL MODELO DE ENFOQUE DE DESLIZAMIENTO AL TRABAJO REALIZADO POR FONDA ET. AL. [60]	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE MÉTODOS DE UNIÓN Y FIJACIÓN. [19].....	22
FIGURA 2. DISTINTAS APLICACIONES DE PROCESOS DE SOLDADURA. (A) PROCESO DE SOLDADURA GMAW, (B) PROCESO DE SOLDADURA POR LÁSER, (C) PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO AUTOMATIZADO Y (D) PROCESO DE SOLDADURA SMAW [22].....	24
FIGURA 3. ETAPAS DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE SOLDADURA [15].	26
FIGURA 4. RELACIÓN ENTRE EL PROCESAMIENTO-MICROESTRUCTURA-PROPIEDADES Y DESEMPEÑO DE UNA UNIÓN METÁLICA [3].....	27
FIGURA 5. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-ADAPTACIÓN. (A) ESQUEMA DEL PROCESO. (B) HERRAMIENTA PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CONFORMADA POR UN HOMBRO Y UN PIN TRATADO TÉRMICAMENTE. [25].	28
FIGURA 6. DEFORMACIÓN PLÁSTICA ALREDEDOR DE LA HERRAMIENTA EN MOVIMIENTO A UNA VELOCIDAD CONTRA LA PRESIÓN $P_{MÁX}$ [27].	29
FIGURA 7. DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE TRABAJO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN. DISTINTAS GEOMETRÍAS MODIFICANDO EL PERFIL DEL HOMBRO Y EL PIN DE LA HERRAMIENTA [28].	31
FIGURA 8. PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN [29].	33
FIGURA 9. ZONAS PRESENTES EN LA MICROESTRUCTURA DE JUNTAS SOLDADA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN PARA EL ALUMINIO (LADO DE AVANCE ESTÁ UBICADO A LA IZQUIERDA) [30].....	34
FIGURA 10. MACROGRAFÍA DE UNA JUNTA SOLDADA DE AA2195 QUE MUESTRA UNA FORMA DE AROS CEBOLLA Y LA ZTMA [30]	36
FIGURA 11. MAQUINAS ESPECIALIZADAS SFA. (A) BRAZO ROBÓTICO [28] (B) MAQUINA DE MAYOR CAPACIDAD [34].	37
FIGURA 12. DISTINTOS TIPOS DE MÁQUINAS PARA DESARROLLAR LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN [35].....	38
FIGURA 13. CICLOS TÉRMICOS PRESENTES EN DISTINTAS ZONAS DE LA JUNTA SOLDADA [15].....	41
FIGURA 14. PARÁMETROS DIMENSIONALES DE LA HERRAMIENTA DE TRABAJO PARA LA SOLDADURA SFA [45].....	42
FIGURA 15. PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN QUE TIENEN LUGAR DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SFA [49].	46
FIGURA 16. INGENIERÍA INVERSA APROVECHADA UTILIZANDO LA HERRAMIENTA ISTIR PARA ESTABLECER LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS FSW Y LA EFICIENCIA DEL PROCESO [26].....	49
FIGURA 17. PÉRDIDAS DE CALOR PREDICHAS A LO LARGO DE LA SOLDADURA PARA HERRAMIENTAS CON O SIN RECUBRIMIENTO [48].....	56

FIGURA 18. METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO SFA.....	59
FIGURA 19. PLANO DE MATERIAL BASE AL 1100-H14 PARA PROCESO SFA.....	61
FIGURA 20. SENTIDO DE LAMINACIÓN PRESENTE EN EL MATERIAL BASE AL 1100-H14 [52].	61
FIGURA 21. PLANO CON VISTA ISOMÉTRICA DE LA HERRAMIENTA DESMONTABLE CON HOMBRO INTERCAMBIABLE PARA PROCESO SFA [54].....	63
FIGURA 22. PERFILES PLANO Y CONCÉNTRICO DE HOMBRO DE LAS HERRAMIENTAS DE PROCESO SFA.....	64
FIGURA 23. MÁQUINA ESPECIALIZADA PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.	67
FIGURA 24. MÁQUINA FRESADORA KONDOR EMPLEADA PARA EL PROCESO SFA.	69
FIGURA 25. TORQUÍMETRO, SUS COMPONENTES Y SU MONTAJE EN LA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA PARA SFA.	70
FIGURA 26. DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE FUERZAS Y SU MONTAJE EN UNA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA PARA SFA.	71
FIGURA 27. MONTAJE PARA EL DESARROLLO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN UNA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA.....	73
FIGURA 28. MONTAJE PARA EL DESARROLLO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN UNA MAQUINA ESPECIALIZADA.	74
FIGURA 29. DISEÑO EXPERIMENTAL A LLEVAR A CABO PARA LAS SOLDADURAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN LA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA.....	77
FIGURA 30. DISEÑO EXPERIMENTAL A LLEVAR A CABO PARA LAS SOLDADURAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN LA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA.....	77
FIGURA 31. GRAFICO CURVA DE OPERACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA PROBABILIDAD DE ERROR TIPO II CONTRA EL PARÁMETRO Φ	80
FIGURA 32. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO SFA.....	84
FIGURA 33. CORDONES DE SOLDADURA OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES REALIZADAS CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO EN MAQUINA ESPECIALIZADA.	88
FIGURA 34. CORDONES DE SOLDADURA OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES REALIZADAS CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO CONCÉNTRICA EN MAQUINA ESPECIALIZADA.	89
FIGURA 35. CORDONES DE SOLDADURA OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES REALIZADAS CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO.....	94
FIGURA 36. CORDONES DE SOLDADURA OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES REALIZADAS CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO ESPIRAL.....	95
FIGURA 37. CORDONES DE SOLDADURA REFERENCIA 201509090000 Y 201509090001.	99
FIGURA 38. CORDONES DE SOLDADURA REFERENCIA 201509090004 Y 201509090005.	99
FIGURA 39. CORDONES DE SOLDADURA REFERENCIA 201509090006 Y 201509100000.	100
FIGURA 40. CORDONES DE SOLDADURA REFERENCIA 201509110000 Y 201509110001.	100

FIGURA 41. CORDÓN DE SOLDADURA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA HOMBRO CONCÉNTRICO REFERENCIA 201509170000.	102
FIGURA 42. CORDÓN DE SOLDADURA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA HOMBRO PLANO REFERENCIA 201509170001.	102
FIGURA 43. CICLOS TÉRMICOS MEDIDOS DURANTE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO CONCÉNTRICO LADO DE AVANCE (1) Y RETROCESO (2).	103
FIGURA 44. CICLOS TÉRMICOS MEDIDOS DURANTE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO LADO DE AVANCE (1) Y RETROCESO (2).	104
FIGURA 45. CORDÓN DE SOLDADURA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA HOMBRO PLANO REFERENCIA 20130906.	105
FIGURA 46. CORDÓN DE SOLDADURA CON MEDICIÓN DE TEMPERATURA HOMBRO EN ESPIRAL REFERENCIA 20130906.	106
FIGURA 47. CICLOS TÉRMICOS MEDIDOS DURANTE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON LA HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO Y EN ESPIRAL LADO DE AVANCE PARA TERMOPAR UBICADO A 11MM.	107
FIGURA 48. FORMA DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HOMBRO PLANO EN MAQUINA ESPECIALIZADA EN SFA [29]....	109
FIGURA 49. GRÁFICO DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO EN MAQUINA ESPECIALIZADA EN SFA.	109
FIGURA 50. AJUSTE BOLTZMANN PARA LAS MEDIDAS DE TEMPERATURAS ESTUDIADAS PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN UNA MAQUINA SFA CON HOMBRO PLANO.	111
FIGURA 51. GRÁFICO DE ESFUERZO DE FLUJO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA DISTINTOS TIPOS DE ALUMINIO	112
FIGURA 52. FORMA DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HOMBRO PLANO EN FRESADORA ADAPTADA PARA SFA [29].	118
FIGURA 53. GRÁFICO DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HERRAMIENTA DE HOMBRO PLANO EN FRESADORA ADAPTADA PARA SFA.	118
FIGURA 54. FORMA DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HOMBRO EN ESPIRAL EN FRESADORA ADAPTADA [29].	119
FIGURA 55. GRÁFICO DE LA ZONA AGITADA (NUGGET) OBTENIDO PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HERRAMIENTA DE HOMBRO EN ESPIRAL EN FRESADORA ADAPTADA.	119
FIGURA 56. AJUSTE BOLTZMANN PARA LAS MEDIDAS DE TEMPERATURAS ESTUDIADAS PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN UNA MAQUINA FRESADORA ADAPTADA CON HOMBRO PLANO.	121
FIGURA 57. AJUSTE BOLTZMANN PARA LAS MEDIDAS DE TEMPERATURAS ESTUDIADAS PARA LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN CON HOMBRO EN ESPIRAL EN MAQUINA FRESADORA ADAPTADA PARA SFA.	122

LISTA DE SIMBOLOS

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción-agitación (SFA) en juntas soldadas de aleaciones de aluminio estructural, empleando dos tipos de geometrías de herramienta en dos tipos de máquinas para realizar este proceso. Las herramientas utilizadas en el proceso SFA constan de una geometría semejante difiriendo únicamente en el perfil del hombro, el cual puede ser completamente plano o poseer ranuras en espiral o concéntricas. Los equipos bajo los cuales se desarrolló el proceso de soldadura por fricción agitación están compuestos por una maquina fresadora adaptada para SFA y una maquina especializada en dicho proceso también. Durante el desarrollo de las soldaduras, se realizó la medición de las variables de operación: torque, velocidad de rotación, velocidad de avance, fuerza axial, fuerza de avance y temperatura; mediante la instalación de un sistema de adquisición de datos conectado a termopares, un torquimetro inalámbrico, un dispositivo de fuerzas y un tacómetro. Con base en los resultados obtenidos a partir de los datos experimentales analizados bajos los modelos teórico-experimentales de deslizamiento y adherencia de material de la pieza de trabajo sobre la superficie de la herramienta dentro de la zona agitada planteados por H. Schmith et. al. [1], se establece una metodología para la evaluación de la eficiencia térmica del proceso SFA. Esta metodología permite que mediante los ciclos térmicos y perfiles de temperatura obtenidos durante el desarrollo de las juntas soldadas se corrobore y ajuste el torque requerido por la máquina para realizar el proceso de soldadura. Al final del estudio, se comparan las eficiencias térmicas evaluadas del proceso SFA entre las distintas condiciones de trabajo, así como, con las establecidas en la literatura por otros autores mediante métodos de simulación y experimentación.

1.2. INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura por fricción-agitación SFA, fue inventado en 1991 y patentado en 1995 por el Instituto de Soldadura (TWI *The Welding Institute*) Cambridge, UK [2]. Debido a que es un proceso de unión permanente en estado sólido la entrada de calor requerida es inferior a la de los procesos de soldadura convencionales. Este proceso de soldadura se caracteriza por obtener cordones de alta calidad, con bajo nivel de distorsiones y tensiones residuales. En consecuencia, los cordones obtenidos por SFA poseen microestructura fina con excelentes propiedades mecánicas y bajo riesgo de generar fisuras [3]. Con el proceso SFA se ha realizado la soldadura de juntas a tope y solape de placas de Al, Pb, Mg, Ti, Cu, Zn, Acero y materiales compuestos con matriz metálica. Además, con este proceso se han desarrollado cordones de soldadura con metales con baja soldabilidad con procesos de soldadura convencionales como algunas las aleaciones de aluminio (como las series 2xxx y 7xxx empleadas en la industria aeroespacial), e incluso se han obtenido uniones de metales disimiles [4]. Estas características han llevado a que este proceso lentamente se introduzca al mercado [5] [6].

Las industrias aeroespacial, agroindustrial y automotriz han acogido al proceso SFA para reemplazar el uso de elementos de fijación y sujeción (pernos y remaches), para conformar componentes críticos estructurales. Evitando los efectos de concentración de esfuerzos que estos producen generando una disminución de la resistencia del material, iniciación de grietas y susceptibilidad a la corrosión [7]. Los inconvenientes mencionados sumados al costo de mantenimiento requerido por esta tecnología de unión desmontable motivaron al estudio de nuevos métodos de unión como la SFA que sustituyan los procesos de unión actuales, permitiendo alcanzar costos operacionales competitivos preservando la integridad estructural [8]. Los procesos de soldadura convencionales han sido utilizados tradicionalmente como respuesta a esta necesidad. Sin embargo, debido a los efectos térmicos presentes en el cordón y las zonas aledañas a este asociado a la entrada de calor, y la posible generación de discontinuidades durante la solidificación del charco de soldadura; los procesos de soldadura convencionales no han podido alcanzar las propiedades mecánicas y microestructura característica y provechosas como la obtenidas por los procesos SFA [9].

A partir de la invención y patente el proceso del SFA son constantes los estudios y avances que se han generado respecto al proceso, en cuanto a materiales empleados, calidad de la junta, herramientas, etc. [10]. Son también comunes los estudios que buscan realizar un modelamiento termomecánico del proceso en aras de establecer relaciones entre parámetros operacionales, temperatura y geometría de herramienta con las propiedades mecánicas de la junta soldada [11]. Buscando alcanzar este objetivo los investigadores emplean modelos analíticos complejos, simulación a través de elementos finitos y experimentación [12]. Siguiendo esta línea de investigación, este trabajo establece una metodología que permite determinar la entrada, transformación, pérdida y salida de energía durante la operación de soldadura bajo la cual se calcula la eficiencia térmica del proceso SFA. Con la meta global de que los análisis, datos y resultados obtenidos en este trabajo contribuyan a futuros estudios a establecer a ciencia cierta la viabilidad del proceso, y en años próximos a la implementación de esta tecnología en la industria internacional y nacional.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de soldadura por fricción agitación constituye una nueva técnica de fabricación que debido a sus beneficios metalúrgicos, ambientales y energéticos ha demostrado por más de 23 años ser el método más adecuado en la unión de componentes metálicos de sector automotriz, aeronáutico, naval, ferroviario, petrolero etc [10]. En especial aquellas piezas y componentes fabricadas con aleaciones metálicas ligeras y disimiles, en los cuales los cordones obtenidos deben tener una excelente calidad para poder soportar las cargas críticas a las que están sometidos, así como, el garantizar la seguridad del personal que los opera.

A pesar las ventajas del proceso SFA aún existen interrogantes con respecto a la incursión, estudio, implementación, adaptación y desarrollo de este proceso que están sin contestar. Por tanto, se desarrollan constantemente de proyectos investigativos en los que se plantean modelos matemáticos y se desarrollan simulaciones del proceso bajo unas condiciones específicas, para evaluar el comportamiento, las condiciones operacionales y las propiedades mecánicas de la junta obtenida. La inexperiencia y desconocimiento del proceso en Colombia impide que en este momento se pueda justificar el alto capital de inversión que se requiere para la adquisición de la máquina especializada para la operación del proceso SFA. Esto ha motivado a las instituciones educativas a buscar presupuesto externo para el desarrollo del proceso. Es por esta razón es que los trabajos que se desarrollan actualmente en las universidades emplean maquinas fresadoras adaptadas para el proceso SFA. Estas instituciones son: la Universidad Nacional sede Medellín [13], la Universidad del Valle [10], y la Universidad Autónoma del Caribe [14].

En pro de dar a conocer esta tecnología y poder conseguir el apoyo económico requerido para realizar un mayor trabajo investigativo, se debe evaluar el proceso bajo indicadores que permitan que un inversionista cuantifique la rentabilidad del proceso. Uno de los criterios más importantes al momento de evaluar una tecnología es el aspecto energético. A partir de un estudio energético se puede establecer el porcentaje de energía que es aprovechada para trabajo útil, que en este caso constituye en realizar la unión soldada; el cual corresponde al rendimiento del proceso. En la literatura se cuentan con modelos termo mecánicos que evalúan la eficiencia térmica del proceso SFA, sin embargo, no existe una metodología consensuada o un modelo matemático universal para realizar este estudio [12]. Los modelos planteados se enfrentan al desafío de combinar el efecto del trabajo plastificante del material base junto con la generación de calor por fricción generada.

En los procesos convencionales de soldadura encontramos que estos cuentan con una eficiencia térmica de valores entre un 40% y 90% [15]. Sin embargo, los procesos convencionales presentan entradas de calor elevadas que generan efectos en la estructura y propiedades mecánicas del cordón de soldadura, como por ejemplo crecimiento de grano, fragilidad y corrosión. Por el contrario, el proceso de soldadura por fricción-agitación no presenta este tipo de efectos térmicos debido a que la unión soldada se produce debido al calor friccional, pero sobre todo a trabajo plastificante ejercido sobre el material base. En el caso del proceso SFA, diversas investigaciones afirman que la soldadura por fricción- agitación posee una eficiencia térmica por encima de un 90% [16] [17], superando los valores obtenidos por los procesos de soldadura convencionales.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la eficiencia energética del proceso de soldadura por fricción agitación. Además, busca determinar si existe influencia de la geometría de la herramienta y la máquina de trabajo en la eficiencia térmica del proceso SFA. Además, se plantea una metodología de trabajo con base en los modelos termomecánicos planteados por H. Schmith et. al [11]. Al final se establecen las eficiencias térmicas obtenidas bajo las diferentes condiciones de trabajo, y cuál es el escenario de operación más rentable para el proceso SFA.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como propósito evaluar la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción-agitación SFA. Para alcanzar este objetivo, se plantea una metodología bajo dos enfoques que permite el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA sin requerir el uso programas de elementos finitos y/o de simulaciones, brindando confiabilidad en sus resultados. La metodología está basada en el modelado termomecánico establecido por H. Schmith et. al [11]. Estos modelos establecen dos condiciones de estudio. La primera condición en la se asume la adherencia del material agitado a la superficie del hombro y pin de la herramienta. En este primer caso se requiere conocer los ciclos térmicos, la geometría de la herramienta, los parámetros operacionales y el torque requerido para desarrollar las juntas. En el segundo caso se asume la condición de deslizamiento por parte del material agitado sobre la superficie del hombro y pin de la herramienta. Para este caso, calcular la eficiencia térmica se requiere conocer la fuerza axial, el coeficiente de fricción de los materiales en contacto, la geometría de la herramienta y los parámetros operacionales del proceso. Además, se establece un método para el ajuste del torque del proceso a partir de un análisis de ciclos térmicos y la microestructura obtenida en una junta preparada metalográficamente. Esta metodología es flexible y permite emplear datos teóricos registrados en la literatura, siempre y cuando las condiciones operacionales bajo las cuales se realizó el estudio previo sean semejantes a las empleadas durante la experimentación del estudio actual.

La metodología y los modelados matemático utilizados en este estudio pueden ser aplicados a cualquier tipo de unión realizada por el proceso SFA. Adicionalmente, el estudio también revela la influencia de la geometría de la herramienta y de la maquina empleada en el proceso de soldadura, sobre la eficiencia térmica.

Este proyecto se constituirá como base para futuros estudios con respecto a esta tecnología, en los cuales se incluye el modelado computacional del flujo de material, análisis por elementos finitos, cálculos computacionales, análisis de la evolución microestructura y estudios termo-mecánicos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. GENERAL

Evaluar la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación de juntas de aluminio estructural mediante modelos teórico experimentales empleando dos tipos de geometría herramientas en dos tipos de máquinas, para el desarrollo del proceso y su posterior comparación.

1.5.2. ESPECIFICOS

1. Establecer una metodología de trabajo que emplee modelos matemáticos para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA.
2. Medir los parámetros de operación que intervienen en la entrada de calor y trabajo mecánico en el proceso SFA: torque, velocidad de avance, velocidad de rotación, fuerza en el plano de avance y fuerza axial, mediante dispositivos y equipos especializados bajo las distintas condiciones operaciones, para alimentar los modelos establecidos en la metodología.
3. Determinar la eficiencia térmica del proceso SFA, relacionando el trabajo mecánico realizado por la máquina empleada y la energía transferida en forma de calor a la junta soldada.
4. Establecer los variables que influyen significativamente en la eficiencia térmica del proceso de soldadura SFA mediante un análisis estadístico del proceso.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Generalidades de la soldadura

La soldadura es un proceso de manufactura que surgió como respuesta a la gran necesidad de fabricar componentes y estructuras de alta complejidad imposibles de producir a partir de una sola pieza debido a sus grandes dimensiones y el elevado costo implicado en su manejo y desarrollo. Es a partir de la comprensión de que solo mediante la ejecución de un procedimiento de unión de piezas de geometría simple es como se podía garantizar la producción de este tipo de componentes a un menor tiempo y un bajo costo que surge los primeros pasos hacia el desarrollo de este proceso. Aun así, es cierto que existen diversos tipos de métodos de unión y fijación además de la soldadura, como son los elementos de unión mecánica (empleando tornillos remaches etc.), los adhesivos y las uniones mixtas [18]. La figura 1 muestra los tipos de unión empleados en la industria metalmeccánica.

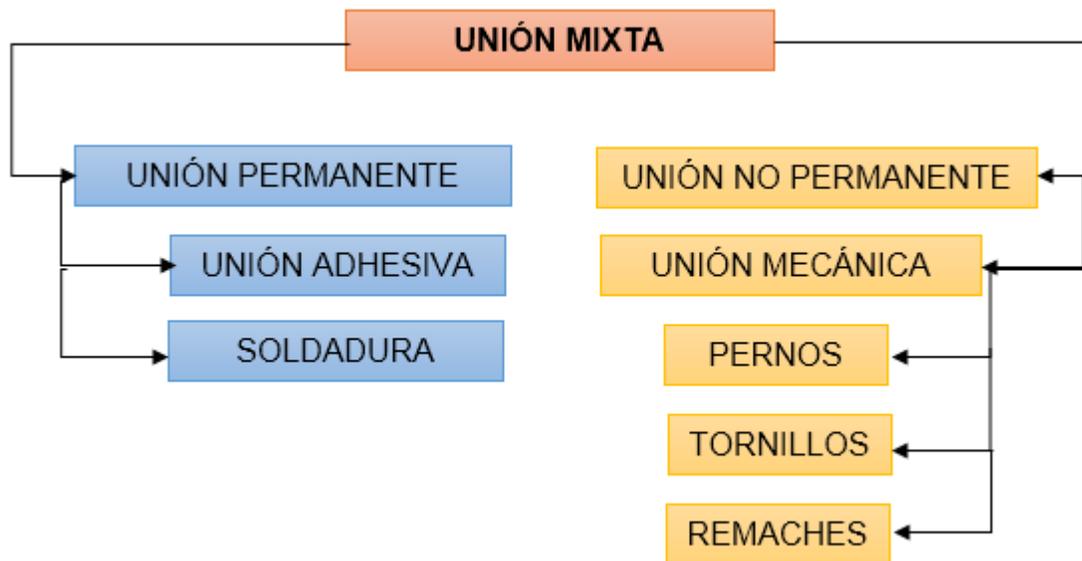


Figura 1. Tipos de métodos de unión y fijación. [19]

Sin embargo, la soldadura representa un método de unión con propiedades mecánicas superiores, ya que de ser realizado el procedimiento adecuadamente éste permite alcanzar una unión permanente con una resistencia mayor a la del material o materiales base. Esto se debe a que esta unión tiene lugar a nivel atómico a través de la formación de enlaces primarios (o, en ocasiones secundarios) [20].

La AWS (American Welding Society) define a la soldadura como “un procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambas, con o sin aporte de otro metal llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse” [21]. La soldadura se caracteriza por su versatilidad tecnológica ya que cuenta con un grupo basto de procesos que le permiten adaptarse a diversos tipos de circunstancias y requerimientos. La unión soldada forma un todo metalúrgico en la región soldada llamada junta, por lo que es posible mediante este proceso proteger e incluso, recuperar materiales. Por esta razón es común encontrar componentes, estructuras, maquinarias y herramientas fabricadas gracias a este proceso en campos industriales como el de la construcción, la petroquímica, alimenticia, agrícola, aeroespacial, transporte, electrónica, automotriz, de generación de energía, etc.



Figura 2. Distintas aplicaciones de procesos de soldadura. (a) Proceso de soldadura GMAW, (b) Proceso de soldadura por láser, (c) Proceso de soldadura por arco eléctrico automatizado y (d) Proceso de soldadura SMAW [22].

El gran potencial de aplicación de este proceso junto con su gran contribución al desarrollo actual impulsó la inversión, el trabajo e investigación sobre el mismo. Sin embargo, todavía existen limitaciones a vencer. Dentro de los principales desafíos a los que se enfrenta el proceso son los efectos no deseados consecuentes del trabajo mecánico, térmico o combinado que experimenta tanto la junta soldada como la región adyacente a ésta. Las consecuencias a estos efectos incluyen discontinuidades, distorsión, tensiones residuales, fragilización etc. La tabla 1 profundiza en la ventajas y desventajas que se presentan al utilizar uniones soldadas en ves, de los otros métodos de unión previamente mencionados.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de soldadura [20].

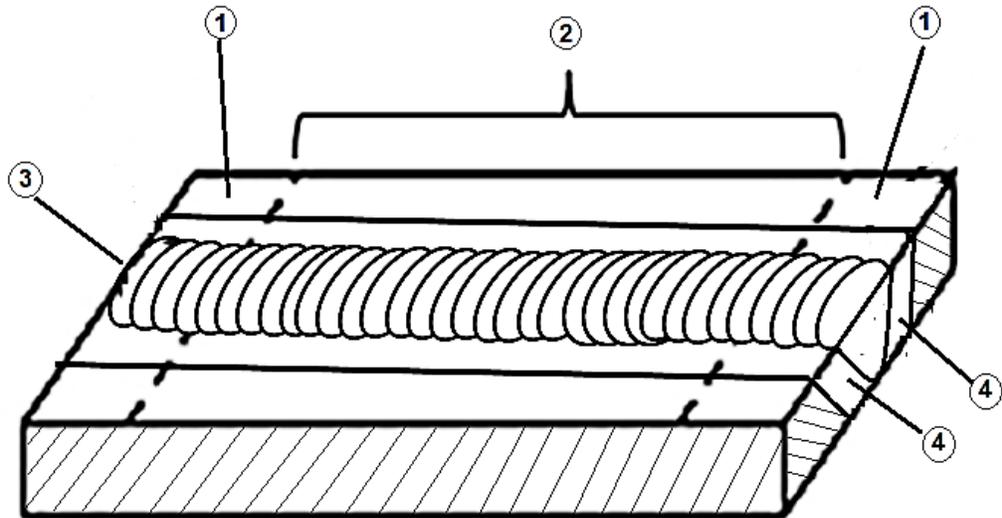
PROCESOS DE SOLDADURA	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta eficiencia en las juntas. ✓ Permite alcanzar una resistencia mecánica igual o mayor a la del material base. ✓ Amplia variedad de procesos y materiales para ser soldados. ✓ El proceso puede ser manual, automático o semiautomático. ✓ Costo razonable para la mayoría de las aplicaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Costo elevado en aplicaciones especiales con juntas críticas. ✓ Proceso de unión permanente, no permite desensamblarse. ✓ Requiere operarios capacitados y en algunos casos de equipos de costo elevado. ✓ Degradación de las propiedades del metal base como efecto al calor inducido por el proceso. ✓ Desbalance entre el calor aportado y enfriamiento pueden provocar esfuerzos residuales y distorsión en el componente soldado.

Los procesos de soldadura convencionales que más se emplean actualmente en la industria son los procesos de soldadura por arco eléctrico. Estos emplean un flujo de electrones a lo largo de un circuito para generar calor y lograr la fusión del material base y/o material de aporte, formando una unión interatómica que de realizarse bajo un procedimiento adecuado por un operario calificado se puede conseguir una resistencia superior a la del material base [20].

Todo proceso de soldadura está constituido por tres etapas; inicio, desarrollo y finalización del cordón de soldadura. El proceso presenta un movimiento de la fuente de energía con respecto al material base, o viceversa. En el proceso se desarrolla por etapas donde en la primera y última etapa se coloca o retira la entrada de calor de la pieza de trabajo, por lo que el proceso se lleva a cabo bajo parámetros cambiantes. Las porciones de material donde tienen lugar el inicio y la finalización del proceso se establece que son desarrolladas en estado transitorio, mientras que en medio del cordón los parámetros se estabilizan y trabajan en un estado cuasi-estacionario [23]. La entrada de calor al proceso, aún sin alcanzar la temperatura de fusión, crea efectos en el material como transformaciones de fase, esfuerzos residuales y un cambio en las propiedades mecánicas del material [15]. Para el desarrollo de este trabajo y aplicación de los modelos matemáticos aquí

presentados, se emplearán mediciones realizadas en estado cuasi-estacionario. La figura 3 muestra claramente lo planteado.

Figura 3. Etapas de análisis del proceso de soldadura [15].



1. Zona Transitoria, **2.** Zona Cuasi-estacionaria, **3.** Cordón de Soldadura y **4.** Zona Afectada Térmicamente

Para los procesos de soldadura la eficiencia térmica está dada por la relación entre el calor suministrado Q_{Ent} a la junta para llevar a cabo la soldadura y la potencia demanda por la maquina Q_{Nom} , como se muestra en la ecuación (1). Esta potencia se encuentra en función de los parámetros operacionales del proceso de soldadura.

$$\eta_{Term} = \frac{Q_{Ent}}{Q_{nom}} \text{ Ec. (1)}$$

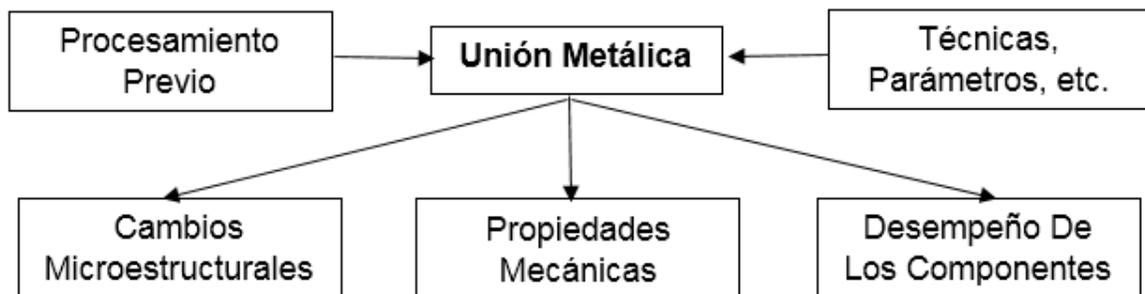
A continuación, se presenta la tabla 2 en la que muestran los intervalos de eficiencias térmica que tienen estos procesos de soldadura por arco eléctrico.

Tabla 2. Eficiencias de arco de algunos procesos de soldadura [24].

PROCESO DE SOLDADURA		EFICIENCIA TÉRMICA, FACTOR η	
		Intervalo	Media
Soldadura SAW		0,91-0,99	0,95
Soldadura SMAW		0,66-0,85	0,76
Soldadura GMAW	CO ₂ -Acero	0,75-0,93	0,84
	Ar-Acero	0,66-0,70	0,68
Soldadura GTAW	Ar-Acero	0,25-0,75	0,50
	He-Al	0,55-0,80	0,68
	Ar-Al	0,22-0,46	0,34

Sin embargo, a pesar de ser procesos de unión permanente en los que se pueden alcanzar altas eficiencias térmicas, estos requieren de altas entradas de energía térmica para lograr la fusión de los materiales a unir. La gran cantidad de calor depositado en la junta soldada promueve la generación de discontinuidades por solidificación y afecta la microestructura del área circundante, disminuyendo sus propiedades mecánicas y, en consecuencia, el desempeño del componente soldado. Esto se representa mediante el esquema de la figura 4.

Figura 4. Relación entre el procesamiento-microestructura-propiedades y desempeño de una unión metálica [3].

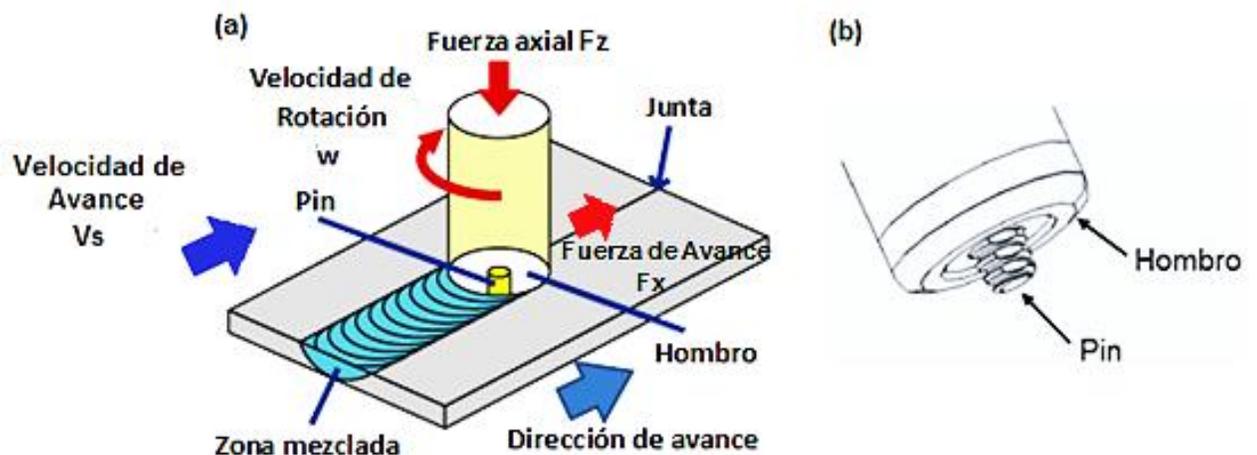


La estrecha relación que existe entre el procesamiento, la microestructura, las propiedades mecánicas y el desempeño del material o producto a soldar, contribuye a que presentarse un consumo elevado de energía durante el proceso de soldadura se generen efectos termomecánicos en el cordón de soldadura y sus alrededores. Actualmente se desarrollan investigaciones que buscan lograr la implementación y adaptación tecnológica de proceso de soldadura en estado sólido. Dentro de este grupo de procesos se encuentra la soldadura por fricción agitación SFA (en inglés Friction Stir Welding FSW) [10].

2.1.2. Soldadura por fricción-agitación

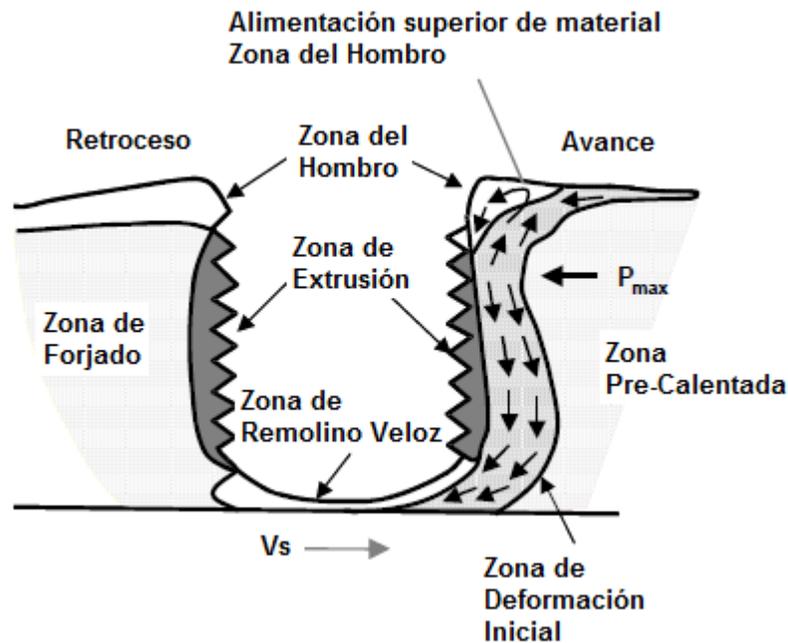
La soldadura por fricción-agitación SFA consiste en la unión de dos materiales en estado sólido empleando una herramienta cilíndrica rotativa; esta última consta de dos elementos unidos rígidamente conocidos como hombro y pin (ver Figura 5). La herramienta es insertada por la acción de una fuerza axial hasta que la parte del hombro hace contacto con la superficie de las piezas a soldar; posteriormente la herramienta se desplaza paralelamente a la junta para formar el cordón de soldadura. La Figura 5 ilustra el proceso de soldadura por fricción-agitación e identifica sus principales parámetros y variables.

Figura 5. Proceso de soldadura por fricción-adaptación. (a) Esquema del proceso. (b) Herramienta para soldadura por fricción-agitación conformada por un hombro y un pin tratado térmicamente. [25].



El calor generado por la fricción entre el hombro de la herramienta y la superficie de la junta, sumado a la acción del pin promueve la deformación plástica severa del material. En la figura 6 se observa como esta deformación produce un desplazamiento del material a medida que la herramienta rotativa avanza por la junta. El lado de la junta donde la dirección de rotación del hombro corresponde con la dirección de la soldadura se conoce como “lado de avance”, y el lado donde las direcciones se oponen se denomina “lado de retroceso” [5]. Al concluir exitosamente el proceso de soldadura se obtiene un cordón uniforme que ha penetrado hasta la raíz de la junta sin presentar discontinuidades por solidificación y con bajos efectos térmicos sobre el material base. Este cordón de soldadura se caracterizará por no requerir de material de aporte, una estructura más fina, menor nivel de tensiones residuales, ausencia de discontinuidades por solidificación, bajos requerimientos de preparación de la junta y una resistencia a la corrosión superior a la obtenida por los procesos convencionales de soldadura [26].

Figura 6. Deformación Plástica alrededor de la herramienta en movimiento a una velocidad contra la presión P_{\max} [27].



2.1.2.1. La herramienta para SFA

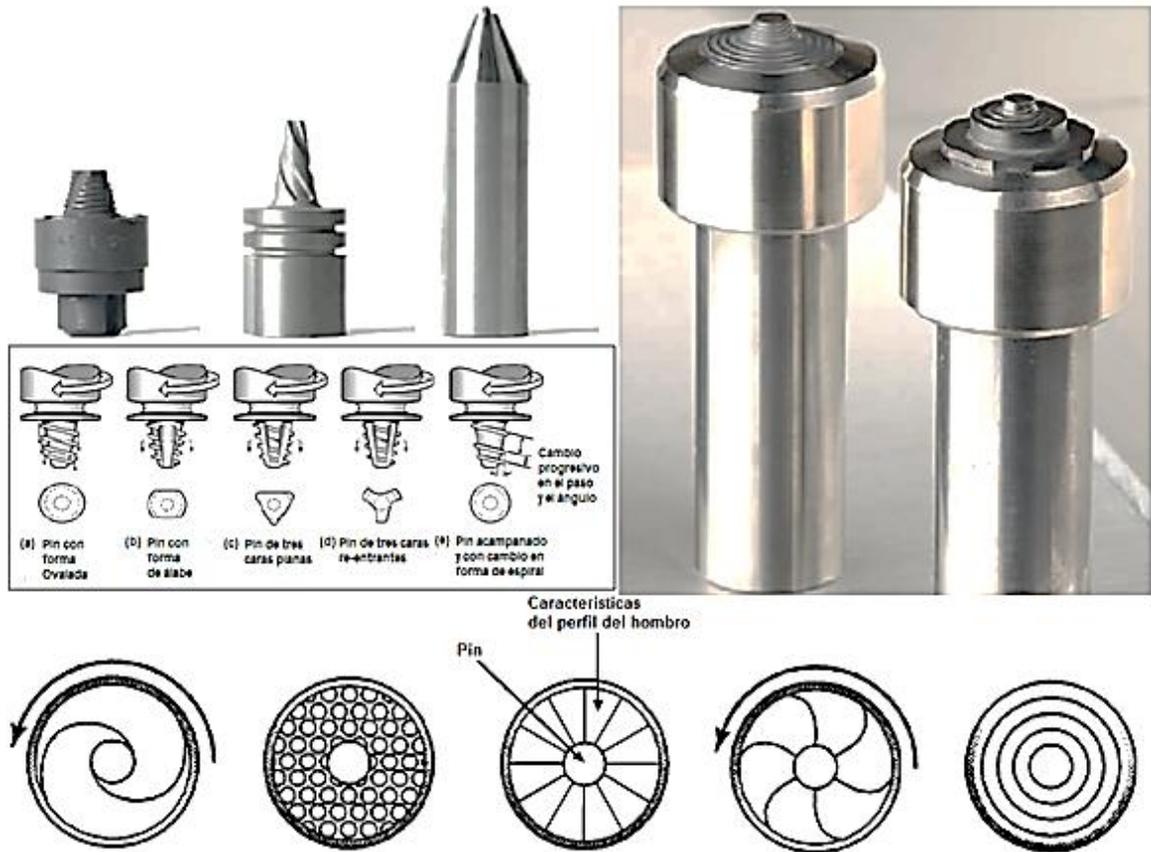
Las herramientas empleadas en el proceso de soldadura por fricción-agitación se encargan de cumplir tres funciones básicas [14]:

1. Calentar la pieza de trabajo para facilitar la deformación plástica del material. Esto se logra debido a la fricción que tiene lugar entre la superficie del hombro y del pin de la herramienta con la superficie del material a soldar.
2. Mover un volumen de material mediante el trabajo de agitación realizado por el pin y el desplazamiento de la herramienta a través de la junta. Esto logrará que se realice la coalescencia de los materiales o el llamado cordón de soldadura.
3. Confinar el material deformado. Durante el proceso de deformación el material se encuentra en movimiento y se comporta como un fluido, por ende, el hombro realiza una presión constante del material contra la base de apoyo de la máquina para impedir la salida de material por debajo y por encima del espesor de las placas.

Con el propósito de lograr que se garantice el cumplimiento efectivo de estas funciones, el diseño de las herramientas para el proceso de soldadura por fricción-agitación es crítico que se evalúe cada aspecto como geometría, dimensiones, material del fabricación, revestimiento o tratamiento térmico, etc.

La selección adecuada de la geometría de la herramienta logrará optimizar el proceso de generación y aprovechamiento del calor en las operaciones de forjado y extrusión del material base, ofreciendo beneficios como alcanzar una mayor eficiencia del proceso. En la figura 7 se presentan los diseños de herramientas para SFA más comunes.

Figura 7. Diseño de herramientas de trabajo para la soldadura por fricción-agitación. Distintas geometrías modificando el perfil del hombro y el pin de la herramienta [28].



2.1.2.2. Parámetros de Operación del Proceso SFA

El proceso de soldadura por fricción-agitación se desarrolla bajo unos parámetros de operación que influyen en la junta soldada resultante. Estas variables se describen a continuación:

 Velocidad de avance (v_s), este parámetro hace referencia a la velocidad con la que se desplaza la herramienta a lo largo de la junta soldada. Sus unidades son mm/min.

 Velocidad de rotación (ω), este parámetro hace referencia a la velocidad angular con la que gira la herramienta. Sus unidades son RPM.

 Fuerza de avance (F_x), este parámetro surge como la fuerza de empuje resultante generada con el movimiento de avance de la herramienta a lo largo de la junta. Sus unidades son kN.

 Fuerza axial (F_z), este parámetro hace referencia a la fuerza que ejerce la herramienta sobre el material de trabajo para comprimirlo y restringir su movimiento para que se lleve a cabo solo en la zona agitada. Sus unidades son kN.

 Angulo de inclinación (θ), este parámetro hace referencia al ángulo que se le coloca a la herramienta de trabajo para favorecer el movimiento de material. Esta variable trabaja con valores de 1° a 2° comúnmente.

 Penetración (p), este parámetro hace referencia a la porción del pin que va a introducirse sobre el espesor del material a soldar; por ende, el siempre tiende a ser un valor cercano a este. Sus unidades son mm.

 Dwell time, este parámetro corresponde al tiempo que se mantiene la herramienta en contacto con la superficie del material a soldar una vez completada la etapa de penetración. Sus unidades son seg.

 Torque (τ), hace referencia al trabajo mecánico realizado por la herramienta sobre el material de trabajo, cada vez que realiza el movimiento rotacional para deformar plásticamente el material. Sus unidades son $N \cdot m$.

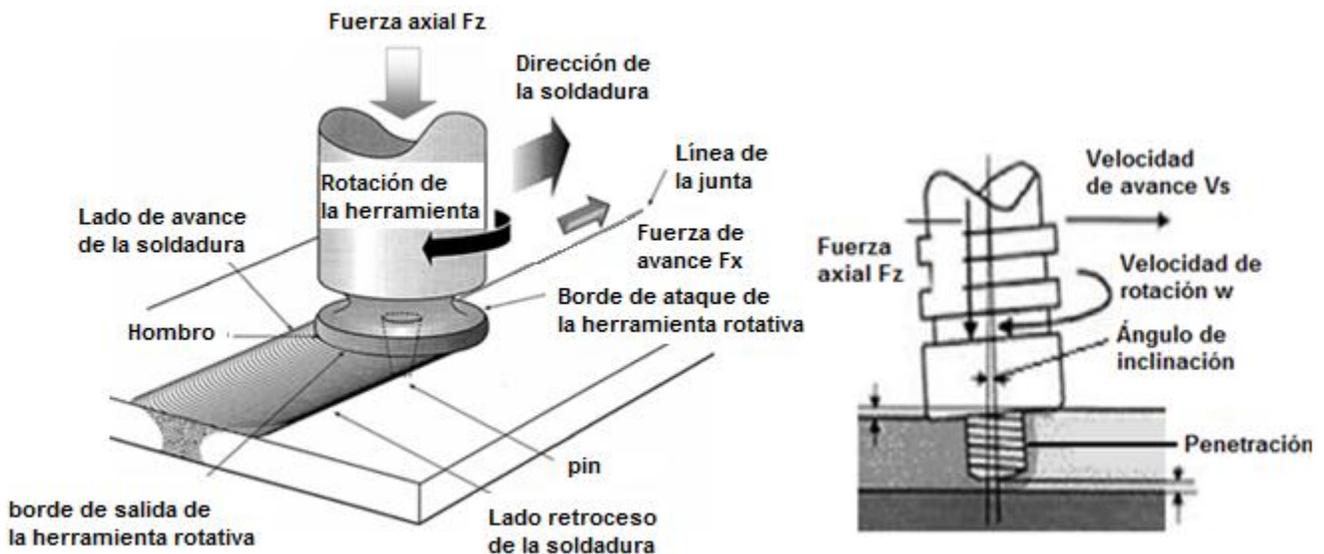
A diferencia de los parámetros previamente mencionados, el torque no es una variable de salida. Por tal motivo, debe medirse, ya que esta surge como respuesta a la oposición del material a ser deformado y sus valores cambian en función del tiempo. Sin embargo, dentro de la etapa cuasi estacionaria del proceso el valor del torque puede asumirse como constante, debido a que la entrada de calor se ha estabilizado, por lo cual, el material base ha alcanzado la temperatura de trabajo

fija. A esta temperatura de trabajo el material base presenta una viscosidad establecida. Como la viscosidad de un material depende de la temperatura y esta no varía, en consecuencia, el torque requerido por el proceso tampoco.

Querin et. al. [29] plantea un modelo matemático con el cual se puede calcular el torque empleando la ecuación (2). Esta ecuación relaciona el esfuerzo de fluencia σ_{flujo} con la función obtenida por z que es la distancia de la fuente de calor y r que es el espesor de la placa, función correspondiente a la inversa de la calculada para la forma de la zona agitada o nugget.

$$\tau = \int \sigma_{flujo} \times (2\pi r^2) \times \sqrt{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2} dz \text{ Ec. (2)}$$

Figura 8. Parámetros de operación para el proceso de soldadura por fricción-agitación [29].



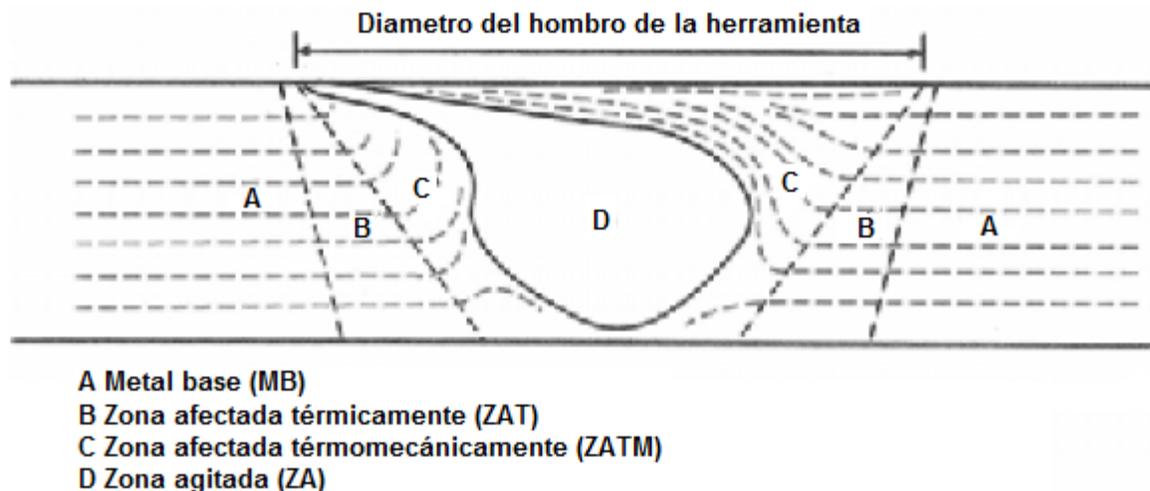
En la figura 8 se presentan la geometría de la herramienta y los parámetros de operación en el proceso de soldadura SFA. Estos constituyen factores influyentes en la forma y tamaño que tendrán las zonas generadas en las juntas durante el proceso de soldadura, así como, en la microestructura y las propiedades mecánicas de la junta [30].

2.1.2.3. Zonas presentes en la junta soldadas por fricción agitación

Al concluir el proceso de soldadura por fricción-agitación se puede observar el cordón de soldadura generado en el material de trabajo. Si se realiza un corte transversal a lo largo del material y se pule adecuadamente la superficie, se podrá observar las distintas zonas microestructurales de la junta soldada. Cada zona tiene características metalúrgicas y propiedades mecánicas específicas.

Threadgill fue la primera persona en clasificar la microestructura obtenida por FSW [31] [32]. En este estudio la descripción de la microestructura y de las diferentes zonas afectadas por el trabajo plastificante y/o el calor introducido al proceso correspondían con la microestructura encontrada en los cordones de soldadura de la mayoría de metales y aleaciones, sin embargo, difería de la encontrada en el aluminio. Por tanto, la sociedad americana de soldadura (AWS) adoptó una descripción más exacta y estándar bajo la norma D17.3M, que describe la microestructura del aluminio y las zonas que la constituyen [8]. Las diferentes zonas presentes en la microestructura son mostradas en la figura 9 para favorecer su comprensión y distinción [29].

Figura 9. Zonas presentes en la microestructura de juntas soldada por fricción-agitación para el aluminio (Lado de avance está ubicado a la izquierda) [30].



En orden alfabético partiendo del borde del material a soldar hacia la fuente de calor, se tiene:

 Metal Base – Zona A: En esta zona el material no es afectado por el proceso; de hecho, cuenta con las propiedades mecánicas y microestructura original del material antes de realizar la unión.

 Zona Afectada térmicamente (ZAT) – Zona B: Esta zona recibe este nombre debido a que la entrada de calor proveniente del proceso eleva la temperatura de la zona al punto de generar cambios en su microestructura. Se asemeja este fenómeno al desarrollo de un tratamiento térmico sobre la zona.

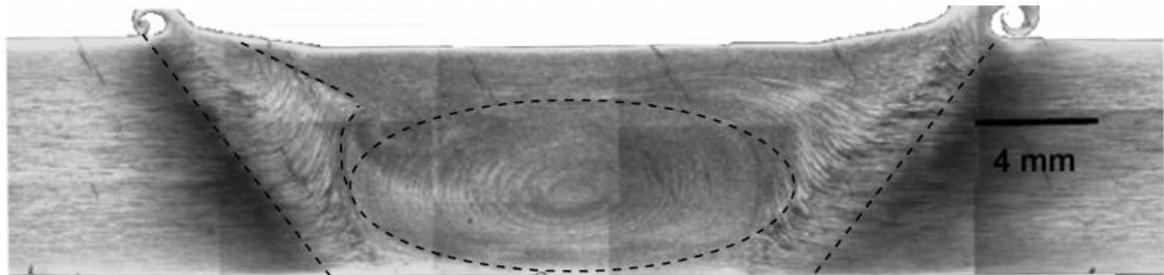
 Zona Afectada Termomecánicamente (ZATM) – Zona C: Esta zona es afectada tanto por la entrada del calor del proceso como por el trabajo mecánico sobre el material, por lo cual, esta zona presenta cambios microestructurales notorios con respecto a las zonas descritas anteriormente, ya que la orientación de los granos es distinta. Esta zona presenta una forma trapezoidal cuya base corresponde al diámetro del hombro.

 Zona Agitada (ZA) – Zona D: En esta zona se observa el material agitado por el pin. La microestructura en esta zona se caracteriza alcanzar la temperatura de recristalización del material debido a la introducción de calor, y junto con la alta deformación mecánica a la cual fue sometida el material se genera un grano fino y direccionado en forma de remolino o nuez, por esta razón recibe también el nombre de Nugget.

Existen casos de soldadura por fricción agitación de aluminio donde no se genera una considerable deformación plástica, sin generar recristalización. En consecuencia, para estos casos resulta difícil distinguir la zona agitada y la zona termo mecánicamente afectada [31].

La geometría de la herramienta SFA tiene influencia en la microestructura obtenida por el proceso. En el caso del hombro un aumento de la superficie de contacto incrementa la entrada de calor del proceso, en consecuencia, la temperatura de proceso en el centro del cordón. La adición de cavidades o grabados tanto en el perfil del hombro como en el perfil del pin favorecen la deformación plástica del material, generando un incremento en el ancho de la ZATM (ver figura 10) [33].

Figura 10. Macrografía de una junta soldada de AA2195 que muestra una forma de aros cebolla y la ZTMA [30]



2.1.2.4. La Máquina para el proceso SFA

Las máquinas para el desarrollo de soldaduras por fricción-agitación varían de acuerdo con las especificaciones del cliente y/o requerimientos de diseño.

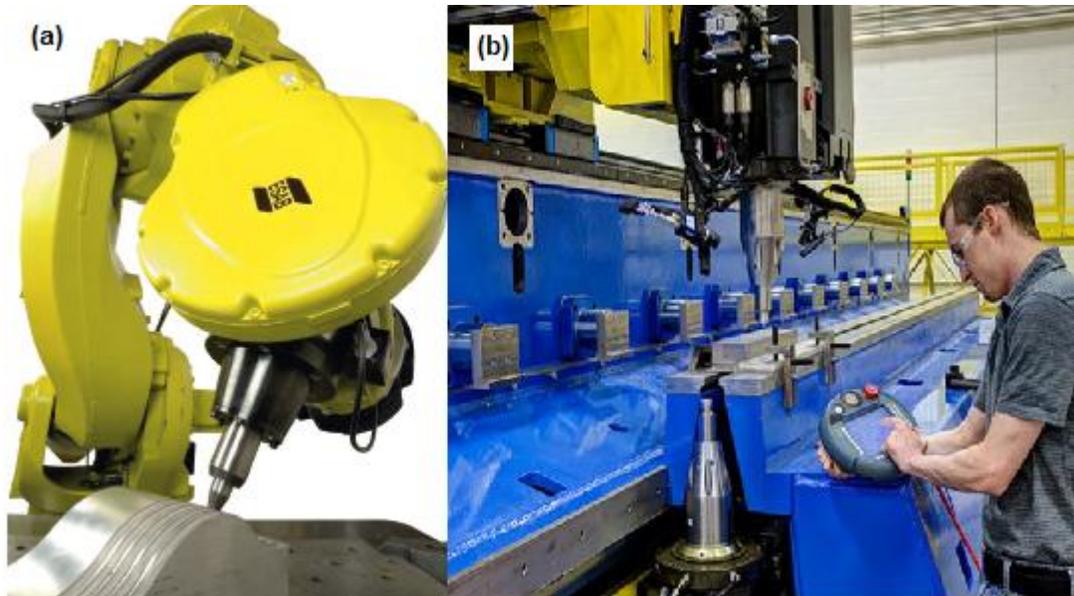
2.1.2.4.1. Máquinas especializadas para el proceso SFA

Las máquinas especializadas para el proceso SFA son equipo diseñados con el fin de controlar los parámetros de operación y tener un seguimiento del proceso durante cada etapa. Como consecuente cuentan con sensores que realizan la medición de variables de salida (torque, fuerza axial, fuerza de avance, potencia) en tiempo real. Los diseños de estos equipos varían de acuerdo al intervalo de trabajo de los parámetros operacionales necesarios para soldar un material o materiales específicos, en la figura 11 se muestran algunos equipos empleados en este proceso. Los brazos robóticos por ejemplo, permiten desplazar trayectorias complejas con cambio posición en los tres ejes de coordenadas (x,y,z) al tiempo, sin embargo no soportan una carga axial elevada [28]. Por el contrario, las máquinas de alto porte cuentan con una alta potencia y una estructura robusta que permite soldar materiales con elevado punto de fusión y de espesores gruesos. La desventaja de estos equipos es que la trayectoria de desplazamiento de la herramienta solo permite mover hasta dos ejes al tiempo.

Los equipos especializados cuentan con un sistema de control de posición o control de fuerzas. El primero es comúnmente para soldar materiales de bajo punto de fusión donde se debe controlar la posición de la herramienta, ya que al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad del material base y la herramienta puede sobrepenetrar este. El segundo se utiliza para soldar materiales de alto punto de fusión, resistencia y espesor, para los cuales se requiere mantener las fuerzas de

trabajo constantes para mantener el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo a lo largo del cordón, así poder generar el calor y trabajo mecánico para soldar la junta.

Figura 11. Maquinas especializadas SFA. (a) Brazo robótico [28] (b) Maquina de mayor capacidad [34].



Sin embargo, todos estos equipos especializados coinciden en que son altamente costosos. Por esta razón, es que los investigadores que no cuentan con los recursos económicos para comprar estos equipos están optando por adaptar otras máquinas, como las fresadoras. Estas son máquinas herramientas las cuales son ajustadas, equipadas y adicionadas con equipo de medición para ejecutar el proceso de soldadura por fricción agitación.

2.1.2.4.2. Máquinas adaptadas para el proceso SFA

La adaptación de máquinas fresadoras se puede llevar a cabo fácilmente debido a que los principios de funcionamiento entre un proceso de fresado y la soldadura SFA son semejantes. La diferencia en el funcionamiento radica en los sistemas de medición de variables de salida, los equipos de control de variables de proceso y por el hecho de que en el proceso de soldadura con la máquina herramienta el desplazamiento lo hace la mesa de trabajo y no la herramienta como en la máquina especializada. Otro desafío que deben enfrentar los investigadores, es incluir los equipos y herramientas que les permitan medir y controlar parámetros operacionales y las variables de salida del proceso, elementos que ya vienen

incorporados en algunas máquinas especializadas de soldadura por fricción agitación. En la figura 12 se presenta una maquina fresadora adaptada para el proceso SFA.

Figura 12. Distintos tipos de máquinas para desarrollar la soldadura por fricción-agitación [35].



2.1.3. Análisis Energético Del Proceso

Los modelos de evaluación termodinámico del proceso SFA planteados en la literatura determinan las temperaturas alrededor de la zona soldada para obtener el aporte térmico sobre el material soldado [36] [37]. Sin embargo, no consideran la relación que existe entre la generación de calor, el flujo de material y la fricción, por lo que no permiten obtener una predicción certera de los ciclos térmicos. Es un indicador de compra para cualquier cliente en contemplar la demanda de consumo de energía y tipos de trabajo que son desarrollados por la máquina-herramienta en el análisis térmico [38]. En esta sección se presentan los modelos más relevantes:

Cui y Vilaca et al., realizaron un análisis de la generación de calor en función de la geometría de la herramienta y los parámetros de soldadura [39] [26] [40]. Estos modelos servirán de base para el desarrollo de este trabajo. Para el desarrollo del modelo térmico del proceso SFA es necesario conocer los valores de los parámetros principales durante la operación tales como torque, velocidad de avance, velocidad de rotación, fuerza axial y fuerza vertical aplicados, así como la distribución de temperatura en el metal de base. Para esto se requiere de dispositivos de medición que registren esta información. Con todos los datos recolectados de las variables de salida del proceso se calcula la potencia mecánica entregada por la herramienta en la junta.

Los datos mecánicos del proceso SFA se emplean para el cálculo de la potencia entregada por la herramienta dentro de la junta soldada, planteando así la Ecuación (3), donde la potencia mecánica P_{mec} (W), el torque del proceso τ (Nm), la velocidad angular w (rpm), la fuerza en el plano de avance F_x (N) y la velocidad de avance v_s (mm/min) son requeridos [41].

$$P_{mec} = (\tau \times w) + (F_x \times v_s) \text{ Ec. (3)}$$

Para calcular la eficiencia mecánica del proceso se necesita conocer la energía que requiere la máquina para su funcionamiento. La máquina trabaja con un motor eléctrico por lo que, se encarga de transformar la potencia eléctrica en potencia mecánica. Sin embargo, no toda la potencia eléctrica que entra a la maquina aparece en forma útil en la herramienta de trabajo ya que siempre hay perdidas en el proceso por transmisión. Así, que para calcular la eficiencia mecánica η_{mec} se emplea la ecuación (4) [42].

$$\eta_{mec} = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \times 100\% \text{ Ec. (4)}$$

Como la diferencia entre la potencia de entrada P_{ent} y la potencia de salida P_{sal} de la maquina corresponde a las pérdidas por transmisión, esta se expresa en la ecuación (5):

$$\eta = \frac{P_{entrada} - P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100\% \text{ Ec. (5)}$$

La ecuación (5) es de uso general y puede aplicarse para cualquier equipo o proceso que se lleve a cabo, simplemente se debe reemplazar la potencia de entrada y de salida según corresponda. En este trabajo la potencia de entrada está dada por la relación de la ecuación (6) [43] y la potencia de salida sería igual a la potencia mecánica determinada por la ecuación (3).

$$P_{eléc} = V \times I \times \cos\varphi \text{ Ec. (6)}$$

Donde, la potencia eléctrica $P_{eléc}$ está en función del voltaje (V) en voltios de trabajo de la máquina; la corriente demandada I en amperios y el factor de potencia conocido como coseno de φ . Este factor debe aparecer en la ficha del motor de la máquina herramienta, de no conocerlo se puede determinar empleando un vatímetro.

Comúnmente los motores empleados en las máquinas herramientas trabajan con corriente AC. Las pérdidas en un motor AC pueden ser generadas por [42]:

- Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre: Estas son generadas por el calentamiento resistivo que tiene lugar en el estator (armadura) y/o rotor (campo) de la máquina.
- Pérdidas en el núcleo: Estas pérdidas son causadas por histéresis y por corrientes parasitas en la parte metálica del motor.
- Pérdidas mecánicas: Estas tienen lugar debido a rozamiento mecánico entre componente o con el aire.
- Pérdidas dispersas o pérdidas misceláneas: Son aquellas pérdidas que no corresponden a ninguna de las categorías previamente mencionadas, normalmente se le atribuye un valor del 1% de la carga plena.

Reemplazando las ecuaciones (3) y (6) en (4), tenemos que:

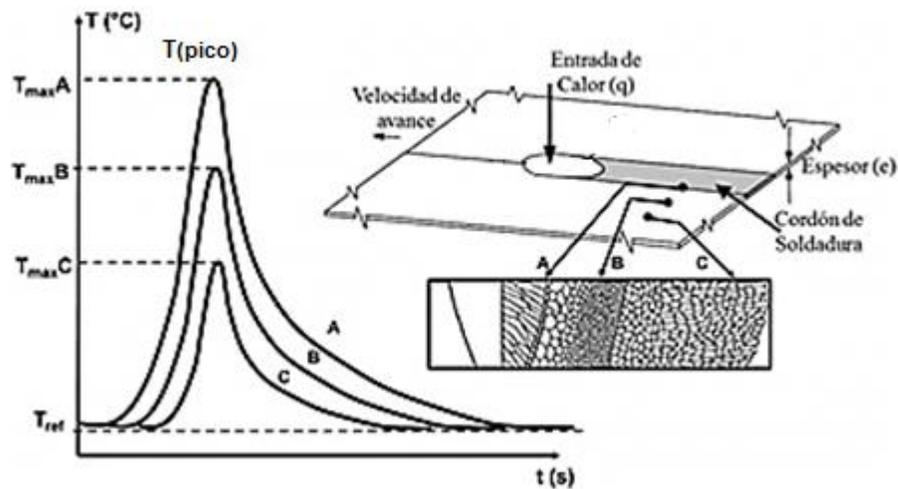
$$\eta_{Mec} = \frac{P_{mec}}{P_{eléc}} \times 100\% = \frac{[(\tau \times w) + (F_x \times v_s)]}{(P \times I \times \cos\varphi)} \times 100\% \text{ Ec. (7)}$$

Posteriormente para calcular la eficiencia térmica del proceso se emplean un modelo de transferencia de calor por conducción de placa finita que estime el calor generado. Para alimentar el modelo con los datos correspondientes a los ciclos térmicos medidos durante el proceso, para lograr esto se emplea en un grupo de termopares instalados en el metal de base y en algunos casos la herramienta de

trabajo, y mediante un equipo de adquisición de datos se miden los ciclos térmicos, que permitan conocer la distribución de temperaturas durante el proceso SFA.

Los ciclos térmicos son la representación graficas del cambio de temperatura en función del tiempo con respecto a un punto de análisis ubicado dentro del volumen de un componente que está siendo expuesto a una fuente de calor, en este estudio, una placa soldada por fricción-agitación. En la medida que el punto de análisis se encuentre más cerca de la fuente de calor mayor será la temperatura pico (máxima) registrada así, como su tasa de enfriamiento tal como se observa en la figura 13 [15].

Figura 13. Ciclos térmicos presentes en distintas zonas de la junta soldada [15].



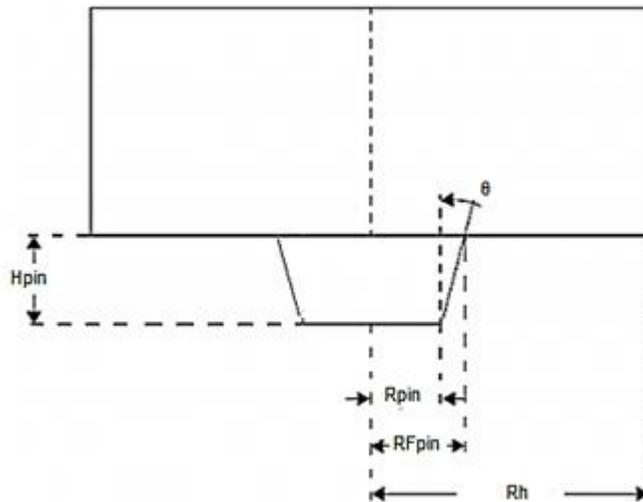
En algunos modelos matemáticos emplean las temperaturas cercanas a la zona agitada (ZA) para determinar las pérdidas hacia la base y la herramienta por conducción y al medio por convección [44]. Estos modelos serán presentados más adelante.

El modelo matemático expuesto por Shivaji y Adepu [45] resulta una herramienta útil para el cálculo del calor generado durante el proceso de soldadura por fricción agitación. La ecuación involucra el calor generado por la acción del hombro, de la periferia del pin y de la superficie en la punta del pin.

$$\begin{aligned}
Q_{Total} = & \underbrace{\frac{2}{3} \times \pi \times \tau_{contacto} \times (R_H^3 - R_{pin}^3)}_{\text{Calor Introducido por el hombro}} + \underbrace{\frac{\pi \times w \times \tau_{contacto}}{2} \times \frac{H_{pin}}{\cos \alpha} \times (R_{Fpin} + R_{pin})^2}_{\text{Calor Introducido por la periferia del pin}} \\
& + \underbrace{\frac{2}{3} \times \pi \times w \times \tau_{contacto} \times R_{pin}^3}_{\text{Calor introducido por la superficie en el extremo del pin}}
\end{aligned} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde, Q_{Total} es el calor total generado (w), R_h hace referencia al radio del hombro, R_{pin} es el radio mayor del pin o el radio del pin que se encuentra sobre la superficie del hombro, R_{Fpin} es radio en el extremo o punta del pin, w es la velocidad angular de trabajo en rpm, $\tau_{contacto}$ es el esfuerzo cortante generado en el material por la deformación plástica y θ que es el ángulo de inclinación del pin. Los parámetros correspondientes a la geometría de las herramientas se observan en la figura 14.

Figura 14. Parámetros dimensionales de la herramienta de trabajo para la soldadura SFA [45].



Tal como lo muestra la figura 11, se tiene que [45]:

$$R_{ipin} = R_{Fpin} - (H_{pin} \times \tan \theta) \quad \text{Ec. (9)}$$

Al reemplazar la ecuación (9) en (8), se obtiene [45]:

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \times \pi \times w \times \tau_{contact} \left[R_{Hombro}^3 - R_{Fpin}^3 + \frac{3}{4} \times \frac{H_{pin}}{\cos \alpha} \times (2 \times R_{Fpin} - H_{pin} \times \tan \theta)^2 + (R_{Fpin} - H_{pin} \times \tan \theta)^3 \right] \text{Ec. (10)}$$

Si la herramienta de trabajo tuviera pin cilíndrico, se añadiría al estudio el cálculo a la ecuación (11) [45].

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \times \pi \times w \times \tau_{contacto} \times (R_H^3 + 3 \times H_{pin} \times R_{Fpin}^2) \text{Ec. (11)}$$

El esfuerzo cortante $\tau_{contacto}$ se estima que está en función de la presión ejercida por la herramienta sobre el material de trabajo. La presión es igual a la fuerza aplicada F_z sobre el área por debajo del hombro A [45], (ver ecuación 11).

$$\tau_{contacto} = \mu p = \mu \times \frac{F_z}{A} \text{Ec. (12)}$$

El coeficiente de fricción μ generado por el contacto entre la superficie del hombro y la superficie del material de trabajo, corresponde a una variable que influye para el cálculo de entrada de calor al proceso SFA [46]. En consecuencia, se debe ser crítico al momento de establecer un valor para esta variable. Es importante tener en cuenta, que el coeficiente de fricción depende de la temperatura alcanzada en la interface de contacto, por esta razón autores como Biswas et. al. [33] evalúan en sus trabajos este aspecto empleando tablas como la tabla 3 presentada a continuación:

Tabla 3. Dependencia del coeficiente de fricción con respecto a la temperatura para Aluminio-Acero [33].

Coeficiente de fricción entre las superficies en contacto de Aluminio y Acero dependiente de la temperatura	
Temperatura (°C)	Coeficiente de fricción, μ
22	0,11
160	0,11
200	0,26
400	0,35
580	0,47

También es posible calcular el coeficiente de fricción a través de la ecuación (13), en función del torque τ , el radio del hombro R_H y la fuerza axial F_z [47].

$$\mu = \frac{\tau}{R_{Hombro} \times F_z} \text{ Ec. (13)}$$

La relación entre la entrada de calor y la eficiencia térmica se establece en la Ecuación (14), la cual emplea la potencia térmica P_{ter} (W), la entrada de calor Q_{total} (W) y las pérdidas energéticas $Q_{pérdidas}$ de la fuente de calor a sus alrededores.

$$P_{term} = Q_{total} - Q_{pérdidas} \text{ Ec. (14)}$$

Las pérdidas generadas durante el proceso son determinadas gracias a las ecuaciones (15 a 17) [44]:

Las pérdidas por conducción hacia la base de apoyo Q_a para las placas son calculadas a partir del radio del pin R_{pin} para herramientas con pin cilíndrico, de

trabajar con un pin cónico se emplea un radio promedio $R_{Promedio}$, el coeficiente de conducción de la mesa k_{mesa} , la temperatura ambiente T_0 (Se asume de acuerdo a condiciones estándares ISO la temperatura ambiente a 25°C a 1 atmosfera de presión) y la temperatura en la interface pin-pieza de trabajo del proceso T . Autores como Biswas et. al. afirman que la temperatura en esta zona corresponde al 80% de la temperatura de fusión del material a soldar [33]. El diámetro promedio y las pérdidas de calor hacia la base se relacionan a continuación en las ecuaciones (15) y (16).

$$R_{promedio} = \frac{R_{pin} - R_{Fpin}}{2} \text{Ec. (15)}$$

$$Q_a = 2 \times \pi \times R_{pin} \times k_{Base} \times (T - T_0) \text{Ec. (16)}$$

Las pérdidas por conducción hacia la herramienta de trabajo Q_s están dadas por la conductividad térmica del material de la herramienta k_s , el radio del hombro R_{Hombro} y la longitud de la herramienta L_s , como lo muestra la ecuación (17).

$$Q_s = \frac{k_s \times \pi \times R_H^2 \times (T - T_0)}{L_s} \text{Ec. (17)}$$

Las pérdidas por convección con el aire están dadas por la velocidad de avance v_s , la capacidad calórica volumétrica ρc , la altura del pin H_{pin} y el radio del hombro R_h , como lo muestra la ecuación (18).

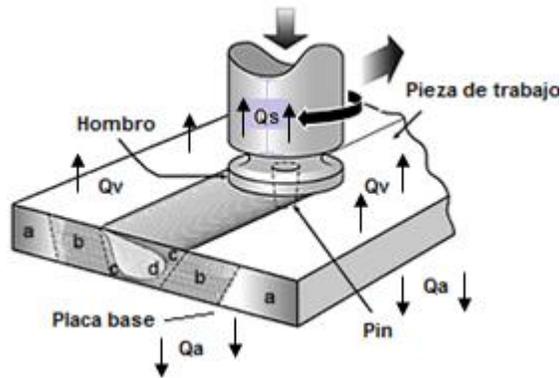
$$Q_v = 2 \times R_h \times H_{pin} \times \rho c \times (T - T_0) \text{Ec. (18)}$$

Finalmente, La eficiencia térmica puede determinarse en función de la relación (w/v_s) y la fuerza vertical F_z como se muestra en la Ecuación (19) [48].

$$\eta_{therm}\left(\frac{v_w}{v_s}; F_z\right) = \frac{Q_{Total} - Q_{perdidas}}{P_{mec}} \times 100\% = \left(\frac{P_{term}}{P_{mec}}\right) \times 100\% \text{ Ec. (19)}$$

En la figura 15 se representan las pérdidas de calor que tienen lugar durante el proceso, previamente expuestas.

Figura 15. Pérdidas de calor por conducción y convección que tienen lugar durante el proceso de soldadura SFA [49].



H. Schmith et. al. [1] establecen tres (3) enfoques con los cuales plantea tres modelos matemáticos de estudio para el proceso los cuales trabajan con las variables descritas en las ecuaciones (16 a 19). Cada enfoque evalúa una condición de comportamiento del flujo de material agitado durante el proceso SFA. Estas condiciones son:

I. Deslizamiento. Condición en la que el flujo de material es desplazado por la herramienta sin adherencia alguna a la superficie de la herramienta. En ese caso el esfuerzo cortante en la zona agitada igual a la ecuación (11), y el calor generado por el proceso es calculado por medio de la ecuación (20)

$$Q_{Total, Deslizamiento} = \frac{2}{3} \pi \mu p w [(R_H^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan \theta) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin}] \text{ Ec. (20)}$$

II. Adherencia. El flujo de material se adhiere a la superficie de la herramienta lo que provoca la generación de capas de material que se desplazan a diferentes velocidades; siendo la velocidad de movimiento del material más baja a medida que se acerca al centro del cordón. Para este caso de estudio el esfuerzo de contacto

depende del esfuerzo de fluencia del material σ_{yield} , el cual está dado por la ecuación (21).

$$\tau_{contacto} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \text{ Ec. (21)}$$

Reemplazando en la ecuación (20) la ecuación (21), se tiene que:

$$Q_{Total,Adherencia} = \frac{2}{3} \pi \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \left[(R_H^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan \theta) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin} \right] \text{ Ec. (22)}$$

III. Adherencia/deslizamiento parcial. Esta condición es la mezcla entre las condiciones I y II. En este caso el calor generado es:

$$Q_{Total} = \delta Q_{Total,Adherencia} + (1 - \delta) Q_{Total,Deslizamiento} = \frac{2}{3} \pi \left[\delta \tau_{yield} + (1 - \delta) \mu p \right] \text{ Ec. (23)}$$

$$\times w \left[(R_{hombro}^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan g \theta) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin} \right]$$

La esta ecuación (23) δ representa la parcialidad de las condiciones de deslizamiento y adherencia, sus valores se manejan entre $0 \leq \delta \leq 1$. Donde el valor 0 indica deslizamiento completo y el 1 corresponde a adherencia completa.

2.2. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, además del impacto al medio ambiente, uno de los aspectos a vigilar en los procesos de fabricación es el consumo energético, siendo la la evaluación de la eficiencia térmica (η_{Term}) el tema central. Su importancia radica en que su conocimiento posibilita el establecimiento de qué cantidad de energía es transformada de manera útil, lo que posteriormente se traduce en costos de operación y decisiones económicas trascendentales.

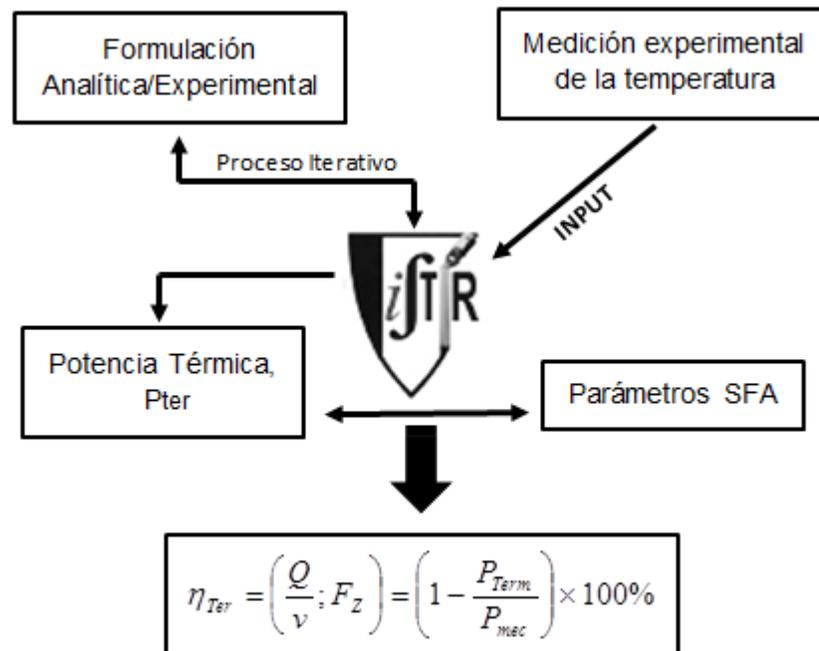
En la literatura se encuentran trabajos que calculan la eficiencia térmica del proceso SFA. En estos estudios se obtuvieron eficiencias superiores al 80%, e incluso 90%, validando el supuesto de ser un “proceso altamente eficiente”, planteado según bases teóricas [50]. Domiaty et. al. establecen que dado que el proceso se lleva a cabo en estado sólido, una gran porción de la energía de entrada en forma de trabajo mecánico es aprovechada en la generación de calor y deformación plástica del material, mientras el resto de energía se transfiere a los alrededores. El cálculo

de la eficiencia del proceso SFA se puede efectuar bajo diferentes enfoques, empleando modelos termo-mecánicos desarrollados por métodos analíticos, numéricos o por validación experimental [12]. Estos modelos planteados a su vez, se subdividen de acuerdo a la complejidad de este o al método de análisis, programa de simulación, o procedimiento experimental empleado. Con base en todos los métodos y modelos matemáticos planteados es posible establecer que aún no existe consenso con respecto a una metodología confiable y practica para el cálculo la entrada de calor, el trabajo mecánico realizado y eficiencia térmica del proceso SFA.

Vilaça et. al. [26], emplean un enfoque de tipo teórico experimental, bajo el cual realizan pruebas de soldadura SFA en juntas de aluminio 2024-T351 a partir de los cuales se recopila el torque generado bajo unos determinados parámetros de operación. Estos datos recolectados les permiten calcular la potencia mecánica requerida para hacer cada soldadura bajo tres condiciones de temperatura de las placas (fría, intermedia y caliente). Este estudio emplea un código computacional denominado “iSTIR” junto con los ciclos térmicos tomados en los ensayos realizados previamente para calcular la entrada de calor durante el proceso. Se obtiene la eficiencia térmica del proceso al relacionar la energía mecánica entregada y la energía térmica empleada en la junta. Obteniendo eficiencias térmicas del orden del 91% al 93%.

Al finalizar su trabajo los investigadores establecieron la correlación existente entre los parámetros de operación y las propiedades de la junta soldada, a partir de la correlación obtenida entre los parámetros operacionales y la eficiencia térmica del proceso, siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la figura 16:

Figura 16. Ingeniería inversa aprovechada utilizando la herramienta iSTIR para establecer la correlación entre los parámetros FSW y la eficiencia del proceso [26].



En este estudio realizado por Vilaça et. al. [26] se llevaron a cabo dos grupos de experimentos para placas de AA2024-T351 bajo tres niveles de entrada de calor denominados, frío para el nivel bajo, intermedio para el nivel medio y caliente para un nivel alto. Además, se emplearon dos tipos de geometrías de herramientas, cada una para un espesor de placa específico. En la aplicación 1 la herramienta contó con hombro cóncavo y pin cilíndrico roscado, esta trabaja con placas de 4mm. En la aplicación 2 la herramienta tuvo hombro con grabado en espiral y pin cónico roscado, esta herramienta se usó con placas de 3,2mm de espesor.

En el primer grupo de experimentos se evaluó la correlación entre la eficiencia térmica y los parámetros del proceso para diferentes fuerzas axiales y diferentes valores de R (relación entre la velocidad de rotación y la velocidad de translación). Estas pruebas permitieron hallar los parámetros de operación que alcanzaron una mejor calidad del cordón de soldadura para cada condición de trabajo. Durante las pruebas se llevó a cabo la medición de las siguientes variables la fuerza axial F_z , la fuerza de avance F_x , la fuerza transversal F_y , el torque τ y la temperatura T. Estos valores medidos son introducidos al código iSTIR para la modelación del proceso.

Conociendo las condiciones de trabajo y el torque generado durante el proceso se puede calcular la potencia mecánica introducida al proceso para el desarrollo de la soldadura. Los valores de potencia mecánica determinados para cada condición FSW también son presentados. En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos durante la primera etapa de experimentación para la aplicación 1.

Tabla 4. Parámetros de operación y variables de salida de la aplicación 1 bajo tres condiciones diferentes para el proceso FSW [26].

CONDICIÓN SFA	Velocidad Angular w (rpm)	Velocidad de avance v_s (mm/min)	Relación $R w/v_s$ (rev/mm)	Aplicación 1 Prueba No. 1				Aplicación 1 Prueba No. 2			
				Fuerza axial F_z (kN)	Fuerza de avance F_x (kN)	Torque τ (Nm)	Potencia mecánica (W)	Fuerza axial F_z (kN)	Fuerza de avance F_x (kN)	Torque τ (Nm)	Potencia mecánica (W)
CALIENTE	800	100	8	11	1.8	35	3000	14	2.3	40	3300
INTERMEDIA		200	4		2.5	42	3600		2.7	50	4200
FRÍA		400	2		2.7	46	3800		3.2	55	4700

Posteriormente, se utilizan los ciclos térmicos medidos para calcular las pérdidas generadas por conducción, para así determinar la entrada efectiva de calor al proceso empleando el código de análisis térmico y, en consecuente relacionarla con la potencia mecánica para conocer la eficiencia térmica del proceso SFA. Al realizar esto, se obtuvieron los resultados de la tabla 5.

Tabla 5. Ciclos térmicos, fuerza axial y calor registrado durante el proceso SFA para la aplicación 1 [26].

CONDICIÓN SFA	Caliente		Intermedia		Fría	
Ciclos térmicos a 14KN						
Fuerza axial F_z (kN)	11	14	11	14	11	14
Entrada de calor (J/mm)	320	325	330	335	420	430
Entrada efectiva de calor (J/mm)	180	290	100	100	70	70
Eficiencia térmica (%)	89.5	90	91	92	89	91

Conociendo el comportamiento de la eficiencia térmica η_{Ter} en función de la relación de parámetros de operación R (w/vs) bajo las tres condiciones planteadas, se procede a establecer la ecuación matemática que describa el comportamiento de la eficiencia térmica en función de la fuerza axial. En la tabla 6, se presentan los modelos.

Tabla 6. Correlación de la eficiencia térmica del proceso en función de las condiciones de trabajo para la primera etapa de investigación aplicación 2 [26].

<p>Correlación obtenida</p>	<p>Para $F_z = 11kN$ η_{Ter} $= -0,198R^2$ $+ 1,9928R$ $+ 96,036$</p> <p>Para $F_z = 14kN$ η_{Ter} $= -0,1804R^2$ $+ 1,7264R$ $+ 88,133$</p>	
------------------------------------	--	--

En la segunda etapa del estudio se persigue evaluar el comportamiento de las fuerzas medidas F_x , F_z y F_y durante el proceso, para las dos geometrías de herramientas usadas. El estudio mostró una reducción del 72% de la fuerza de avance para la aplicación 2, siendo que, esta tiene solo un 20% de diferencia de espesores de placas como se muestra en la tabla 7. También se puede observar que la fuerza transversal mostró para la aplicación 1 un incremento al disminuir la temperatura de trabajo de las placas, mientras que para la aplicación 2 esta se mantiene casi constante.

Esta tabla 7 se relaciona la entrada de calor a la junta, el calor efectivo aprovechado por el proceso y la eficiencia térmica obtenida durante la aplicación 2 con las tres condiciones FSW trabajadas. Al final se establece la relación matemática entre la eficiencia térmica y parámetro R para la aplicación 2 bajo las tres condiciones de temperatura de placa.

Tabla 7. Fuerzas medidas para las aplicaciones 1 y 2, y evaluación de eficiencia térmica con su correlación para la aplicación 2 [26].

CONDICIÓN SFA	Aplicación 1		
	Caliente	Intermedia	Fría
Fuerza avance Fx (kN)	1900	2500	2600
Fuerza transversal Fy (kN)	500	1300	2100
CONDICIÓN SFA	Aplicación 2		
	Caliente	Intermedia	Fría
Fuerza avance Fx (kN)	500	700	800
Fuerza transversal Fy (kN)	900	800	1200
Potencia mecánica (W)	2095	3353	5031
Calor de entrada (J/mm)	114	63,6	39,6
Eficiencia térmica (%)	91	94	95
Correlación térmica	$\eta_{Ter} = -0,0248R^2 - 0,3886R + 95,629$		

Al final del estudio se obtuvo como resultado la eficiencia térmica del proceso relacionando la energía mecánica de entrada con el calor de entrada a la junta, cuyos valores se caracterizaron por superar el 89%. En la aplicación 1 de experimentos se obtuvo una eficiencia máxima de 92% y para la aplicación 2 fue de 95%. Además, este estudio afirma que no se encontró dependencia significativa entre la potencia mecánica de entrada y el calor de entrada al proceso con respecto a la fuerza axial para la aplicación 1, dentro de los intervalos operacionales trabajados. Esto es contrario a lo planteado por los otros autores como Schmidt [1], cuyo modelado para el cálculo de calor incluye este parámetro y fue presentado previamente en el marco teórico.

Terry Dickerson et. al. [48], desarrollaron una metodología audaz, en su trabajo con placas de aluminio disimiles 6082-T6/2024-T3 al asumir que la entrada de calor al proceso es igual a la energía mecánica suministrada por la máquina. El calor del proceso es repartido, alrededor de un 90% [12] es utilizando en la generación de la

soldadura y el restante, se pierde a causa de la transferencia de calor por conducción hacia las partes en contacto. Sin embargo, estimaron que la única pérdida de calor importante tiene lugar en la herramienta de trabajo.

Para validar este supuesto los investigadores emplearon experimentación y el modelado térmico transitorio, empleando el programa ABAQUS/Standard para determinar las pérdidas del proceso a través de la herramienta de trabajo, y así, calcular la eficiencia térmica de este. Cabe destacar que estudios como el realizado por Biswas et. al. [33], han establecido que las mayores pérdidas de calor que tiene el proceso son las generadas por conducción de las piezas a soldar hacia la herramienta de trabajo (con un intervalo de 5-10%), por esta razón los investigadores desprecian las otras pérdidas generadas durante el proceso y solo se concentran en esta. Este hecho simplifica el estudio. Además, Dickerson et. al. [48], estudiaron la posibilidad de colocar un revestimiento con un material que se comporte como aislante sobre la herramienta que disminuya el flujo de calor hacia esta, y en consecuencia, incremente la eficiencia térmica del proceso. Para esto, los investigadores trabajaron con placas disimiles de aluminio y de magnesio con las características y parámetros de operación que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Detalles de las soldaduras utilizadas para el trabajo experimental [48].

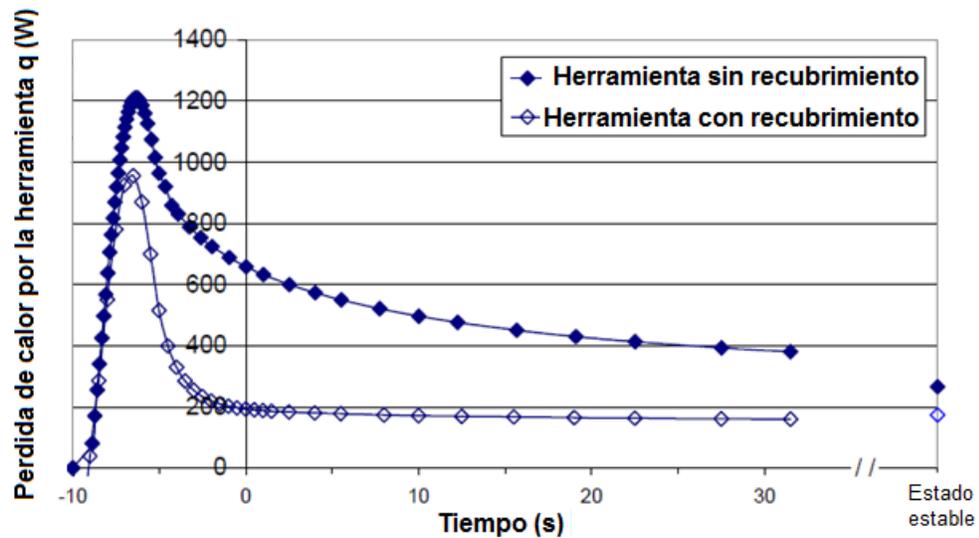
Combinación de materiales	Descripción	Velocidad angular w (rpm)	Velocidad de avance v_s (mm/min)	Entre una longitud de 60-70mm. Estado transitorio.			En estado estable		
				Calor de entrada P (W)	Perdidas de calor en la herramienta q (W)	Eficiencia térmica η_{Ter} (%)	Calor de entrada P (W)	Perdidas de calor en la herramienta q (W)	Eficiencia térmica η_{Ter} (%)
6082-T6/2024-T3	Aleaciones disimiles de aluminio	600	200	2492	428	83	2400	266	89
AM60/AM60	Aleación de magnesio	700	400	1827	425	77	1850	174	91

Asi mismo, Dickerson et. al. determinaron la entrada de calor en la junta y las pérdidas por conducción hacia la herramienta de trabajo, colocando termopares en la interface hombro-pieza de trabajo para establecer la temperatura en esta zona crítica. A pesar, de que se perdieron termopares durante las pruebas debido a trabajo de agitación por parte de la herramienta, se obtuvieron las lecturas

suficientes en esta zona y a sus alrededores para alimentar el modelo. Una vez los investigadores determinan los valores para la entrada de calor a la junta y las pérdidas en la herramienta, estos datos fueron relacionados para calcular la eficiencia térmica del proceso en soldaduras cortas y en soldadura de mayor extensión donde se logró alcanzar el estado estable, como se presenta en la tabla 9.

La figura 7 presenta los resultados del modelo de elementos finitos para soldaduras de aluminio con la herramienta de trabajo con y sin recubrimiento, el cual se muestra la reducción en las pérdidas de calor al implementar este recubrimiento.

Figura 17. Pérdidas de calor predichas a lo largo de la soldadura para herramientas con o sin recubrimiento [48].



Al finalizar el estudio los autores [48] concluyeron que las soldaduras que alcanzan el estado estacionario alcanzan eficiencias de alrededor del 90%, siendo el 10% restante pérdidas por conducción hacia la herramienta. En cambio, las soldaduras de poca longitud alcanzan eficiencias de 80% o menos. La propuesta de recubrir las herramientas mostro un decrecimiento de las perdidas hacia la herramienta y un aumento de la estabilidad del proceso, por lo cual, se considera que al implementar esta propuesta se pueden alcanzar eficiencias de hasta el 94% en soldadura cortas.

Yuh J. Chao et. al. [51], emplean termopares para medir la temperatura en la placa a soldar y en la herramienta, para posteriormente modelar el proceso con elementos finitos y determinar que porción de calor de entrada a la junta por fricción es realmente aprovechada por el proceso, y así, calcular la eficiencia térmica de este. Además, trabajan dos condiciones denominadas soldadura fría y soldadura normal. La soldadura normal se desarrolla a 240rpm de velocidad de rotación y 2,36mm/s

de velocidad de avance. Por otro lado, la soldadura fría utiliza la misma velocidad angular pero una mayor velocidad de avance de 3,32mm/s dando menos tiempo a que en el material base se genere calor por el trabajo de la herramienta. Este trabajo es similar al expuesto por Dickerson et. al. [48], la diferencia radica en la herramienta empleada para la modelación del proceso. En la tabla 9 se presentan los datos de la entrada de calor a la junta a soldar y las pérdidas de calor que tienen lugar hacia la herramienta de trabajo.

Tabla 9. Tasa de entrada de calor a la pieza y herramienta de trabajo para las dos condiciones establecidas [51].

Proceso de soldadura	Entrada de calor a la pieza de trabajo		Entrada de calor a la herramienta
	W o J/s	J/mm	W o J/s
Soldadura Normal	1740	737	86
Soldadura Fría	1860	560	85

En esta investigación desarrollada por Yuh J. Chao et al. [51] se logró obtener eficiencias de un 95%, donde solo el 5% restante constituye pérdidas por conducción hacia la herramienta de trabajo.

H.B. Schmidt et. al. [1] realizaron un trabajo en el que se plantea un modelo térmico analítico básico que emplea los parámetros operacionales basados en trabajos previos realizados por otros autores con aleaciones de aluminio, y se le compara con un modelo termomecánico empleando elementos finitos para mostrar la dependencia que existe entre la temperatura, el esfuerzo de flujo de material, y en consecuencia, la generación de calor. Este modelo termomecánico plantea la generación de calor a partir de la fricción y el trabajo plastificante que tienen lugar durante el proceso de soldadura FSW. La eficiencia térmica del proceso se calcula relacionando el calor total generado durante el proceso con el calor aprovechado para el desarrollo de la soldadura. Como resultado de este trabajo se logró establecer una eficiencia del 88%, para la cual el calor de entrada a las juntas generada fue de un 83% por el hombro, un 16% por el cono del pin y un 1% por la superficie plana en el extremo del pin.

A continuación, se presenta una tabla resumen del estado del arte presentado anteriormente.

Tabla 10. Resumen del estado del arte.

Referencia	Autores	Título	Material	Método de cálculo	Eficiencia térmica, η_{Ter} (%)	
					Aplicación 1	Aplicación 2
[26]	Pedro Vilaça et. al.	Quality assessment of friction stir welding joints via an analytical thermal model, iSTIR	AA2024-T351	Código analítico iSTIR y experimentación	Aplicación 1	89 (Promedio)
					Aplicación 2	93 (Promedio)
[48]	Terry Dickerson et. al.	Heat flow into friction stir welding tools	AA6082-T6/2024-T3	Análisis elementos finitos	89	
			AM60		91	
[11]	H. B. Schmidt et. al.	Thermal modeling of friction stir welding	AA2195-T8	Análisis elementos finitos	88	
[51]	Yuh J. Chao X. Qi et. al.	Heat transfer in friction stir welding experimental and numerical studies	AA2195-T8	Análisis elementos finitos	95	

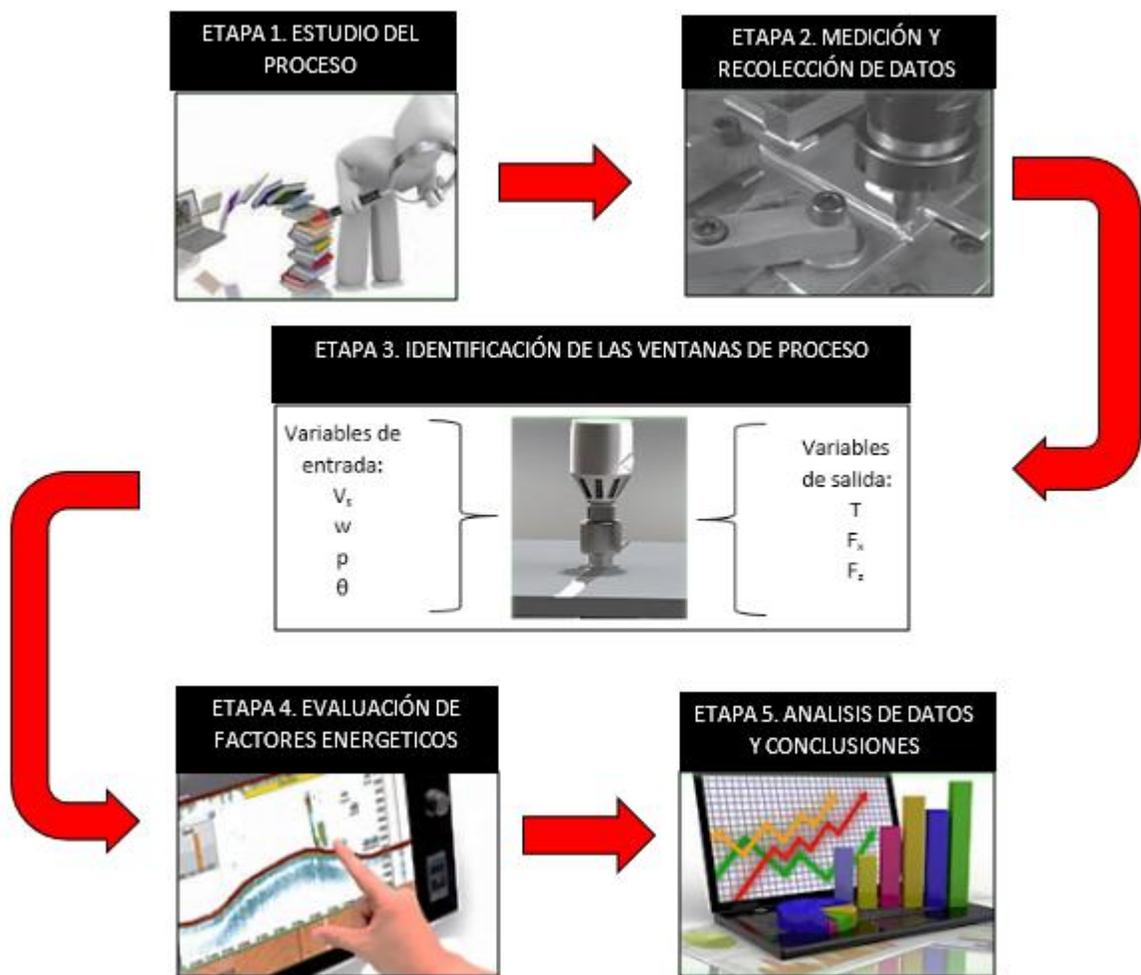
Los estudios presentados en la tabla 10 se asemejan en que todos requirieron de recursos computacionales para el desarrollo de su metodología y, por ende, para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso. En todos los casos la eficiencia térmica del proceso estuvo entre 88% y 95%.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Método

La evaluación energética del proceso de soldadura por fricción-agitación de placas de aleaciones de aluminio empleando una maquina fresadora adaptada y una maquina especializada para SFA, se lleva a cabo mediante la siguiente metodología de trabajo, mostrada en la figura 18:

Figura 18. Metodología de trabajo para la evaluación energética del proceso SFA.



1. Estudio del proceso. Esta etapa tiene como propósito identificar el funcionamiento de máquinas y equipos o implicados en la labor de soldadura SFA, las variables operacionales y los pasos de ejecución del proceso. Para ello debe realizar una búsqueda bibliográfica, dentro de la cual se establece lo siguiente: Las variables de entrada del proceso son la velocidad angular w , la velocidad de avance v_s , la penetración de la herramienta en la pieza de trabajo p y el ángulo de inclinación θ . Las variables de salida son la temperatura T , el torque τ , la fuerza axial F_z y la fuerza de avance F_x .

2. Medición y recolección de datos. Una vez identificados los parámetros operacionales y las variables de salida del proceso, se procede a establecer el método de medición más adecuado. En esta etapa se plantean distintas maneras de realizar la medición de acuerdo con los recursos disponibles por el investigador, como el dinero, el espacio y el personal capacitado. Posteriormente se selecciona y realiza el montaje del experimento.

Para poder realizar la medición de variables del proceso se empleó en este trabajo un tacómetro para medir la velocidad angular w , un torquímetro inalambrico para medir el torque τ , dispositivo de medición de fuerzas axial F_z y fuerza de avance F_x mediante galgas extensiométricas, y termopares conectados a un sistema de adquisición de datos para medir la temperatura T .

3. Identificación de las ventanas de proceso. En esta etapa se contrastan todas las variables que intervienen en el proceso con los datos recolectados durante la experimentación. Los cordones de soldadura obtenidos son evaluados bajo criterios de calidad, aquellas juntas que no presentan discontinuidades y tienen un buen acabado serán las que determinen los intervalos óptimos de operación para variables de entrada.

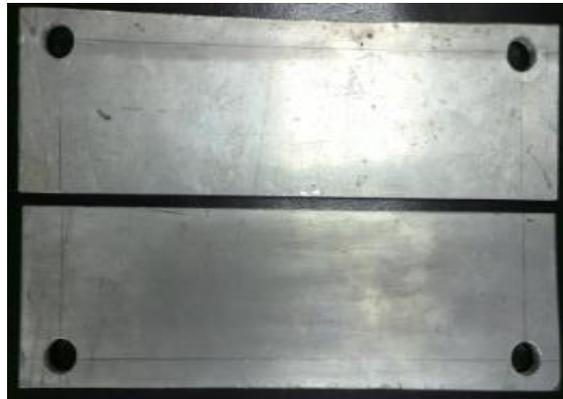
4. Evaluación de factores energéticos. En esta etapa los resultados obtenidos por medio de experimentación alimentarán los modelos termomecánicos planteados con los cuales se calcula la entrada de calor, la potencia mecánica y la eficiencia térmica.

5. Análisis de datos y conclusiones. Al final del estudio se procederá a analizar los valores obtenidos y evaluar los factores que más influyen en el proceso SFA. Además, se lleva a cabo la comparación de la eficiencia térmica obtenidas por otros autores.

3.2. Materiales

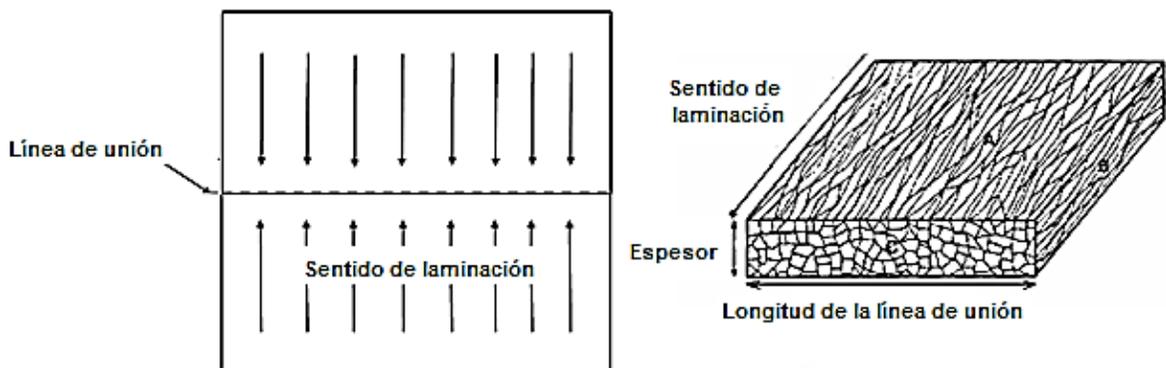
En este trabajo se lleva a cabo la soldadura de juntas conformadas por dos placas de aluminio 1100-H14 con las siguientes dimensiones 75 x 240 x 6mm tal como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Plano de material base Al 1100-H14 para proceso SFA.



Se solicitó al proveedor que en el material de trabajo se especificará el sentido de laminación de las placas, el cual debe ser perpendicular a la longitud de la junta, así mismo, será perpendicular al cordón de soldadura. Esta característica permite mejorar las propiedades mecánicas de la junta como su resistencia a la tensión y su ductilidad [30]. Tal como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Sentido de laminación presente en el material base Al 1100-H14 [52].



3.3. HERRAMIENTAS

Las herramientas de trabajo para el proceso SFA parten de una geometría básica que se caracteriza por tener un pin en el extremo de la herramienta unido a una superficie de diámetro mayor conocida como hombro que luego se ensancha formando el cuerpo de la herramienta. La relación de diámetro del hombro con respecto al pin está estipulada en un intervalo de (3,3:1-2,7:1) [53].

Para este estudio se fabricó una herramienta desmontable e intercambiable, en la cual se tiene un eje principal que cuenta con pin y hombro en ambos extremos. El pin de estas herramientas es roscado favoreciendo la deformación plástica del material. Adicionalmente, estas herramientas cuentan con un cuerpo que trabaja como intercambiador de calor ya que cuenta con aletas anulares para impedir el sobrecalentamiento del extremo de la herramienta, favoreciendo la medición de variables en esta zona, así como, la prolongación la vida útil de la herramienta. Por último, se encuentra la sección de ajuste entre piezas para impedir movimiento relativo entre partes y la pieza de acople del eje de transmisión con la máquina SFA. En la figura 21 se presenta el plano isométrico de la herramienta empleada en este estudio y la herramienta fabricada según esté.

Figura 21. Plano con vista isométrica de la herramienta desmontable con hombro intercambiable para proceso SFA [54].



Para la fabricación de herramientas se ha empleado acero AISI H13. Este material permite garantizar después de un tratamiento térmico de nitruración por láser una gran resistencia al desgaste debido a su elevada dureza superficial obtenida, alta tenacidad y un buen desempeño para trabajos en caliente. Estas propiedades junto con un bajo costo hacen de este material el más adecuado para este proyecto. En la tabla 11 se presenta la composición química del acero H-13 y sus principales propiedades mecánicas.

Tabla 11. Composición química y propiedades mecánicas del acero para trabajo en caliente H13 [53].

ACERO AISI H13						
ELEMENTO	C	Cr	Fe	Mo	Si	V
PORCENTAJE (%)	0,32-0,4	5,13-5,25	≥ 90.95	1,33-1,4	1	1
PROPIEDADES MECÁNICAS	HRC	52-54	σ_{max}	1990 Mpa	σ_y	1650 Mpa

Con base en un estudio realizado por Berdugo et. al. [52], se determinó que las herramientas cuyo hombro tienen un perfil modificado aumentan la superficie de contacto hombro-material base, lo que genera mayor entrada de calor a la junta demandando un menor torque, favoreciendo así, el ahorro energético en el proceso. Por esta razón se lleva a cabo la fabricación de una herramienta modificada cuyo hombro tiene un perfil en forma de círculos concéntricos, ya que según señalan los autores, este es el perfil que genera mayor plastificación del material en el proceso.

Las herramientas de trabajo de este proceso han sido clasificadas según el perfil de su hombro, las herramientas de hombro plano se les identifica como A1, las de hombro modificado en forma de concéntrico se identifican como A2 y, las de hombro modificado con perfil en espiral A3. La figura 23 muestra los perfiles de herramientas empleados en el estudio, y la tabla 13 muestra las áreas superficiales de cada herramienta.

Figura 22. Perfiles plano y concéntrico de hombro de las herramientas de proceso SFA

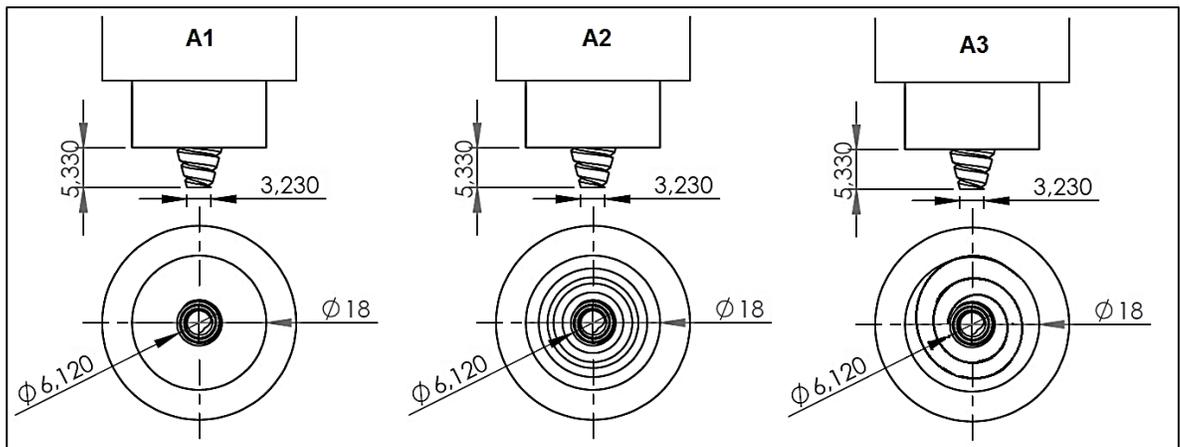


Tabla 12. Calculo detallado del área de contacto para cada perfil de herramienta para el proceso SFA.

PERFIL DE LA HERRAMIENTA	ECUACIÓN PARA EL CALCULO DEL AREA	VARIABLES Y DATOS	AREA SUPERFICIAL
Herramienta hombro plano A1.	$A1 = \left(\frac{\pi}{4} \times (D_{EXT}^2 - D_{INT}^2) \right) \text{ Ec. 28}$	D_{EXT}=18mm (Diámetro del hombro) D_{INT}=6.12mm (Diámetro en la base del pin)	A1=225mm²
Herramienta hombro con anillos concéntricos A2.	$A2 = A1 + AC1 + AC2 \text{ Ec. 24}$ $AC1 = \pi D1 \times (P - as) \text{ Ec. 25}$ $AC2 = \pi D2 \times (P - as) \text{ Ec. 26}$	P=1.97mm (perímetro del perfil transversal en U del hombro) as=1mm (Lado del área retirada por la fresa) D1=8.8mm (Diámetro anillo 1) D2=7mm (Diámetro anillo 2)	A2=273.15mm²
Herramienta hombro con ranuras en espiral A3	$A3 = A1 + L_{espiral} (P - as) \text{ Ec. 27}$	P=1.97mm (perímetro del perfil transversal en U del hombro) as=1mm (Lado del área retirada por la fresa) L_{espiral}=87mm	A3=309.39mm²

3.4 EQUIPOS

3.4.1. Máquina para soldadura por fricción-agitación

El proceso de soldadura por fricción-agitación se lleva a cabo empleando una máquina especializada para soldadura por fricción –agitación marca TTI, que se encuentra ubicada en las instalaciones del CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais) en Campinas, Brasil.

Esta máquina está completamente automatizada, la única operación manual que se debe realizar es el montaje de la pieza a soldar y de la herramienta de trabajo. Las variables de proceso son introducidas a un programa computacional que mediante un sistema de control se encarga de regular el sistema para que la soldadura se lleve a cabo bajo las condiciones deseadas.

En este trabajo se empleó el control de posición, para garantizar la calidad del cordón de soldadura. Las características de la máquina se presentan en la tabla 14.

Tabla 13. Características técnicas de la máquina para soldadura por fricción-agitación.

Fabricante	TTI – Transformation Technologies, Inc.
Modelo	RM1
Spindle	28kW
Vector Drive	100-2000 rpm
Fuerza máxima	88kN
Torque máximo	560Nm

Figura 23. Máquina especializada para soldadura por fricción-agitación.



3.4.2. Máquina fresadora adaptada para SFA

El proceso de soldadura por fricción-agitación se lleva a cabo empleando una máquina fresadora marca KONDOR modelo 3VH del año 2000, la cual se encuentra ubicada en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Caribe. Esta máquina cuenta con un motor eléctrico principal que se encarga de realizar el movimiento rotacional de la herramienta de trabajo y un motor secundario que permite el desplazamiento de la mesa donde está sujeta la pieza a conformar. La forma de operación de los procesos de mecanizado en máquinas fresadoras permite que el equipo sea adaptable a procesos de soldadura por fricción-agitación, con la única diferencia de que en la maquinas fresadoras se desplaza la mesa y no la herramienta de trabajo. La máquina fresadora a operar en este estudio tiene las características mostradas en la tabla 15 y 16:

Tabla 14. Ficha técnica motor principal maquina fresadora empleada para el proceso SFA.

MOTOR DE INDUCCIÓN			
HP 3	HZ 60	HZ 60	TIPO
FASES 3	VOLT 220	VOLT 440	INS CL
POLEAS 4	AMP 8.5	AMP 4.2	ROTOR C
R.P.M. 1720	BRG 6206	BRG 6205	CODIGO F
R.P.M.	DISEÑO CNS-C		FECHA 2000
No. 25008	FABRICADO EN TAIWAN REPLUBLICA DE CHINA		
CHENG DAR ELECTRICAL CO., LTD.			

Tabla 15. Ficha técnica motor secundario maquina fresadora empleada para el proceso SFA.

MOTOR ALIGN
MODELO SUPER 250
VOLT AC 110
AMP 50
HZ 60

Figura 24. Máquina fresadora KONDOR empleada para el proceso SFA.



Los parámetros de entrada como son velocidad de rotación y la velocidad de avance para realizar el proceso de soldadura, son ajustados con la ayuda de un tacómetro digital DT-2234C+. Los parámetros de entrada influyen directamente en la calidad del cordón de soldadura a obtener, por ende, este cumple una importante labor.

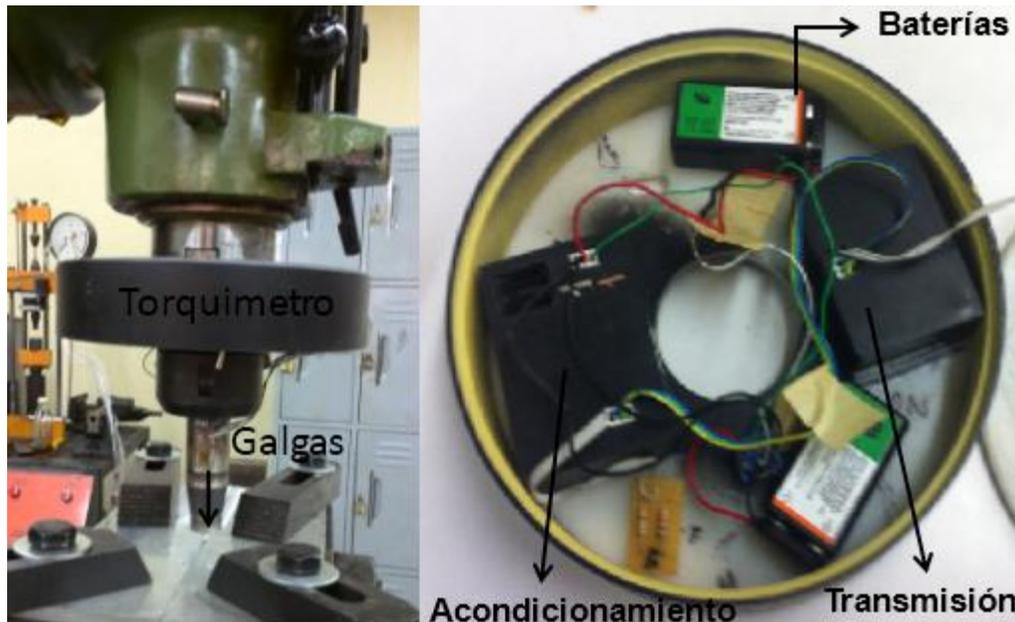
3.4.3. Dispositivos de medición de variables del proceso SFA

En este trabajo se desarrolla el proceso de soldadura por fricción agitación en dos tipos de máquinas, una máquina fresadora adaptada y una máquina especializada en el proceso SFA. A continuación, se describe los métodos e instrumentos de medición de las variables de salida torque τ , fuerza axial F_z , fuerza de avance F_x y temperatura T .

3.4.3.1 Medición de torque

En la máquina fresadora adaptada se lleva a cabo la medición de torque empleando un dispositivo inalámbrico diseñado por Saúl Pérez [56]. Este dispositivo emplea galgas extensiométricas adheridas al cuerpo de la herramienta para medir a cada instante la deformación por torsión experimentada por esta. La deformación es registrada como una diferencia de voltaje entre el puente de la galga para posteriormente ser transmitido a un receptor conectado a un computador donde se recogen y almacenan los datos. Previamente, se planteó una relación entre la variación de voltaje y la deformación por torsión empleando los factores de la galga, y una ecuación matemática que relaciona esta deformación con torque. Así, el computador puede graficar directamente el torque experimentado por la herramienta en función del tiempo.

Figura 25. Torquímetro, sus componentes y su montaje en la máquina fresadora adaptada para SFA.



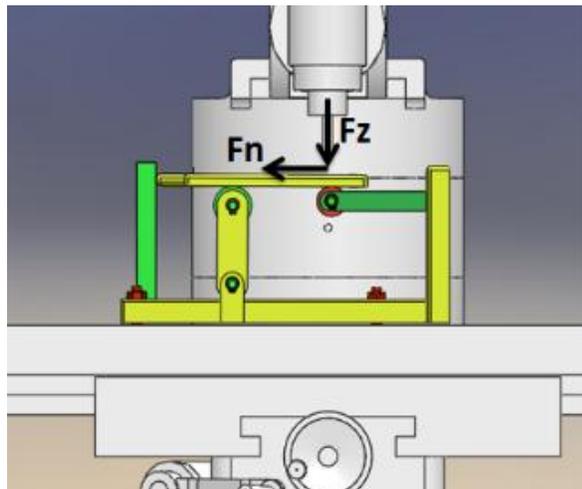
En la maquina especializada en SFA se emplea un tacómetro y un vatímetro conectados al eje de salida del motor principal, para medir la velocidad angular w y la potencia mecánica entregadas por este P_{Mec} . Así, la maquina relaciona la potencia de salida con la velocidad angular suministrada, se calcula el torque por medio de la ecuación (29).

$$\tau = \frac{P_{Mec}}{\omega} \text{ Ec. (29)}$$

3.4.3.2 Medición de fuerzas axial y fuerza de avance

En la maquina fresadora adaptada se utilizó un dispositivo diseñado por Jorge Arrieta y Eric Ocampo [57]. Este dispositivo emplea galgas extensiométricas ubicadas horizontal y verticalmente en dos vigas de apoyo, las cuales al aplicarse una carga sobre el dispositivo de deflectaran contribuyendo a que las galgas varíen su voltaje y se registre entonces, la deformación por flexión experimentada por estas. Las galgas están conectadas directamente a un dispositivo de adquisición de datos, el cual registra la variación de voltaje de las galgas en tiempo real. Como se estableció las ecuaciones que relacionan la variación de voltaje con respecto a la deformación por flexión y esta con respecto a la fuerza experimentada, el computador registra y además, calcula y grafica las fuerza axial y de avance en función del tiempo ejercidas sobre el material base. En la figura 26, se muestra el dispositivo de medición empleado.

Figura 26. Dispositivo de medición de fuerzas y su montaje en una maquina fresadora adaptada para SFA.



En la maquina especializada se emplean un dispositivo interno ubicado en la base de la maquina SFA, debajo de la mesa donde se apoya la pieza de trabajo. La medición de la fuerza se realiza mediante un piezoeléctrico, el cual al ser sometidos una carga se deforma generando una diferencia de voltaje la cual puede ser medida y registrada para posteriormente transformarla mediante ecuaciones matemáticas en deformación y fuerza.

3.4.3.2 Medición de temperatura

Para realizar la medición de temperatura tanto la maquina fresadora adaptada como la maquina especializada utilizaron el mismo procedimiento de medición. Es consta de colocar termopares tipo K a lo largo de la placa a determinadas distancias de la junta a soldar, estos sensores de temperatura van conectados a un sistema de datos que registra la temperatura en cada uno de los puntos en función del tiempo. En las figuras 27 y 28 se presentan el sistema de medición de temperatura utilizado para cada tipo máquina.

3.5. MONTAJE DEL EXPERIMENTO

En montaje del experimento a desarrollar se realiza para ambas máquinas, la maquina fresadora adaptada y maquina especializada en SFA (ver figuras 27 y 28) como se describe a continuación:

- 1.** Se colocan la herramienta de trabajo en el portaherramientas que transmite el movimiento rotacional hacia la herramienta. La herramienta será intercambiada según lo plantee el diseño experimental, ya sea para hacer las corridas experimentales con herramientas de diferente perfil.
- 2.** Las piezas de trabajo que son placas de aluminio AA1100-H14 deben ser montadas sobre la base de trabajo y aseguradas por medio de bridas que restringirán su movimiento hacia cualquier dirección garantizando la unión a tope.
- 3.** Los termopares deben haber sido instalados con tiempos de antelación para garantizar su agarre durante el montaje y proceso de soldadura. En este estudio se empleó yeso de secado rápido para no tener que invertir tanto tiempo en su montaje. Estos termopares serán conectados a un dispositivo de datos independiente que ha sido adaptado para el estudio. Este transmitirá las lecturas a un computador ubicado en el laboratorio.
- 4.** Por último, se fijan los parámetros de entrada del proceso como son: la velocidad angular ω , la velocidad de avance v_s , la penetración y el ángulo de inclinación. Posteriormente se inicia el proceso de soldadura, una vez finalizado el

cordón se retira el cupón ya soldado y se repite el procedimiento de montaje nuevamente.

Figura 27. Montaje para el desarrollo de la soldadura por fricción agitación en una maquina fresadora adaptada.

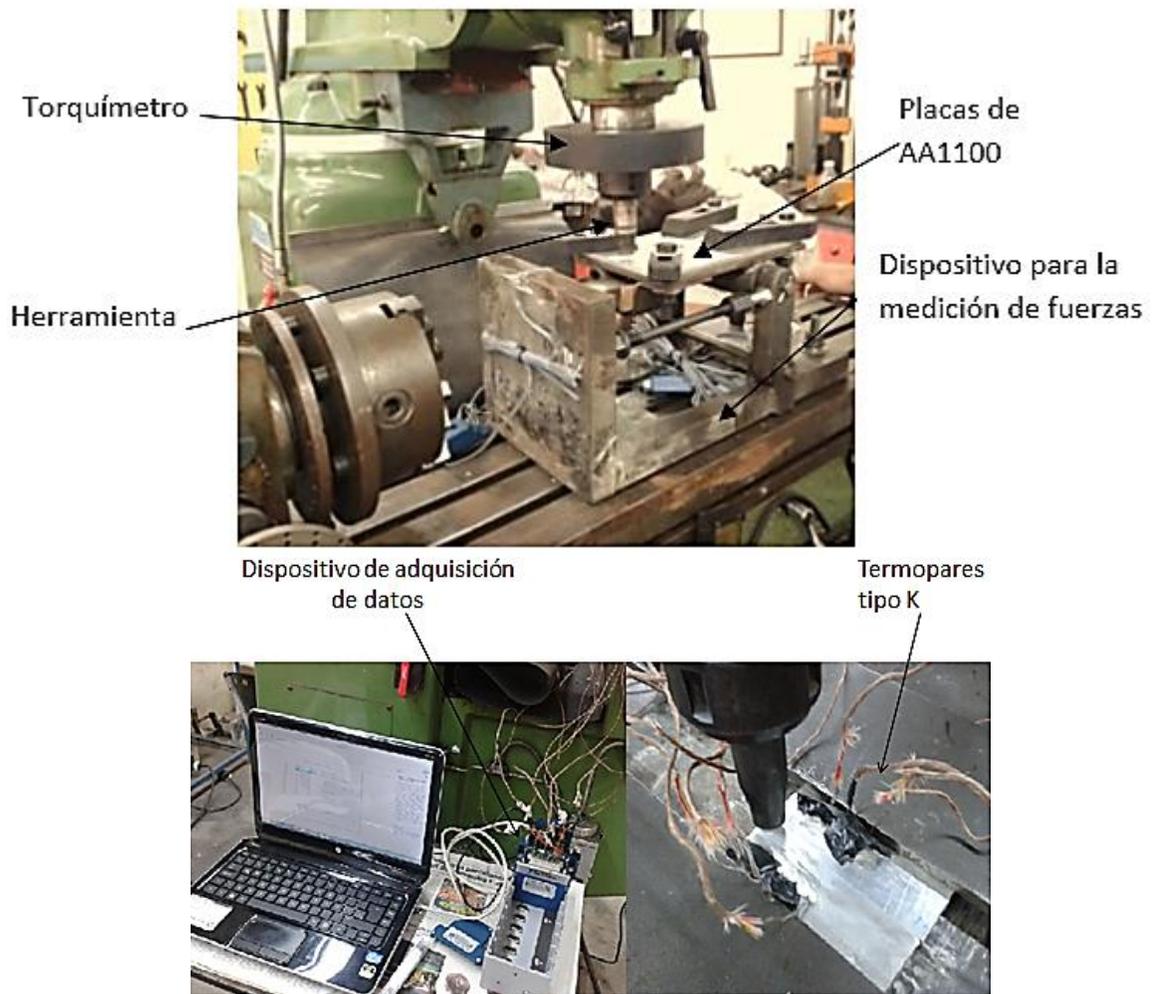
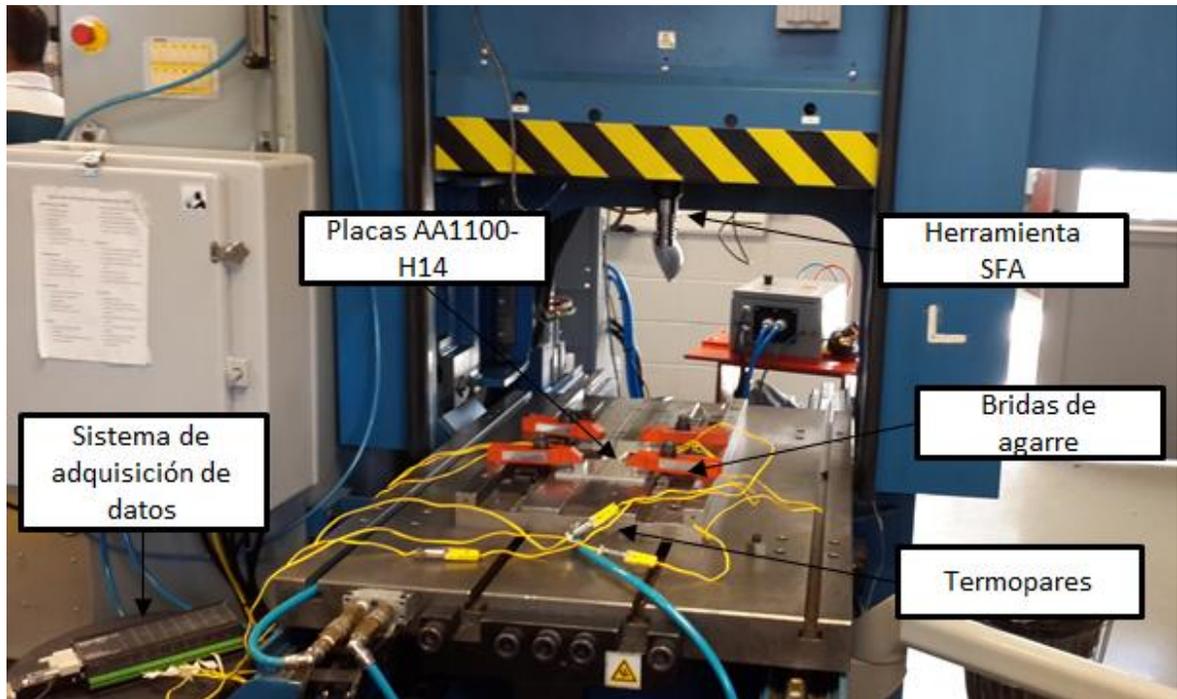


Figura 28. Montaje para el desarrollo de la soldadura por fricción agitación en una maquina especializada.



3.6 PARÁMETROS OPERACIONALES PARA EL PROCESO SFA

Con base en estudios preliminares se establece que los cordones soldados de alta calidad y buen acabado para aluminio AA1100 de 6mm de espesor, fueron obtenidos empleando los siguientes intervalos operacionales para las variables de entrada del proceso que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros operacionales empleados para el proceso SFA bajo los diferentes tipos de herramientas.

Perfil de la herramienta	Velocidad angular ω (rpm)	Velocidad de avance v_s (mm/min)	Relación (ω/v_s) R (rev/mm)	Ángulo de inclinación θ (°)
A1	1000-1100	90-120	9-11	1°
A2	900-1150	97-115	9,2-10	1°
A3	900-1200	90-110	9,7-11	1°

Con el fin de evaluar los efectos de la geometría de la herramienta en la eficiencia térmica se unifican los intervalos de trabajo del proceso SFA entre 900 y 1000rpm y 90 a 100mm/min con una inclinación de 1°, a los cuales les corresponde una relación $R \approx 10$.

3.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

Como fue mencionado previamente, en el proceso de soldadura por fricción-agitación se introduce un aporte de calor sobre el material base alcanzando temperaturas por debajo del punto de fusión, lo que permite la deformación y el forjado de este empleando una herramienta de geometría específica para dicho proceso. La principal fuente de calor de este proceso proviene de la interfase hombro-material base. Este fenómeno tiene lugar, ya que al entrar en contacto la superficie del hombro que se encuentra girando a un valor determinado de RPM con la superficie de la placa fija la herramienta tiene que vencer la fricción dada para mantener su movimiento rotacional generando así, calor. Además, Ospino y Verdugo [52] en su estudio desarrollado aseguran que al aumentar el área de contacto en la interfase modificando la geometría del hombro se introduce más calor al proceso que con una herramienta de hombro plano y por ende, se requiere un torque menor por parte de la maquina fresadora.

Con base en lo anterior se considera que con el fin de establecer la influencia que tiene el uso de un perfil modificado del hombro de una herramienta en la eficiencia térmica del proceso SFA es apropiado llevar a cabo un experimento en el que se realice un número determinado de pruebas aleatorias con parámetros establecidos para una herramienta de hombro con perfil plano y una con hombro de perfil modificado, midiendo en cada prueba tanto directa como indirectamente el torque τ

demandado a la máquina, la fuerza axial F_z ejercida por la herramienta sobre la placa, la fuerza F_x generada por el desplazamiento de la mesa y la temperatura T en distintos puntos de la placa.

Este planteamiento con lleva a establecer las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula, H_0 : “Al aumentar el área de contacto entre la interfaz hombro-placa base (modificando la geometría de la herramienta) los parámetros de respuesta torque τ , fuerza axial F_z , Fuerza de translación F_x y la temperatura en la placa T no presentaran cambio alguno. Es decir, el área de contacto no influye sobre en las variables de salida y, por ende, tampoco presenta impacto alguno en la eficiencia del proceso”.

Hipótesis Alternativa, H_a : “Al menos la media muestral de los ensayos realizados presentan un cambio en las variables de salida al aumentar el área del hombro”.

Este diseño de experimentos planteado será empleado para las soldaduras por fricción agitación realizadas en la maquina fresadora adaptada y la maquina especializada en SFA. Este diseño está compuesto por dos tratamientos, estos se encuentran definidos por una variable de entrada A que hace referencia al área superficial del hombro. Donde se emplea A_1 correspondiente al área del hombro con superficie plana y una herramienta con área superficial modificada. Estas están establecidas como A_2 correspondiente al área concéntrica empleada en la maquina especializada SFA, y A_3 correspondiente al área en espiral empleada en la maquina fresadora adaptada para SFA. Además, se emplea un parámetro R (rev/mm) que es la razón entre la velocidad rotacional y la translacional en el diseño, con el fin de obtener cordones de soldadura sanos con valor de $R \approx 10$. En las figuras 29 y 30 se presentan los diseños experimentales correspondientes para cada máquina utilizada en el estudio.

Figura 29. Diseño experimental a llevar a cabo para las soldaduras por fricción agitación en la maquina fresadora adaptada.

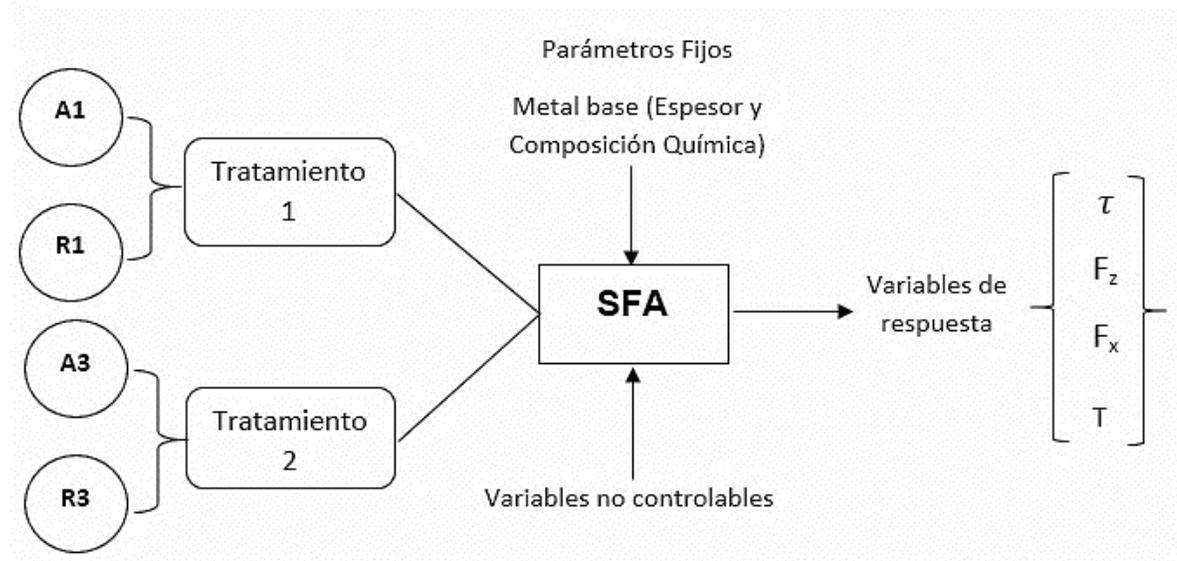
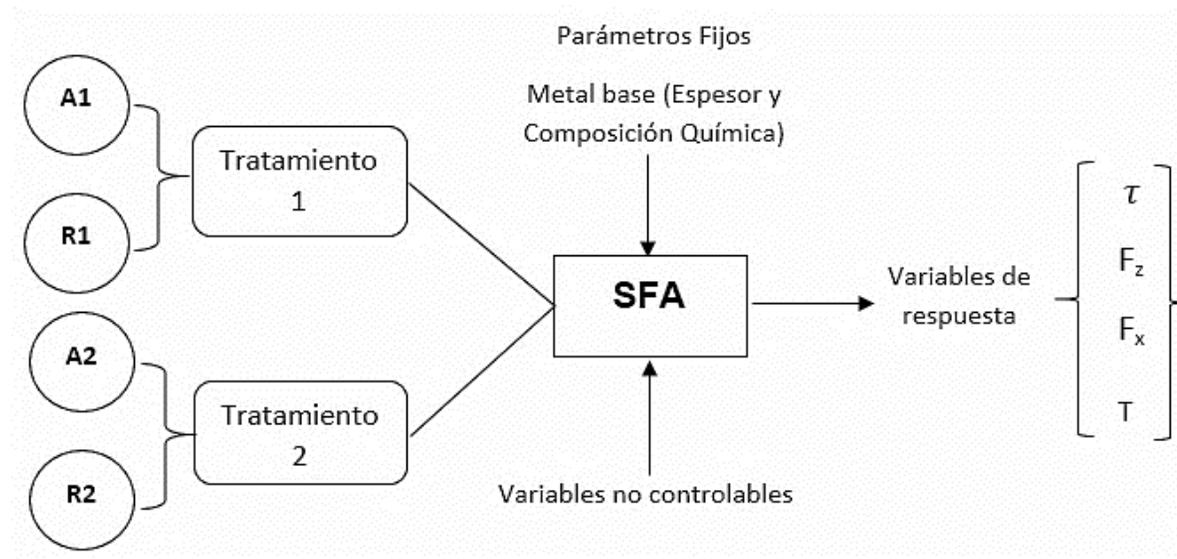


Figura 30. Diseño experimental a llevar a cabo para las soldaduras por fricción agitación en la maquina especializada SFA.



3.7.1. Determinación del número de replicas

Empleando tablas de probabilidad, se lleva a cabo la determinación del número de réplicas requerido para llevar a cabo el experimento planteado garantizando confiabilidad en los datos obtenidos, procurando en lo posible su economía. Para desarrollar esta tarea se utilizan los resultados obtenidos de experimentos realizados previamente por Ospino y Berdugo [52]. Los valores utilizados para este cálculo corresponden a la variable Fz, ya que debido al bajo porcentaje de ruido en la lectura de sus datos y la abundancia de datos existentes en la literatura es una variable fiable.

Para conocer el número de réplicas en un experimento de un solo factor se emplea una curva de operación característica que grafica la probabilidad de que la hipótesis nula sea aceptada siendo falsa conocido como error tipo II contra el parámetro Φ que refleja la medida en que la hipótesis nula es falsa [58].

Se procede a calcular Φ , empleando la ecuación (30):

$$\phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a \sigma^2} \quad \text{Ec. (30)}$$

Se definen las variables de la ecuación como:

a = Número de tratamientos del experimento.

n =Número de réplicas para cada tratamiento escogido por iteración.

σ = Desviación estándar.

τ_i = Es la diferencia entre la media individual y el promedio de las medias individuales.

D = Diferencia de medias de la variable de respuesta.

Con el propósito de simplificar la ecuación (30) se establece la ecuación (31) que muestra que:

$$D = \sum_{i=1}^a \tau_i^2 \text{ .Ec. (31)}$$

Se tiene a su vez, que la diferencia de medias individual y promedio τ_i la ecuación (32) es igual a:

$$\tau_i = \mu_i - \bar{\mu} \text{ Ec. (32)}$$

Para la media muestra $\bar{\mu}$ establece la ecuación (33) que:

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^a \mu_i}{a} \text{ Ec. (33)}$$

Los datos para de fuerza axial empleados para el cálculo del número de réplicas fueron extraídos del trabajo de Ospino y Berdugo [14], estos se muestran en la tabla 18.

Tabla 17. Valores de la fuerza de penetración Fz empleando una de herramienta de pin cónico roscado con diferentes perfiles en la geometría del hombro [14].

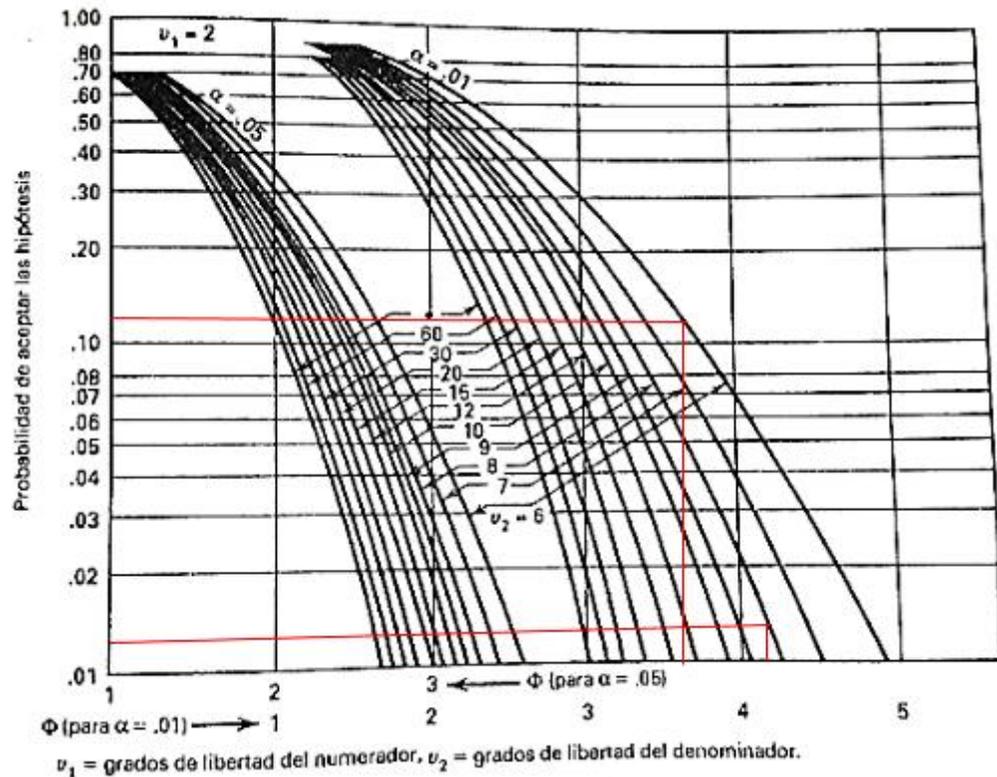
Muestra	Datos	Media, μ_i	$\bar{u}_i - \bar{u}$	$(\bar{u}_i - \bar{u})^2$
No. 1 Hombro Plano.	7,7117- 7,5396- 7,1686.	7,4733	0,46068	0,21223
No. 2 Hombro Espiral.	9,0078- 4,3614- 7,26.	6,8764	-0,13622	0,01855
No. 3 Hombro Concéntrico.	8,8034- 3,9742- 7,2869	6,68816	-0,32446	0,10527
Media total de la muestra, \bar{u}		7,01262	Diferencia de medias de la variable de respuesta, D	0,33605

De acuerdo con los datos solicitados y tomando la desviación estándar de 0,16 kN establecida como el valor correspondiente a la dispersión de datos calculada a partir de los estudios realizados bajo condiciones similares citados en el trabajo de Ospino y Berdugo. Al reemplazar los valores de las variables obtenidas en la ecuación (34) se tiene que:

$$\phi^2 = \frac{nD}{a\sigma^2} = \frac{n \times (0,33605)}{(3) \times (0,16^2)} = 4,3756n \text{ Ec. (34)}$$

Debido a que el experimento a llevar a cabo para cada máquina consta de 2 perfiles de herramienta, el valor de obtenido ϕ^2 empleando la ecuación (34) será con el cual se comienza a iterar, teniendo en cuenta que es preferible alcanzar una potencia estadística mayor al 90% con un $\alpha=0,01$.

Figura 31. Grafico curva de operación característica de la probabilidad de error tipo II contra el parámetro Φ .



La tabla 18 evidencia como reemplazando distintos valores de número de réplicas n en la ecuación (34) se determina ϕ . Empleando esta variable junto los grados de libertad del numerador y denominador v_1 y v_2 , respectivamente, se procede a buscar la probabilidad de aceptación de la hipótesis β a partir de la figura 31. Al final se establece la potencia del diseño experimental.

Tabla 18. Resultados del cálculo del número de réplicas con potencia $>90\%$ empleando las curvas de operación característica de probabilidad de error tipo II contra el parámetro Φ .

n	ϕ^2	Φ	$v_1 (a-1)$	$v_2 a(n-1)$	β	Potencia ($\beta-1$)
2	8,7512	2,9582	2	3	-	-
3	13,127	3,6231	2	6	0,130	0,870
4	17,502	4,1835	2	9	0,015	0,985
5	21,875	4,6771	2	12	-	-

Los resultados obtenidos en la tabla 18 indican que con una muestra total de 8 probetas donde cada perfil de herramienta tiene 4 réplicas se logra obtener una potencia del 98,5% en el experimento. Por tanto, este es el tamaño de muestra más confiable a trabajar, y, por ende, es el escogido para este proyecto.

3.8. CRITERIOS DE SANIDAD DE CORDONES

Se emplean las siguientes especificaciones de la tabla 19 para evaluar los cordones obtenidos por el proceso de soldadura por fricción-agitación. Con base en los criterios allí expuestos, se determinará la aceptación o rechazo de los mismos. Los cordones aceptados serán los encargados de establecer la ventana de proceso.

Tabla 19. Criterios de evaluación para cordones de soldadura por fricción-agitación [52].

CRITERIO	ESPECIFICACIÓN
Apariencia	A-Rebabas mayores de 1mm B-Hundimiento menor de 0,5mm C-Sobrepaso de raíz D-Exceso de material fundido
Defectos	E-Vacíos en el agujero (pin hole) F-Vacíos visibles continuos en el cordón G-Falta de penetración
Montaje	H-Desalineamiento I-Apertura excesiva de placas J-Dislocamiento de material

Los cordones de soldadura son evaluados bajo los criterios especificados en la tabla 19 mediante el desarrollo de una inspección visual y realizando la medición del espesor de la placa con un calibrador antes y después de la ejecución del proceso SFA.

3.9. METODO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

Para la evaluación de la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción – agitación se sigue el flujograma presentado en la figura.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 VENTANA DE PROCESO

Para poder establecer los parámetros bajo los cuales se desarrollará el experimento diseñado para la evaluación térmica del proceso de soldadura por fricción-agitación, se llevaron a cabo unas pruebas preliminares buscando las condiciones óptimas de trabajo.

4.1.1 VENTANA DE PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA

La tabla 20 presenta los parámetros y observaciones correspondientes a las pruebas preliminares de soldadura por fricción en placas de aluminio AA1100-H14 en la maquina especializada SFA. Cada prueba desarrollada se identifica mediante una referencia. En esta los 8 primeros dígitos marcan la fecha en la que se realizó el ensayo, organizado por año, mes y día respectivamente; y los 4 últimos corresponden al número de la prueba dentro del experimento. Estas referencias fueron asignadas automáticamente por la maquina SFA para lograr mejor organización y control de la información recolectada en cada prueba. Además, en la tabla 20 también, se presentan observación con respecto a la calidad del cordón de soldadura con base en los criterios para la evaluación de la sanidad de los cordones expuestos en la tabla 19.

20. Pruebas preliminares de soldadura por fricción agitación en placas de AA1100-H14 en la maquina especializada SFA.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201509040001	Hombro plano	1000	100	1°	5,3	15	Exceso de rebaba y marcas del hombro.
201509040002	Hombro plano	1000	100	1°	5,02	15	Exceso de rebaba y marcas del hombro.
201509040003	Hombro plano	1000	100	1°	5,02	15	Presencia de rebaba menor que la previa y marcas del hombro.
201509040004	Hombro plano	1000	100	1°	4,93	15	Rebaba muy pequeña y marcas del hombro.
201509040005	Hombro plano	1000	100	1°	4,83	15	Rebaba solo al inicio del cordón. Buen acabado.
201509040006	Hombro plano	900	100	1°	4,88	15	Presencia de defecto de llenado.
201509040007	Hombro plano	980	100	1°	4,88	15	Marcas del hombro en el cordón.

201509080000	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,3	15	Exceso de rebaba, exceso de penetración.
201509080001	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,1	15	Falta de penetración.
201509080002	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,2	15	Rebaba al inicio. Disminución de rebaba y rugosidad en el cordón.
201509080003	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,2	15	Presencia de rebaba. Exceso de calor al inicio del cordón.
201509080004	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,2	10	Rebaba al inicio del cordón. Disminución de la rebaba en el cordón.
201509080005	Hombro concéntrico	1000	110	0°	5,15	10	Presencia de rebaba y rugosidad en el cordón.
201509080006	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,15	10	Desalineación de las placas, aumento en la rebaba producto de esto.
201509080007	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,10	10	Exceso de rugosidad en el cordón

Las figuras 33 y 34 muestran los cordones de soldadura obtenidos durante las pruebas preliminares. La figura 33 muestra los cordones de soldadura obtenidos en las pruebas preliminares para encontrar la ventana de proceso SFA empleando una herramienta de hombro plano. Cada uno de los cordones presentados le corresponde a una referencia en la tabla, de tal forma se tiene que el cordón 1 es el (201509040001), el cordón 2 es el (201509040002), el cordón 3 es el (201509040003), el cordón 4 es el (201509040004), el cordón 5 es el (201509040005), el cordón 6 es el (201509040006) y el cordón 7 es el (2015090007).

Figura 33. Cordones de soldadura obtenidos de las pruebas preliminares realizadas con la herramienta de hombro plano en maquina especializada.



Así mismo, la figura 34 muestra los cordones de soldadura obtenidos en las pruebas preliminares para encontrar la ventana de proceso SFA empleando una herramienta de hombro concéntrico. Cada uno de los cordones presentados le corresponde a una referencia en la tabla, de tal forma que para el primer cordón 0000 es el (201509080000), el segundo cordón 0001 (201509080001), el tercer cordón 0002 (201509080002), el cuarto cordón 0004 es el (201509080004), el quinto cordón es el 0004 (201509080004), el sexto cordón 0005 (201509080005), el séptimo cordón 0006 es el (2015090006) y el octavo cordón 0007 es el (2015090007).

Figura 34. Cordones de soldadura obtenidos de las pruebas preliminares realizadas con la herramienta de hombro concéntrica en maquina especializada.



Con base en las pruebas preliminares realizadas en la maquina especializada SFA empleando herramientas de hombro plano y concéntrico se establecieron en la tabla 21 las mejores condiciones de trabajo.

Tabla 21. Condiciones óptimas de trabajo para las soldaduras de AA1100-H14 en maquina especializada con hombro concéntrico y plano.

Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)
Hombro plano	1000	100	1°	4,83	15
Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,2	10

Teniendo en cuenta el diseño de experimentos planteado y las condiciones de trabajo optimas asociadas a la soldadura por fricción-agitación de AA1100-H14 presentadas en la tabla 21, se desarrollan las corridas definitivas con el propósito de evaluar la eficiencia térmica del proceso SFA y evaluar si existe influencia de la geometría de la herramienta en esta.

4.1.2 VENTANA DE PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA FRESADORA ADPATADA PARA EL PROCESO

La tabla 22 presenta los parámetros y observaciones correspondientes a las pruebas preliminares de soldadura por fricción en placas de aluminio AA1100-H14 en la maquina fresadora adaptada para el proceso SFA. Las pruebas preliminares que se muestran a continuación están basadas en el estudio realizado por Ospino et. al. [14]. Cada prueba desarrollada se identifica mediante una referencia. En esta los 8 primeros dígitos marcan la fecha en la que se realizó el ensayo, organizado por año, mes y día respectivamente; y los 4 últimos corresponden al número de la prueba dentro del experimento. Estas referencias fueron asignadas con el propósito de seguir con la trazabilidad previamente planteada en las pruebas preliminares con la maquina especializada en SFA. Además, en la tabla 22, también se presentan observación con respecto a la calidad del cordón de soldadura con base en los criterios para la evaluación de la sanidad de los cordones expuestos en la tabla 19.

Tabla 22. Pruebas preliminares de soldadura por fricción agitación en placas de AA1100-H14 en la maquina fresadora adaptada para el proceso SFA empleando herramienta de hombro plano.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201306240001	Hombro plano	1096	111	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presencia de rebaba mayor a un milímetro
201306240002	Hombro plano	810	80	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presencia de rebaba mayor a un milímetro
201306240003	Hombro plano	710	70	1°	5,3	15	Cordón aceptable. Presenta rebaba mayor a un milímetro y vacío en el agujero (pin hole)
201306240004	Hombro plano	965	92	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presenta rebaba mayor a un milímetro.
201306240005	Hombro plano	944	83	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presenta defecto exceso de material fundido y rebaba mayor a un milímetro.
201306240006	Hombro plano	955	106,5	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presenta defecto exceso de material fundido y rebaba mayor a un milímetro.

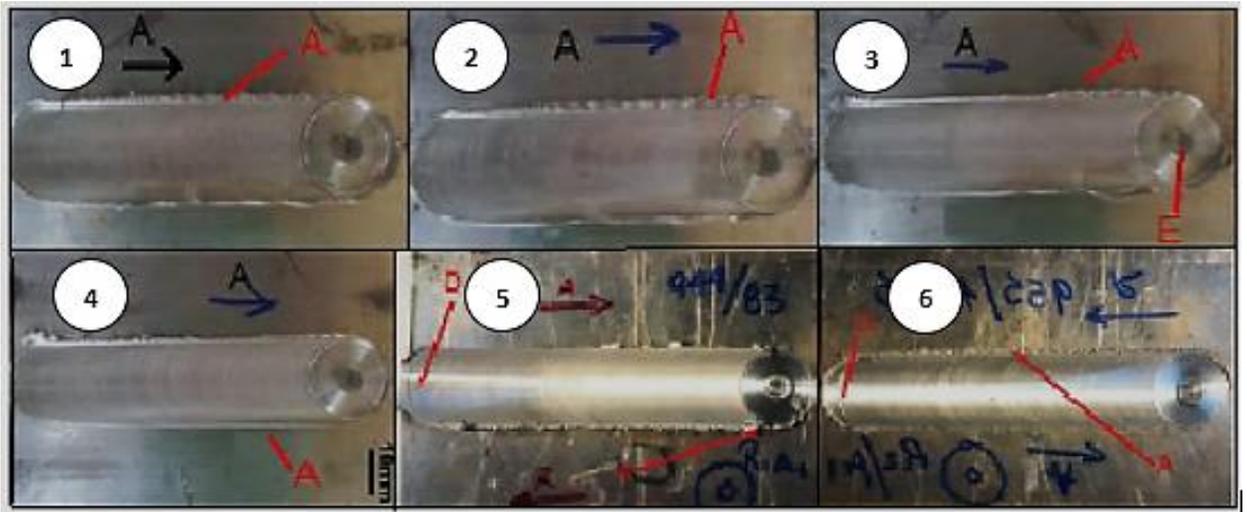
Tabla 23. Pruebas preliminares de soldadura por fricción agitación en placas de AA1100-H14 en la maquina fresadora adaptada para el proceso SFA empleando herramienta de hombro en espiral.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201306240007	Hombro espiral	1020	104	0°	5,3	15	Buena apariencia. Presencia de rebaba mayor a un milímetro y exceso de material fundido.
201306240008	Hombro espiral	863	105	0°	5,3	15	Inicialmente presenta defecto de exceso de material fundido y vacíos visibles continuos en el cordón. Se suelda nuevamente y se presenta rebaba mayor a un milímetro y exceso de material fundido
201306240009	Hombro espiral	930	102	0°	5,3	15	Cordón aceptable. Presenta rebabas mayores a un milímetro y exceso de material fundido.
201306240010	Hombro espiral	960	103	1°	5,3	15	Buena apariencia. Presenta rebaba mayor a un milímetro, sobrepaso de raíz, exceso de material fundido, vacíos en el agujero y vacíos continuos en el cordón.
201306240010	Hombro espiral	848	88	0°	5,3	15	Buena apariencia. Presenta rebaba mayor a un milímetro, sobrepaso de raíz, exceso de material fundido, vacíos en el agujero y vacíos continuos en el cordón.

201306240011	Hombro espiral	1120	103	0°	5,3	15	Cordón inaceptable. Defectos de rebaba mayor a un milímetro, sobrepaso de raíz, exceso de material fundido, vacíos en el agujero y vacíos continuos en el cordón.
--------------	-------------------	------	-----	----	-----	----	---

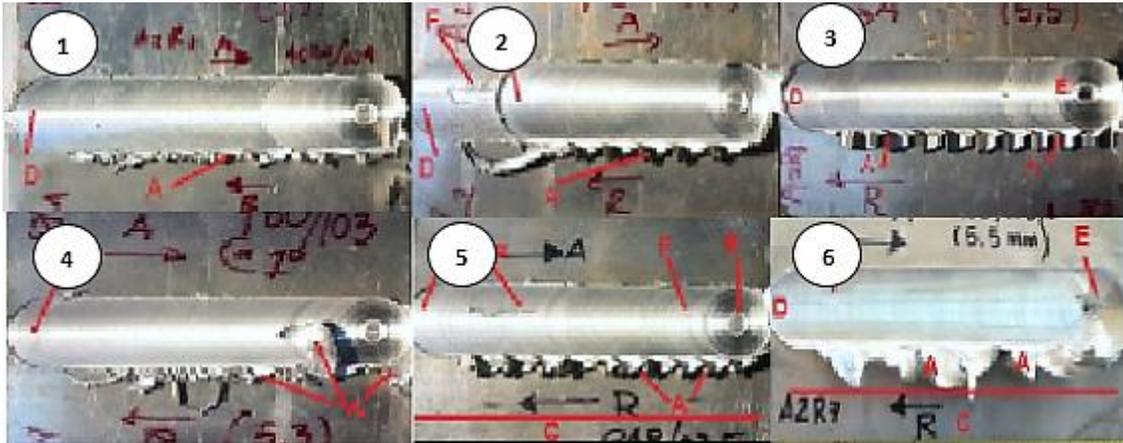
Las figuras 35 y 36 muestran los cordones de soldadura obtenidos durante las pruebas preliminares. La figura 35 muestra los cordones de soldadura obtenidos en las pruebas preliminares para encontrar la ventana de proceso SFA empleando una herramienta de hombro plano. Cada uno de los cordones presentados le corresponde a una referencia en la tabla, de tal forma se tiene que el cordón 1 es el (201306240001), el cordón 2 es el (201306240002), el cordón 3 es el (201306240003), el cordón 4 es el (201309240004), el cordón 5 es el (201309240005) y el cordón 6 es el (201306240006).

Figura 35. Cordones de soldadura obtenidos de las pruebas preliminares realizadas con la herramienta de hombro plano.



Así mismo, la figura 36 muestra los cordones de soldadura obtenidos en las pruebas preliminares para encontrar la ventana de proceso SFA empleando una herramienta de hombro concéntrico. Cada uno de los cordones presentados le corresponde a una referencia en la tabla, de tal forma que para cordón 1 es el (201306240007), el cordón 2 es el (201306240008), el cordón 3 es el (201306240009), el cordón 4 es el (201306240010), el cordón 5 es el (201309240011) y el cordón 6 es el (201306240012).

Figura 36. Cordones de soldadura obtenidos de las pruebas preliminares realizadas con la herramienta de hombro espiral.



Teniendo en cuenta el diseño de experimentos planteado y las condiciones de trabajo óptimas asociadas a la soldadura por fricción-agitación de AA1100-H14 en una maquina fresadora adaptada son presentadas en la tabla 21, posteriormente se desarrollaron las corridas definitivas con el propósito de evaluar la eficiencia térmica del proceso SFA y evaluar si existe influencia de la geometría de la herramienta en esta.

Tabla 24. Condiciones óptimas de trabajo para las soldaduras de AA1100-H14 empleando una maquina fresadora adaptada con hombro en espiral y plano.

Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)
Hombro plano	1000-1100	90-120	1°	5,3	15
Hombro espiral	900-1150	97-115	1°	5,3	15

4.2 SOLDADURA DEFINITIVAS

Con base en las soldaduras preliminares se determinó la ventana de proceso. En estas ventanas se establecieron los parámetros operacionales con los cuales se obtuvieron los cordones de soldadura sanos y de buena apariencia. Estos parámetros serán los empleados para realizar las soldaduras definitivas. Esta etapa del proceso es de gran importancia ya que las soldaduras definitivas son los ensayos bajos los cuales se tomaron las mediciones para alimentar los modelos matemáticos para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA.

4.2.1 SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA

La tabla 25 muestra los parámetros y las evaluaciones de la sanidad de los cordones de soldadura obtenidos empleando una maquina especializada en SFA con una herramienta de hombro plano y concéntrico. Los cordones obtenidos se muestran en las figuras de la 37 a la 40. Para la realización de las soldaduras se empleó el diseño experimental planteado en la figura 30, la cual especifica que se den desarrollar 4 ensayos con la herramienta de hombro concéntrico y 4 ensayos con la herramienta de hombro plano, para un total de 8 pruebas. Estos ensayos se llevaron a cabo de forma aleatoria.

Cada uno de los cordones presentados le corresponde a una referencia en la tabla, de tal forma que para cordón 1 es el (201509090000), el cordón 2 es el (201509090001), el cordón 3 es el (201509090002), el cordón 4 es el (201509090003), el cordón 5 es el (201509090004), el cordón 6 es el (201509090005), el cordón 7 es el (201509090006), el cordón 7 es el (201509090006) y el cordón 8 es el (201509090007).

Tabla 25. Condiciones de trabajo de soldadura definitivas de AA1100-H14 por fricción-agitación.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201509090000	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,15	10	Presencia de rebaba. Buen acabado. Sin defectos de llenado. Rugosidad en el lado de retroceso.
201509090001	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,13	10	Presencia de rebaba más delgada. Sin defectos de llenado. Rugosidad en el lado de retroceso.
201509090004	Hombro plano	1000	100	1°	5,1	15	Ondulaciones por falta de transporte de material, y un agujero en el área del pin.
201509090005	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,13	10	Presencia de rebaba al inicio y en todo el lado de avance.
201509090006	Hombro plano	1000	100	1°	5,2	20	Presencia de ondulaciones en la superficie del cordón y falta de penetración. No hay defecto de llenado.
201509100000	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,13	10	Rebaba en el cordón y rugosidad en la superficie de este. Falto un poco de penetración. No hay defectos de llenado.
201509110000	Hombro plano	900	90	1°	5,25	20	Presencia de ondulaciones. Mayor rebaba. Sin defecto de llenado. Buena penetración.

201509110001	Hombro plano	1000	100	1°	5,25	20	Presencia de ondulaciones al final del cordón de soldadura. Más rebaba. Sin defecto de llenado. Buena penetración.
--------------	-----------------	------	-----	----	------	----	--

Las imágenes de la 37 a la 40 presentan los cordones obtenidos por medio de estas 8 pruebas definitivas. Así, se pueden corroborar las observaciones descritas en la tabla 25.

Figura 37. Cordones de soldadura referencia 201509090000 y 201509090001.



Figura 38. Cordones de soldadura referencia 201509090004 y 201509090005.



Figura 39. Cordones de soldadura referencia 201509090006 y 201509100000.



Figura 40. Cordones de soldadura referencia 201509110000 y 201509110001.



Con base en las observaciones descritas en la tabla 25, se observó que estaba en la mayoría de cordones de soldadura presentan rebaba y ondulación profunda a lo largo del cordón de soldadura. El primer y cuarto cordón con referencias 201509090000 y 201509090004 respectivamente, mostraron baja cantidad de rebaba y un buen acabado de la superficie (liso y continuo), las condiciones operacionales de estos cordones serán las empleadas para hacer las soldaduras para la medición de ciclos térmicos. Además, durante las pruebas debido a la esbeltez de la herramienta y la pequeña sección que le sirve de apoyo para el agarre de la misma, es que existe una pequeña etapa de transición mientras se estabiliza el proceso. Por tanto, entra mayor sea la longitud del cordón más largo será el trayecto cuasi estacionario del proceso. Esta condición favorece la lectura de las variables de salida del proceso, incluyendo la temperatura

Tabla 26. Pruebas del proceso SFA realizadas con maquina especializada con medición de temperatura para herramienta con hombro plano y concéntrico en maquina especializada SFA.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201509170000	Hombro concéntrico	1000	100	0°	5,15	10	Acabado superficial liso. No hay defecto de llenado. Rebaba de retroceso y una parte escaló. Falto una porción mínima de penetración.
201509170001	Hombro plano	1000	100	1°	5,1	15	Ondulaciones en la superficie, y después estabilizo quedando liso. Sin defecto de llenado. A algunas pequeñas porciones les falto penetración.

Los cordones de soldadura 201509170000 y 201509170001 tal como lo muestra las figuras 41 y 21 respectivamente, lograron un mejor acabado y calidad que las soldaduras preliminares, debido a estas poseen mayor longitud. Por esta razón, las pruebas definitivas con medición de temperatura será el punto de partida para el análisis térmico del proceso SFA.

Figura 41. Cordón de soldadura con medición de temperatura hombro concéntrico referencia 201509170000.



Figura 42. Cordón de soldadura con medición de temperatura hombro plano referencia 201509170001.



Los ciclos térmicos para el lado de avance como el lado de retroceso obtenidos durante el proceso de soldadura se presentan en las figuras 43 y 44, respectivamente. Se observa que el hombro concéntrico alcanzó una mayor temperatura pico para el termopar más cercano a la zona agitada, sin embargo, el hombro plano muestra menor diferencia de temperatura entre los picos alcanzados por cada termopar del lado de avance como del lado del retroceso.

Figura 43. Ciclos térmicos medidos durante la soldadura por fricción-agitación con la herramienta de hombro concéntrico lado de avance (1) y retroceso (2).

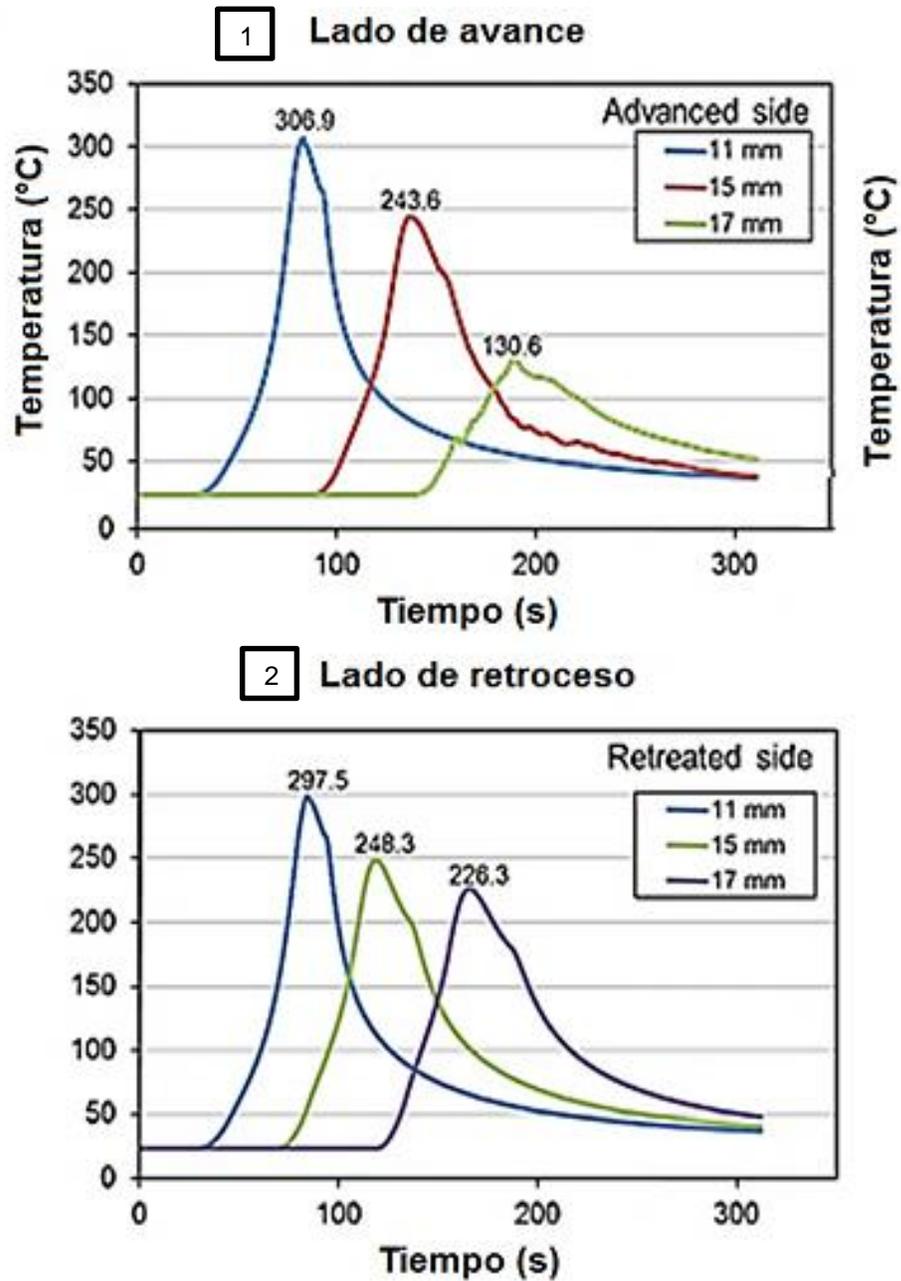
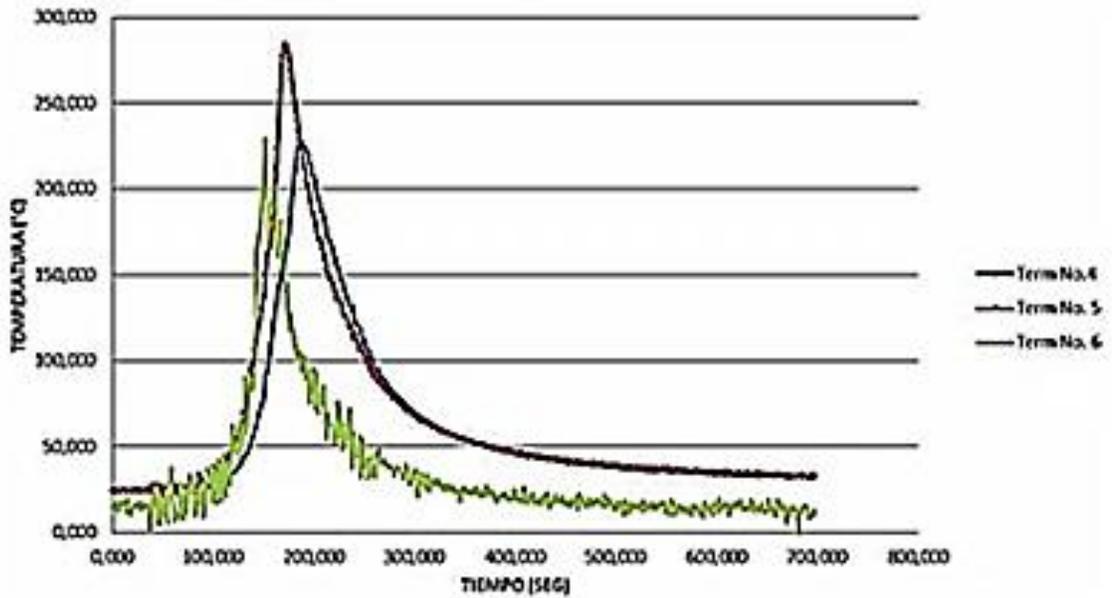


Figura 44. Ciclos térmicos medidos durante la soldadura por fricción-agitación con la herramienta de hombro plano lado de avance (1) y retroceso (2).

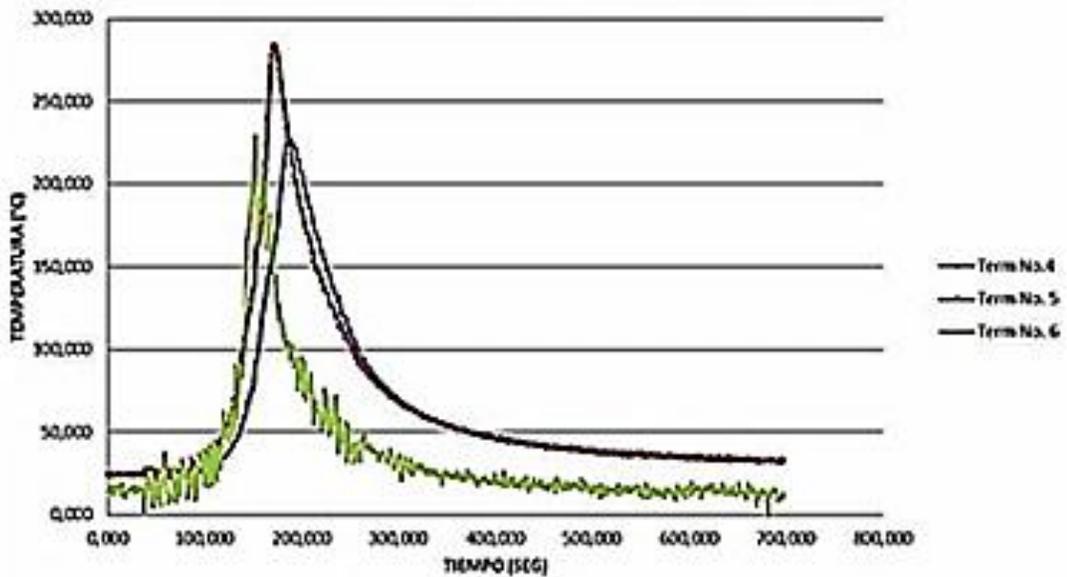
1

CICLOS TÉRMICOS SOLDADURA No.2 AA1100 LADO DE AVANCE



2

CICLOS TÉRMICOS SOLDADURA No.2 AA1100 LADO DE AVANCE



4.2.2 SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EMPLEANDO UNA MAQUINA ESPECIALIZADA SFA

Con base en las pruebas preliminares se llevaron a cabo las pruebas definitivas para los dos cordones realizados empleando una maquina fresadora con herramientas de hombro plano y en espiral, a los cuales se les midieron los ciclos térmicos. Además, el trabajo realizado por Torres [30] realiza un análisis de la microestructura obtenida en estos cordones.

Las figuras 45 y 46 muestra los cordones de soldadura obtenido en una maquina fresadora adaptada para el proceso SFA empleando hombro plano y en espiral, respectivamente. Los cordones soldados poseen mayor longitud en comparación a los cordones preliminares para aumentar el trayecto cuasi estacionario del proceso, y contribuir a una medición favorable de las variables de salida. Además, presentan rebaba en el lado de retroceso con la diferencia que en el cordón soldadura con la herramienta de hombro plano la rebaba es uniforme, mientras que en cordón soldado con la herramienta de hombre en espiral presenta rebaba creciente.

Figura 45. Cordón de soldadura con medición de temperatura hombro plano referencia 20130906.



Figura 46. Cordón de soldadura con medición de temperatura hombro en espiral referencia 20130906.

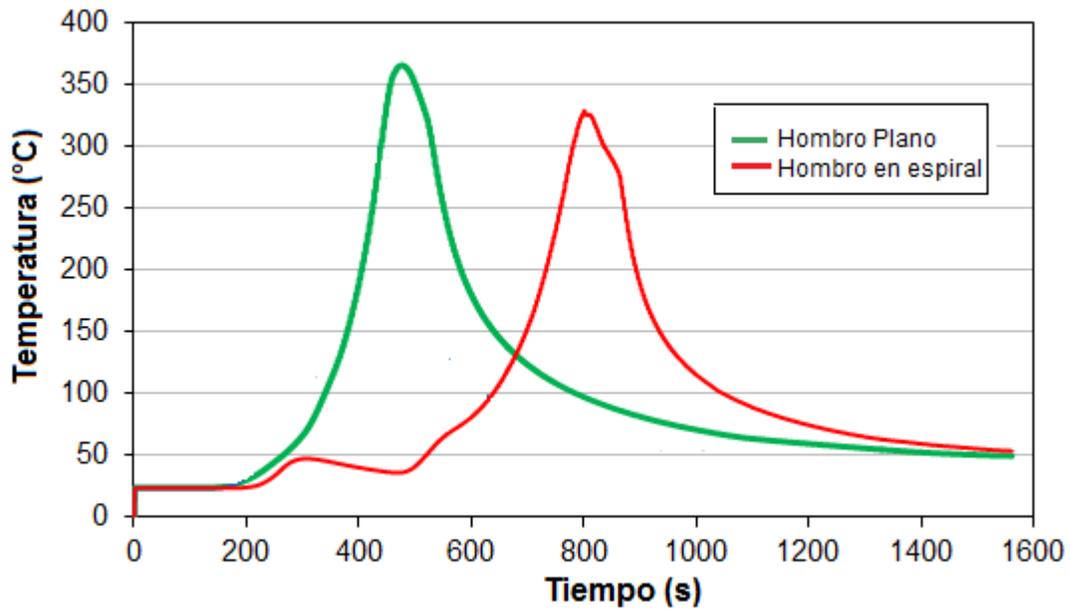


Tabla 27. Pruebas del proceso SFA realizadas con maquina especializada con medición de temperatura para herramienta con hombro plano y concéntrico en maquina especializada SFA.

Referencia del cordón	Tipo de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Ángulo de inclinación (°)	Penetración (mm)	Dwell time (seg)	Observaciones – Calidad del cordón
201309060000	Hombro plano	1000	100	1°	5,3	10	Acabado superficial liso. No hay defecto de llenado. Rebaba de retroceso uniforme. Penetración completa.
201309060001	Hombro en espiral	1000	100	1°	5,3	15	Acabado superficial liso. No hay defecto de llenado. Rebaba de retroceso creciente. Penetración completa.

Para los condones 201309060000 y 201309060001 soldados se obtuvieron los siguientes ciclos térmicos que se presentan en la figura 47. En esta figura se observa que la temperatura pico alcanzada a una distancia de 11mm de la junta el cordón obtenido con la herramienta de perfil plano es mayor que la de perfil en espiral.

Figura 47. Ciclos térmicos medidos durante la soldadura por fricción-agitación con la herramienta de hombro plano y en espiral lado de avance para termopar ubicado a 11mm.



4.3 ANALISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN.

En este análisis se evaluó la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación bajo dos modelos matemáticos, el modelo de enfoque de adherencia de material y el modelo de enfoque de deslizamiento de material de la zona agitada sobre la herramienta de trabajo. Así mismo, ambos modelos se emplean en el análisis del proceso SFA desarrollado por dos máquinas y dos herramientas de trabajo distintas.

4.3.1 Análisis del proceso de soldadura por fricción agitación en una maquina especializada en SFA.

El análisis térmico del proceso de soldadura por fricción agitación parte de conocer las fuerzas axiales F_z y la fuerza de avance F_x , estas se conocen porque fueron medidas con el dispositivo de fuerzas previamente descrito. El paso a seguir después es conocer el torque τ , en este estudio se busca corroborar los datos medidos por el torquímetro para brindar confiabilidad a la metodología. En consecuencia, se procede utilizar los ciclos térmicos medidos para establecer el perfil de temperatura de las placas. Estos también permiten establecer el comportamiento de la temperatura en diferentes puntos de la placa.

Tomando las temperaturas pico registradas en los ciclos térmicos se procede a graficar una curva de tendencia de la temperatura. El estableciendo dos condiciones en los extremos de cada placa. La primera condición dicta que existe un punto alejado a 100mm del tope del cupón donde se considera que por su lejanía de la fuente de calor y dado el caso de que se suelda con aluminio este punto registraría temperaturas ambientes T_0 . La segunda condición dicta que existe un punto dentro de la zona agitada, cuya posición se calcula con la geométrica del pin y la tabla 28 [28]. Esta tabla 28 establece que en las temperaturas de trabajo del proceso SFA se encuentran entre 440°C-550°C durante la soldadura de piezas de aluminio.

Tabla 28. Rango de temperatura trabajados durante el proceso de soldadura por fricción-agitación para varias aleaciones [28].

GRUPO DE ALEACIONES	RANGO DE TEMPETATURAS EN °C
Aleaciones de Aluminio	440 a 660
Aleaciones de Magnesio	250 a 350
Aleaciones de Cobre	600 a 900
Aleaciones de acero al medio y bajo Carbono	650 a 800
Aleaciones de Titanio	700 a 950

Biswas et. al. [34] establecen que en la zona de agitación del material se trabajan con temperatura del 80% de la temperatura de fusión del material soldado. Esto indica que se alcanzan 530°C de temperatura para el aluminio 1100 ($T_{\text{fusión}} 660^{\circ}\text{C}$) en dicha zona. Sin embargo, como se toma como referencia la superficie del pin se asume que la temperatura es mayor, por lo cual se establece un valor de 550°C que corresponde a la temperatura máxima registrada en la literatura [20] [11].

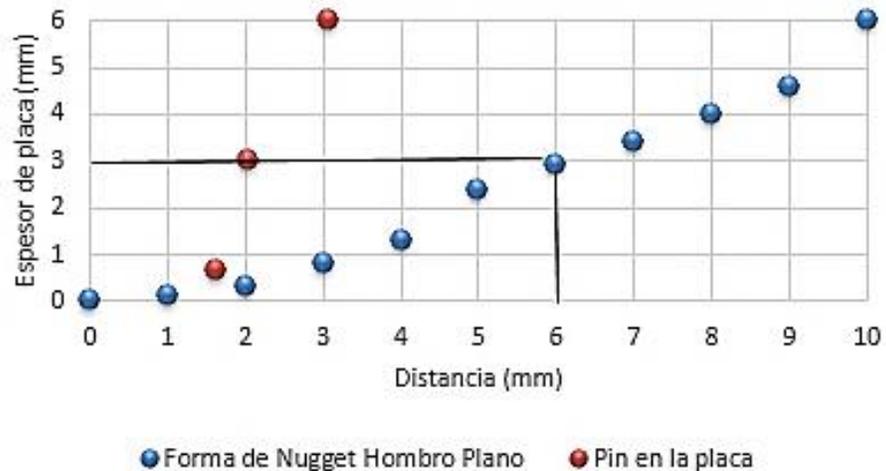
Con base en lo anterior, se calcula la distancia a la que se encuentra el perímetro con respecto a la profundidad a la que se encuentran ubicados los termopares (3mm). Esto permite conocer que el segundo de punto de temperatura añadido que está a 1,263mm de la fuente de calor.

Posteriormente se grafica la función $z_f(r)$ que describa la geometría de la zona agitada (o nugget) obtenido por la soldadura por fricción-agitación. Empleando el perfil de herramienta de hombro plano que corresponde a la figura a partir de la microestructura del cordón presente en la figura 48. La figura 49 permitirá conocer la distancia a la cual se encuentra el límite de la zona agitada a profundidad de 3mm.

Figura 48. Forma de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con hombro plano en maquina especializada en SFA [29].



Figura 49. Gráfico de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con herramienta de hombro plano en maquina especializada en SFA.



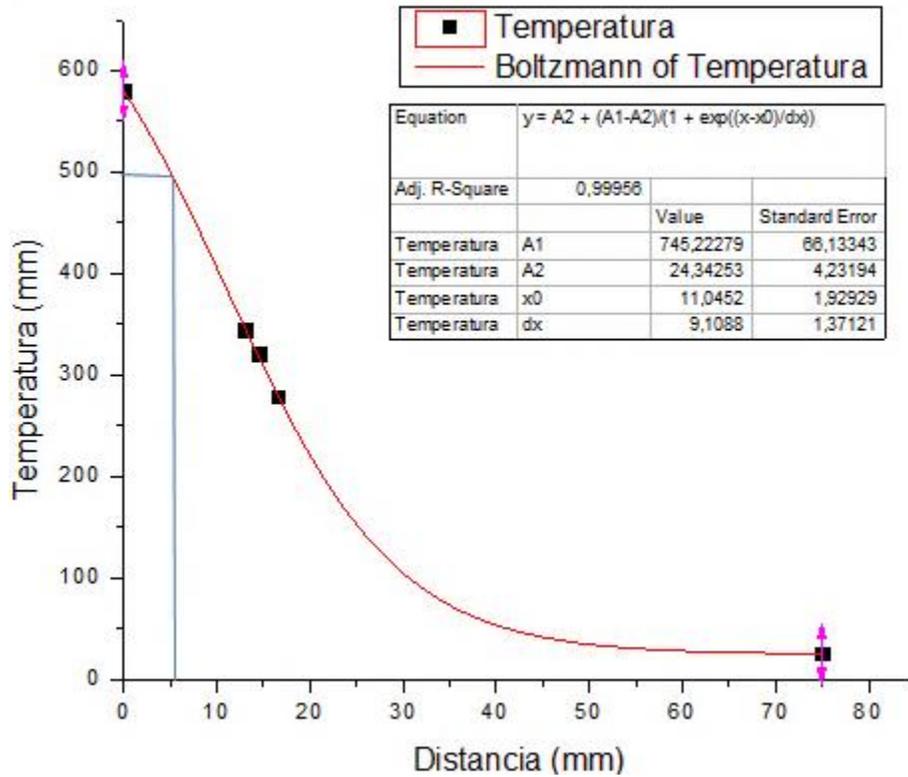
Con base en el grafico 49 se puede establecer que el límite de la zona agitada a una profundidad de 3mm se encuentra a 6mm de la fuente de calor. Esta distancia es la distancia limitante entre ZA y ZATM. Después de este análisis se procede a graficar los puntos picos del ciclo térmico para el lado de avance junto a los puntos establecidos teóricamente. Estos puntos están registrados en la tabla 29.

Tabla 29. Puntos de temperatura a analizar para la soldadura por fricción-agitación en maquina especializada SFA con herramienta de hombro plano.

Lado de Soldadura	Nombre	Distancia (mm)	Temperatura (°C)
Avance	Punto lejano	75	25
	Termopar 1	16,5	278,562
	Termopar 2	14,5	320,574
	Termopar 3	13	344,277
	Punto pin	0	580

El planteamiento anterior y la tabla 29 permiten emplear el programa OriginPro8, para obtener la gráfica de la figura 50. En este grafica se emplea el ajuste de Boltzmann para generar el perfil de temperaturas de la junta soldad y conocer la temperatura máxima alcanzada en la zona y que la tendencia nos permita determinar la temperatura a 6mm de distancia de la fuente de calor.

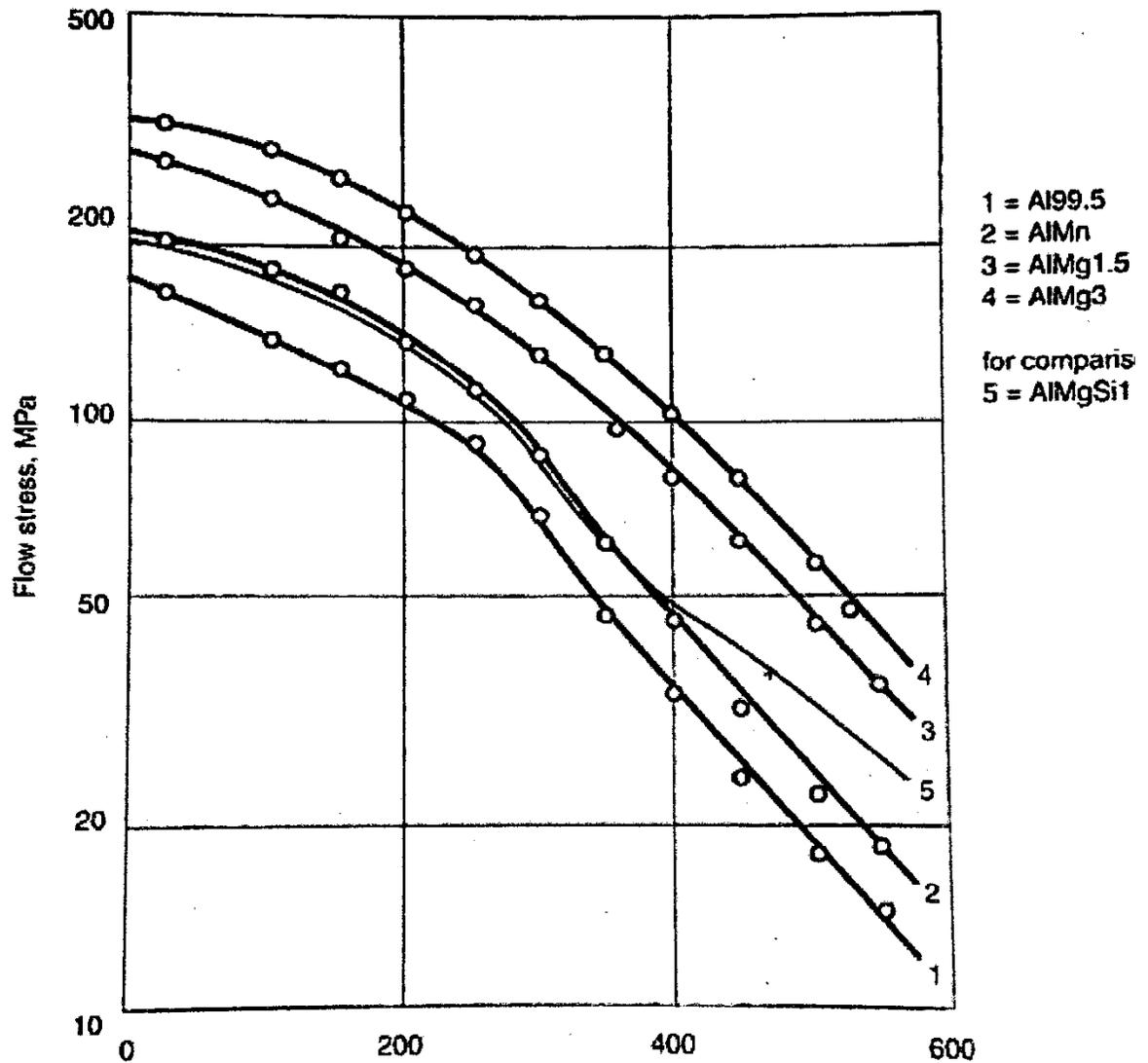
Figura 50. Ajuste Boltzmann para las medidas de temperaturas estudiadas para la soldadura por fricción-agitación en una maquina SFA con hombro plano.



Posteriormente, se emplea la temperatura encontrada para realizar un ajuste en el torque medido por la máquina. Este ajuste se realiza con base en la Ec. (2). En esta se relaciona el esfuerzo de flujo σ_{fluj} con la inversa de la función obtenida por r que es la distancia de la fuente de calor y z que es el espesor de la placa, función correspondiente a la inversa de la calculada para la forma del nugget.

El esfuerzo de flujo depende la temperatura del material, por lo cual se emplea la gráfica de la figura 51 para conocer el valor de σ_{fluj} para la temperatura en la zona agitada.

Figura 51. Gráfico de esfuerzo de flujo en función de la temperatura para distintos tipos de aluminio



Utilizando la Ec. (2) se obtiene que el torque requerido para realizar la deformación plástica del material en la zona agitada a las temperaturas establecidas por el perfil de temperaturas proyectado para todo el corte transversal de la soldadura hasta llegar al centro del cordón de soldadura con el ajuste de boltzman.

Tabla 30. Esfuerzos de flujo y fluencia calculado para la zona agitada en soldaduras por fricción agitación en maquina SFA con herramientas de hombro plano.

Ecuación de ajuste de temperatura del Nugget (°C)		$r=(24,34253)+((745,22279-24,34253)/(1+\exp((z-11,0452)/(9,1088))))$ Ec. (35)	
Distancia de trabajo (mm)		6	
Temperatura Ecuación Boltzmann (°C)		513,04	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	18,93	Yield Stress (Mpa)	6,14
Temperatura Grafico Boltzmann (°C)		500	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	20,67	Yield Stress (Mpa)	6,45
Temperatura Máxima Nugget (°C)		580	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	13,5	Yield Stress (Mpa)	4,86
Temperatura Máxima Nugget (°C)		371	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	45,1	Yield Stress (Mpa)	11
Variable de estado de contacto δ	0,5	0,14	0,4
Deslizamiento = 0 y Adherencia = 1, entonces $0 < \delta < 1$			

Posteriormente se evalúa la eficiencia térmica una vez que se determine el torque con respecto a los esfuerzos de flujo estimado, luego con respecto al Yield stress o esfuerzo de fluencia se estima el calor de entrada al proceso según las ecuaciones Ec. (2) y, Ec. (20) y Ec. (22), respectivamente. Una vez se tienen estos datos se procede a calcular la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación en maquina especializada para cordones en los que se emplea una herramienta de hombro plano.

Tabla 31. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de adherencia.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	τ_{yield}	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina	Temperatura de Análisis
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmech (w)	%	(°C)
Plana	201509170001	1000	100	1326,67	6.350.853	11	4200,00	1107,76	1154,13112	95,98	371

Tabla 32. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Rotación	Vel. De Avance	Fuerza de Avance	Coefficiente de fricción	$\tau_{contact}$	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina	Temperatura de Análisis
		w (RPM)	Vs (mm/min)	Fx (N)	@°C		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmech (w)	%	(°C)
Plana	201509170001	1000,00	100	1326,67	0,337	5.562.158	11,04	4200,00	970,19	1158,32	83,76	371

En las tablas 31 y 32 se presenta el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA en una maquina especializada empleando una herramienta de hombro plano, el cual se desarrolla bajo la misma temperatura de análisis de 371°C. Se observa que para ambos casos la potencia mecánica es la misma, ya que esta depende de parámetros operacionales y de las fuerzas axial F_z y fuerza de avance F_x . Por el contrario, los valores estimados como el calor de entrada al proceso si presentan diferencia de 184w, siendo mayor para el modelo de adherencia. En consecuencia para este caso el modelo de adherencia muestra una mayor eficiencia del proceso un 12.22% mayor.

Para el caso del cordón de soldadura realizado con la maquina especializada SFA empleando una herramienta de hombro concéntrico no se cuenta con la metalografía del cordón de soldadura para el análisis térmico del proceso. Sin embargo, Fábregas et. al. [59] ha desarrollado una simulación empleando la geometría de dicha herramienta en un estudio bajo los parámetros operacionales similares a los utilizados en la experimentación. En consecuencia, se puede tomar el valor de torque de 13,73 Nm para lograr realizar el análisis bajo esta condición. Para esta caso ya que no se cuenta con la microestructura del cordón soldado con herramienta de hombro concéntrico, por tanto, es imposible identificar la distancia en la que se divide la ZA y la ZATM a 3mm de profundidad. Lo que con lleva, a no se conoce el esfuerzo de fluencia a la temperatura de la ZA, por lo cual solo se procede a evaluar el modelo de adherencia a la temperatura máximo establecida en las tablas de propiedades de los materiales.

Aplicando este valor se generan las 33 y 34. Para este caso de soldadura en maquina especializada SFA empleando una herramienta de hombro concéntrico, tanto el calor de entrada al proceso como la eficiencia térmica del mismo presentan valores similares. Por tanto, los modelos de deslizamiento y adherencia generan la misma aproximación de eficiencia térmica, un 77%.

Tabla 33. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	τ_{yield}	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina	Temperatura de Análisis
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)	Pa	T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmech (w)	%	(°C)
Plana	201509170001	100,00	1000,00	64,32	6.350.853	13,73	3449,28	1107,76	1437,91	77,04	371

Tabla 34. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro concéntrico para el enfoque de deslizamiento.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	Coefficiente de fricción	$\tau_{contact}$	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)	@°C	Pa	T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmech (w)	%
Concéntrica	201509170001	100	1000	64,32	0,470	6.370.749	13,73	3449,28	1111,23	1437,91	77,28

4.3.2 Análisis del proceso de soldadura por fricción agitación en una maquina fresadora adaptada para SFA.

El análisis térmico del proceso de soldadura por fricción agitación parte de conocer las fuerzas axiales F_z y la fuerza de avance F_x , estas se conocen porque fueron medidas con el dispositivo de fuerzas previamente descrito. El paso a seguir después es conocer el torque τ , en este estudio se busca corroborar los datos medidos por el torquímetro para brindar confiabilidad a la metodología. En consecuencia, se procede utilizar los ciclos térmicos medidos para establecer el perfil de temperatura de las placas. Estos también permiten establecer el comportamiento de la temperatura en diferentes puntos de la placa.

Tomando las temperaturas pico registradas en los ciclos térmicos se procede a graficar una curva de tendencia de la temperatura. El estableciendo dos condiciones en los extremos de cada placa. La primera condición dicta que existe un punto alejado a 75mm del tope del cupón donde se considera que por su lejanía de la fuente de calor y dado el caso de que se suelda con aluminio este punto registraría temperaturas ambientes T_0 . La segunda condición dicta que existe un punto dentro de la zona agitada, cuya posición se calcula con la geométrica del pin y la tabla 28 [28]. Esta tabla 28 establece que en las temperaturas de trabajo del proceso SFA se encuentran entre 440°C-550°C durante la soldadura de piezas de aluminio.

Biswas et. al. [34] establecen que en la zona de agitación del material se trabajan con temperatura del 80% de la temperatura de fusión del material soldado. Esto indica que se alcanzan 530°C de temperatura para el aluminio 1100 ($T_{\text{fusión}} 660^\circ\text{C}$) en dicha zona. Sin embargo, como se toma como referencia la superficie del pin se asume que la temperatura es mayor, por lo cual se establece un valor de 550°C que corresponde a la temperatura máxima registrada en la literatura [20] [11].

Con base en lo anterior, se calcula la distancia a la que se encuentra el perímetro con respecto a la profundidad a la que se encuentran ubicados los termopares (3mm). Esto permite conocer que el segundo de punto de temperatura añadido que está a 1,263mm de la fuente de calor.

Posteriormente se grafica la función $z_f(r)$ que describa la geometría de la zona agitada (o nugget) obtenido por la soldadura por fricción-agitación de placas de aluminio AA1100-H14, empleando herramientas con hombro plano y en espiral que corresponde a las figuras 52 y 54 respectivamente, obtenidos por un estudio previo de Torres [29]. Las figuras 53 y 55 permitieron conocer la distancia a la cual se encuentra el límite de la zona agitada a profundidad de 3mm al graficar el perfil de la zona agitada y el perfil del pin en la junta para la soldadura para la condición de hombro plano y con hombro en espiral, respectivamente.

Figura 52. Forma de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con hombro plano en fresadora adaptada para SFA [29].



Figura 53. Gráfico de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con herramienta de hombro plano en fresadora adaptada para SFA.

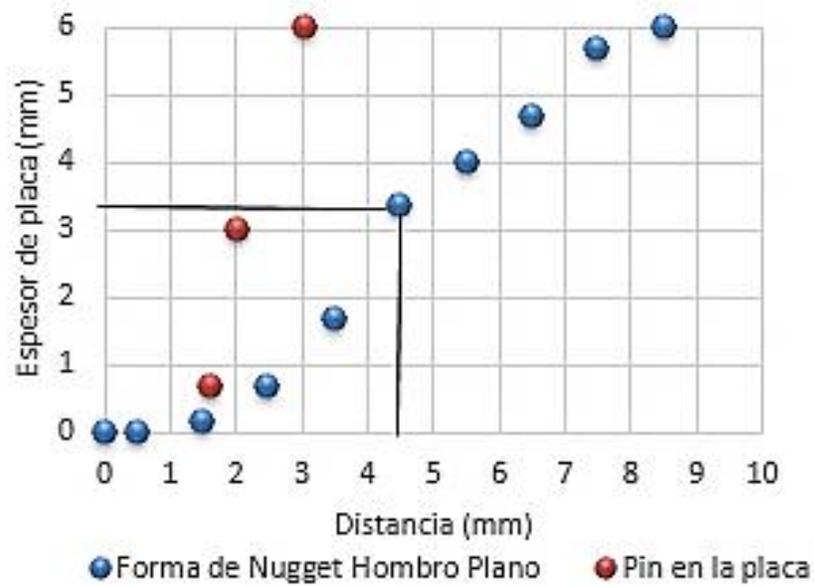
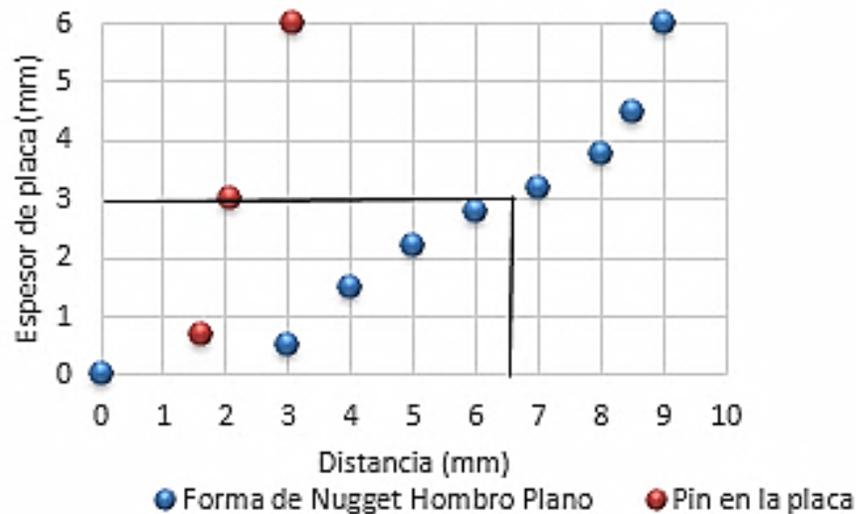


Figura 54. Forma de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con hombro en espiral en fresadora adaptada [29].



Figura 55. Gráfico de la zona agitada (nugget) obtenido para la soldadura por fricción-agitación con herramienta de hombro en espiral en fresadora adaptada.



Con base en el gráfico se puede establecer que el límite de la zona agitada a una profundidad de 3mm se encuentra para el cordón generado con la herramienta de hombro plano está a 4,5mm de la fuente de calor. Mientras, que para el cordón generado con hombro en espiral está a 6,5mm de la fuente de calor. Después de este análisis se procede a graficar los puntos picos del ciclo térmico para el lado de avance junto a los puntos establecidos teóricamente. Estos puntos están registrados en la tabla 35 y 36.

Tabla 35. Puntos de temperatura a analizar para la soldadura por fricción-agitación en fresadora adaptada con herramienta de hombro plano.

LECTURA CON TERMOPARES HERRAMIENTA CONCENTRICA			
Lado de Soldadura	Nombre	Distancia (mm)	Temperatura (°C)
Avance	Punto lejano	75	25
	Termopar 1	17	130,6
	Termopar 2	15	243,6
	Termopar 3	11	306,9
	Punto pin	0	528

El planteamiento anterior y la tabla 35 permite emplear el programa OriginPro8, para obtener la gráfica de la figura 56. En este grafica se emplea el ajuste de Boltzmann para generar el perfil de temperaturas de la junta soldad y conocer la temperatura máxima alcanzada en la zona y que la tendencia nos permita determinar la temperatura a 4,5mm de distancia de la fuente de calor.

Figura 56. Ajuste Boltzmann para las medidas de temperaturas estudiadas para la soldadura por fricción-agitación en una maquina fresadora adaptada con hombro plano.

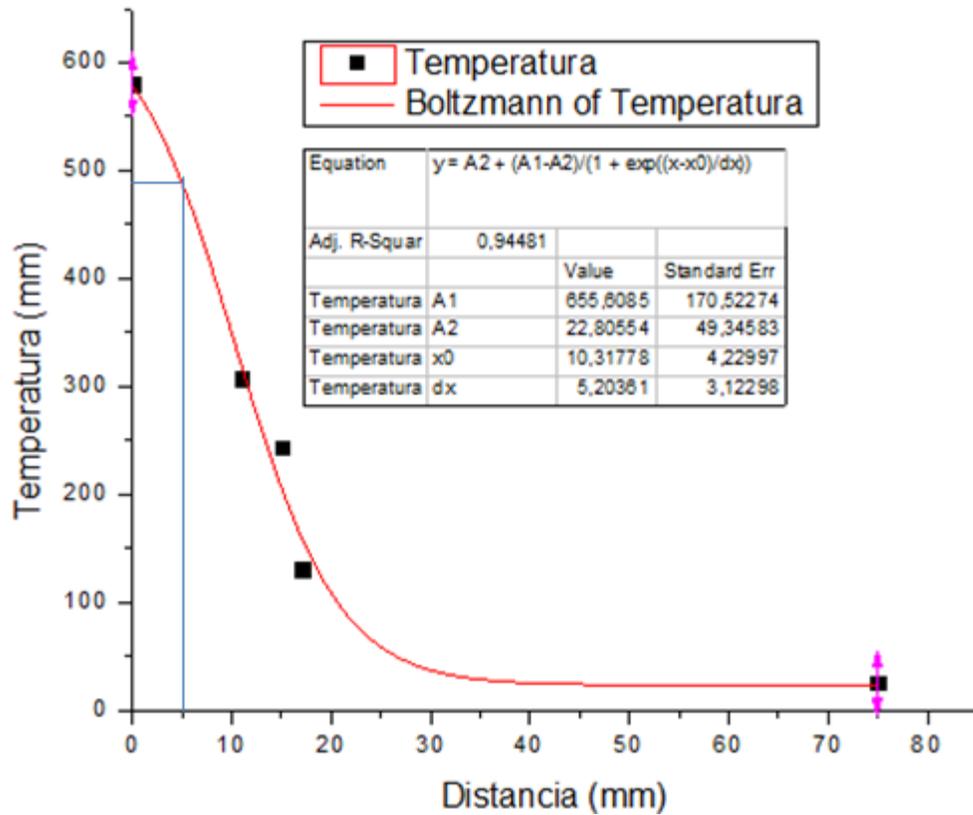
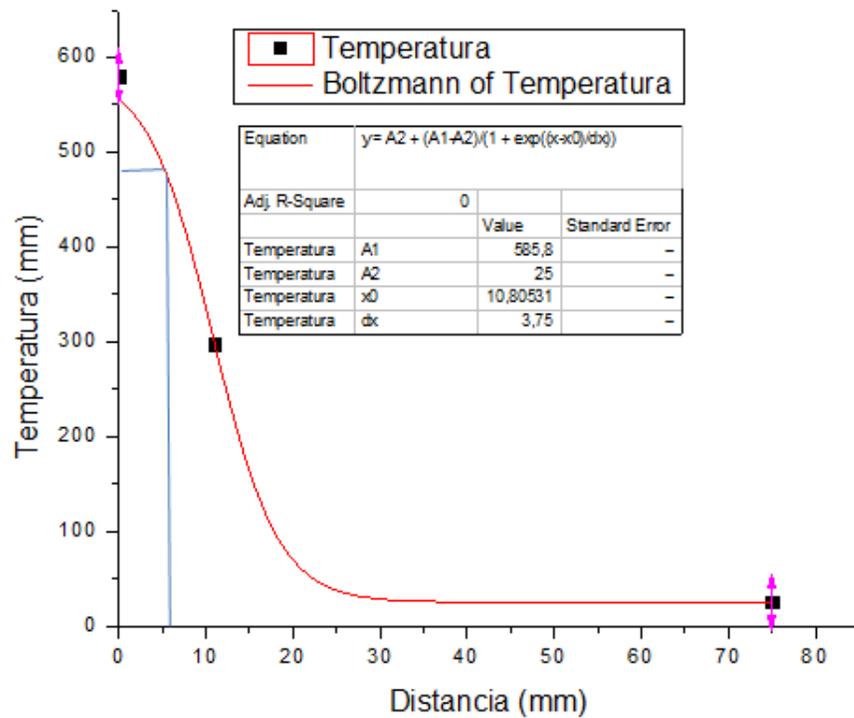


Tabla 36. Puntos de temperatura a analizar para la soldadura por fricción-agitación con herramienta de hombro en espiral empleando una maquina fresadora adaptada.

LECTURA CON TERMOPARES			
Lado de Soldadura	Nombre	Distancia (mm)	Temperatura (°C)
Retroseso	Punto lejano	75	25
	Termopar 1	11	297,5
	Punto centro	0	580

Así mismo, con base en el planteamiento anterior y la tabla 36 se emplea el programa OriginPro8, para obtener la gráfica de la figura 57. En este grafica se emplea el ajuste de Boltzmann para generar el perfil de temperaturas de la junta soldad y conocer la temperatura máxima alcanzada en la zona y que la tendencia nos permita determinar la temperatura a 6,5mm de distancia de la fuente de calor.

Figura 57. Ajuste Boltzmann para las medidas de temperaturas estudiadas para la soldadura por fricción-agitación con hombro en espiral en maquina fresadora adaptada para SFA.



Posteriormente, se emplean las temperaturas encontradas para realizar un ajuste en el torque medido por la máquina. Este ajuste se realiza con base en la Ec. (2). La ecuación (2) relaciona el esfuerzo de flujo σ_{fluj} con la inversa de la función obtenida por r que es la distancia de la fuente de calor y z que es el espesor de la placa, función correspondiente a la inversa de la calculada para la forma de la zona agitada para el cordón soldado con la herramienta de hombro plano y para el cordón soldado con la herramienta de hombro en espiral.

Debido a que el esfuerzo de flujo depende la temperatura del material, se emplea la gráfica de la figura 51 para conocer los valores de σ_{flujo} para la temperatura en la zona agitada. Luego, se emplea la temperatura encontrada para realizar un ajuste en el torque medido por la máquina.

Utilizando la Ec. (2) se obtienen que los torques requeridos para realizar la deformación plástica del material en la zona agitada a las temperaturas establecidas por el perfil de temperaturas proyectado para todo el corte transversal de la soldadura hasta llegar al centro del cordón de soldadura con el ajuste de boltzman. A continuación, se presentan los valores correspondientes al esfuerzo de flujo, al esfuerzo de fluencia a diversas temperaturas para el perfil de hombro plano y el perfil hombro en espiral en la tablas 37 y 38, respectivamente.

Tabla 37. Esfuerzos de flujo y fluencia calculado para la zona agitada en soldaduras por fricción agitación en maquina fresadora adaptada con herramientas de hombro plano.

Ecuación de cálculo temperatura del nugget (°C)		$r=(22,80554)+((655,6085-22,80554)/(1+\exp((z-10,31778)/(5,20361))))$ Ec. 36	
Distancia de trabajo (mm)		4,5	
Temperatura Ecuación Boltzmann (°C)		534,07	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	19,6	Yield Stress (Mpa)	6,25
Temperatura Grafico Boltzmann (°C)		485	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	22,67	Yield Stress (Mpa)	6,83
Temperatura Máxima Nugget (°C)		580	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	13,5	Yield Stress (Mpa)	4,86
Temperatura Máxima Nugget (°C)		371	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	45,1	Yield Stress (Mpa)	11
Variable de estado de contacto δ	0,1	0,2	0,4
Deslizamiento = 0 y Adherencia = 1, entonces $0 < \delta < 1$			

Tabla 38. Esfuerzos de flujo y fluencia calculado para la zona agitada en soldaduras por fricción agitación en maquina fresadora adaptada con herramientas de hombro en espiral.

Ecuación de cálculo temperatura del nugget (°C)		$r=(25)+((585,8-25)/(1+\exp((z-10,80531)/(3,75))))$ Ec. 37	
Distancia de trabajo (mm)		6,5	
Temperatura Ecuación Boltzmann (°C)		488,70	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	22,22	Yield Stress (Mpa)	6,73
Temperatura Grafico Boltzmann (°C)		480,00	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	23,67	Yield Stress (Mpa)	6,97
Temperatura Máxima Nugget (°C)		580,00	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	13,5	Yield Stress (Mpa)	4,86
Temperatura Máxima Nugget (°C)		371,00	
Esfuerzo de Flujo (Mpa)	45,1	Yield Stress (Mpa)	11

Posteriormente se evalúa la eficiencia térmica una vez se determine el torque con respecto a los esfuerzos de flujo estimamos el torque, y con respecto al Yield stress o esfuerzo de fluencia el calor de entrada al proceso según las ecuaciones Ec. (2), y Ec.(20) y Ec.(22), respectivamente. Una vez se tienen estos datos se procede a calcular la eficiencia térmica del proceso de soldadura por fricción agitación en fresadora para cordones en los que se emplea una herramienta de hombro plano y una herramienta de hombro en espiral, tal como se muestra en las tablas. Las ecuaciones 36 y 37 muestran la función inversa para la geometría de la zona agitada del cordón de soldadura SFA.

Tabla 39. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	τ_{yield}	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina	Temperatura de Análisis
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmec. (w)	%	(°C)
Plana	201509170001	100,00	1000,00	1326,67	6.350.853	11,04	4200,00	1107,76	1158,32	95,63	371

Tabla 40. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro plano para el enfoque de deslizamiento.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	Coeficiente de fricción	$\tau_{contact}$	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina	Temperatura de Análisis
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)	@°C		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmec. (w)	%	(°C)
Plana	201509170001	100,00	1000,00	1326,67	0,337	5.562.158	11,04	4200,00	970,19	1158,32	83,76	371

. **Tabla 41.** Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro en espiral para el enfoque de adherencia

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	τ_{contact}	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmec. (w)	%
Espiral	201509170001	97,00	900,00	1326,67	6.350.853	14,69	7466,67	996,98	1386,65	71,90

Tabla 42. Cálculos de eficiencia térmica para la soldadura por fricción-agitación en maquina fresadora adaptada empleando una herramienta de hombro en espiral para el enfoque de desplazamiento.

Herramienta	Nombre Referencia	Vel. De Avance	Vel. De Rotación	Fuerza de Avance	Coefficiente de fricción	τ_{contact}	Torque Calculado	Fuerza Axial	Entrada de Calor Calculada	Potencia de Entrada	Eficiencia Maquina
		Vs (mm/min)	w (RPM)	Fx (N)	@°C		T (Nm)	Fz (N)	Q (w)	Pmech (w)	%
Espiral	201509170001	97,00	900,00	1326,67	0,409	6.756.013	14,69	4200,00	1060,59	1386,65	76,49

En el caso de los cordones de soldadura realizados en maquina fresadora adaptada empleando un hombro plano, se obtiene eficiencias distintas. Estas eficiencias presentan una diferencia entre los enfoques de adherencia y deslizamiento de un 11.87%. Esta diferencia entre las eficiencias térmicas también sucedió con hombro plano ensayado en la maquina fresadora adaptada. Por el contrario, los cordones para las soldaduras realizadas con la herramienta de hombro grabado en espiral no presentan gran diferencia, esta es solo de un 4,59%. La metodología empleada permitió calcular la eficiencia térmica del proceso SFA, mediante un método sencillo y práctico, que te permite emplear datos de la literatura que correspondan con los parámetros operacionales empleados.

Además, se procedió a emplear la metodología planteada para el cálculo de la eficiencia energética empleado los datos de artículos científicos. Uno de es el estudio realizado por Cui et. al.

Tabla 43. Aplicación del modelo de enfoque de deslizamiento al trabajo realizado por Cui et. al. [41]

Metal-aleación utilizada	Tipo de perfil de herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Fuerza de translación Fx, (N)	Fuerza de penetración Fz, (N)	Torque, (Nm)	Potencia mecánica (W)	Coefficiente de fricción μ	Área de contacto (m ²)	Presión ejercida por el hombro (Pa)	Calor de entrada al proceso	Eficiencia térmica η
AA1050 espesor 4mm	Pin liso hombro convexo	800	48	450	1550	21,49	1799,94	0,29	0,00018146	8541883,135	218,13	0,879
AA1050 espesor 4mm	bordes redondeados	800	48	450	1550	12,89	1079,94	0,29	0,00012668	12235827,88	198,46	0,816

Tabla 44. Aplicación del modelo de enfoque de deslizamiento al trabajo realizado por Fonda et. al. [60]

Metal-aleación utilizada	Tipo de perfil de la herramienta	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Fuerza de translación Fx, (N)	Fuerza de penetración Fz, (N)	Torque, (Nm)	Potencia mecánica (W)	Coefficiente de fricción μ	Presión ejercida por el hombro (Pa)	Calor de entrada al proceso	Eficiencia térmica η
A356 (Al-7Si-0.3Mg)	Hombro cóncavo	710	224	580	5000	38,20	2841,84	0,116	19648712,46	285,999218	0,899

Las tablas 43 y 44 presentan la aplicación de la metodología para el cálculo de la eficiencia térmica del proceso SFA. En el trabajo de Cui et. al. [41] se alcanza una eficiencia térmica de 82 a 88%, y en el trabajo de Fonda et. al. [60] se alcanzan eficiencia térmica de 90%. Estos valores son elevados y consecuentes con la teoría estudiada durante todo este trabajo.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo la soldadura de placa AA1100-H14 con el proceso de soldadura por fricción-agitación empleando dos herramientas de trabajo una con perfil de hombro concéntrico y la otra más convencional, con perfil de hombro plano. La herramienta de hombro concéntrico debido a que posee un grabado de anillos cóncavos aumenta el área de contacto de la herramienta con el material de trabajo provocando una mayor fricción sobre el material y por consiguiente, la lectura de temperaturas superiores a las medidas con la herramienta de hombro plano. El trabajo plastificante también se ve aumentado al modificar el perfil de la herramienta, la herramienta concéntrica mueve más material por lo que la herramienta debe ejercer un mayor torque para poder agitar y soldar el cordón de soldadura.

Las eficiencias térmicas alcanzadas para el proceso fueron elevadas en todos los casos analizados ($\eta \geq 0.8$). Para el caso en el cual se empleó la herramienta plana en una maquina fresadora adaptada para el proceso y una maquina especializada en SFA se presentaron en ambos casos eficiencias por encima del 90% para el modelo de adherencia y para el modelo de deslizamiento por encima del 80%, lo que evidencia una diferencia de aproximadamente 10% entre ambos enfoques estudio. Por el contrario, en el caso de la soldadura con herramienta de hombro modificado, concéntrico y en espiral los valores de eficiencia están en el orden de un 82 a un 88%, por lo cual la diferencia entre los enfoques de los modelos es mínima.

Con base a los resultados expuesto y a las microestructuras presentadas para cada cordón de soldadura, se establece que efectivamente el proceso de soldadura por fricción agitación es altamente eficiente. Sin embargo, la energía que es aprovechada por el proceso de soldadura SFA no es distribuida de igual forma en cada soldadura. Es decir, la energía de entrada a la junta se distribuye una parte como carga la cual se evidencia en los ciclos térmicos y, la otra parte se emplea en trabajo plastificante. El factor que determina la porción que es repartida para cada trabajo es la geometría de la herramienta. En las herramientas con perfiles modificados se presentan ciclos térmicos con temperaturas uniformes y hay mayor trabajo plastificante; mientras que para las herramientas con perfil de hombro plano un perfil de temperatura con mayor pendiente, logrando un mayor trabajo generando calor que deformando el material. Por ende, al emplear el modelo de adherencia en soldadura con herramientas de perfil plano debido a que las variables empleadas dependen de la temperatura, este modelo logra ajustarse mejor al proceso que el modelo de deslizamiento.

Por otro lado, el modelado empleando el enfoque de deslizamiento es el método más fácil de aplicar, debido que las variables que alimentan este modelo abundan en la literatura. Lo que convierte a este método con mayor aplicabilidad.

La metodología aplicada demostró que permite el cálculo de la eficiencia térmica del proceso para cualquier estudio a desarrollar o desarrollado. No obstante, requiere de un cálculo preciso de la temperatura de trabajo en la zona agitada para poder dar una buena aproximación en el valor del torque, de no tenerse se puede emplear la temperatura límite de medición del esfuerzo de fluencia del material a soldar.

RECOMENDACIONES

Para próximos estudios se debe tener en cuenta:

- Los cordones de mayor longitud permiten alcanzar una mayor estabilidad del proceso de soldadura por fricción-agitación, por lo que se puede hacer una mejor lectura de los parámetros en estado estacionario. Además, esto generara un mejor acabado en el cordón de soldadura tal como se observa en las muestras soldaduras obtenidas por este estudio. Se recomienda emplear una longitud mínima de 80mm para poder tomar medición de los parámetros y variables de salida del proceso.
- Colocar un mayor número de termopares así, como aumentar la cantidad de muestras en la que se realiza la medición de temperatura permitirá conseguir un mejor perfil de temperaturas, y en consecuencia, lograr un mejor ajuste para predecir la temperatura en la zona agitada ZA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. H. a. J. W. H. Schmidt, «An analytical model of the heat generation in friction stir welding,» *Modeling And Simulation In Materials Science And Engineering*, pp. 143-157, 2004.
- [2] E. N. N. J. e. a. F. S. W. The Welding Institute Wayne T..Patente US Int Cl. B23K 20/12, US 5,460,317, 24 Octubre 1995.
- [3] R. S. Mishra, «Introduction,» de *Friction Stir Welding And Processing*, Switzerland, Springer International Publishing, 2014.
- [4] R. K. Uyyuru y S. V. K. , «Numerical Analysis of Friction Stir Welding Process,» *Journal of Material Engineering and Performances*, vol. 15, nº 5, pp. 505-518, 2006.
- [5] V. I. y. P. V. Catarina Vidal, «Assement Of Improvement Techniques Effects On Fatigue Behaviour Of Friction Stir Welded Aerospace Aluminium Alloys,» pp. 1605-1616, 2010.
- [6] W. C. e. a. Christopher B. Smith, «Friction Stir Welding In The Automotive Industry,» 2001.
- [7] K. V. J. K. S. R. Jhon, «Residual Stress Effects On Near-Threshold Crack Growth In Friction Stir Welds In Aerospace Alloys,» pp. 939-948, 2003.
- [8] C. o. W. i. t. A. a. A. Industries, «Specifications for friction stir welding of aluminium alloys for aerospace applications,» *America Welding Society*, pp. 1-41, 2010.
- [9] J. L. P. Yepes, *Modelado dinámico del aporte de calor en juntas soldadas de aleaciones de aluminio de la serie 5xxx obtenidas con procesos de soldadura al arco con protección gaseosa*, Barranquilla, 2014.
- [1 O. M. Murillo, *Desarrollo Del Proceso De Soldadura FSW A Partir De Una*
0] *Maquina Fresadora.*, Santiago de Calí, Colombia.: Universidad del Valle, 2008, pp. 1-54.
- [1 H. B. S. y J. H. , «Thermal modelling of friction stir welding,» *Scripta materialia*,
1] vol. 58, pp. 332-337, 2008.

- [1 H. R. Shercliff y P. A. C. , «Process Modeling,» de *Friction Stir Welding And*
2] *Processing*, Switzerland, Springer International Publishing, 2014, pp. 187-217.
- [1 D. Lopez y E. H. , *Efecto De Los Parámetros De Proceso En La Microestructura*
3] *y Esfuerzos Residuales De Juntas A Tope Al-Al y Al-Acero Inoxidable Por*
Fricción-Agitación FSW, Medellín, 2010.
- [1 I. Berdugo y R. O. , *Influencia De La Geometría De La Herramienta Sobre Los*
4] *Parámetros De Soldadura Por Fricción-Agitación-SFA En Aleaciones De*
Aluminio AA1100-H14, Barranquilla, Colombia: Universidad Autónoma Del
Caribe, 2013.
- [1 J. P. Yepes, *Desarrollo De Un Modelo Teórico Experimental Para Ciclos*
5] *Térmicos Y Perfiles De Temperatura En Juntas Soldadas Obtenidos Por*
Procesos De Soldadura Al Arco Eléctrico, Barranquilla: Universidad Autónoma
Del Caribe, 2015.
- [1 R. Messler, *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry And*
6] *Metallurgy*, vol. X, New York, USA: Jhon Wiley And Sons, 1999, pp. 1-662.
- [1 O. M. O. Frigaard Grond, *Modeling Of Heat Flow Phenomena In Friction Stir*
7] *Welding Of Aluminium Alloys*, INALCO 98 Joinys In Aluminium, 1999, pp. 208-
218.
- [1 A. G. y. S. C. Ravi Kumar, «Emerging Friction Stir Welding for Aluminium and
8] its Applications,» *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, pp. 1-5,
20 Agosto 2014.
- [1 R. G. Ledesma, *Diseño y comportamiento de uniones mecánicas y adhesivas.*
9] *Condiciones operaciones y superficiales.*, Madrid: Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales de Madrid, 2013.
- [2 C. 6, «Welding As A Joining Process».
0]
- [2 A. W. Society, *Standar Welding Terms And Definitions*, Miami, 2009.
1]
- [2 *Catalogo De Soldaduras ESAB*, 2010.
2]
- [2 S. Kou, «Welding Metallurgy,» New Jersey, 2002.
3]

- [2 O. Grong, Metallurgical Modeling of Welding, Maney Pub, 1997.
4]
- [2 G. J. Feng Z., «Heat Flow Simulation For Friction Stir Welding Of Aluminium
5] Alloys,» vol. 7, 1998.
- [2 L. Q. J. F. d. S. R. Z. y. S. S. Pedro Vilaça, «Quality assessment of friction stir
6] welding joints via an analytical thermal model, iSTIR,» pp. 501-508, 2007.
- [2 M. M. Attallah, «Friction Stir Welding Process, Modelling and Microstructure,»
7] de *Microstructure - Property Development Of Friction Stir Welds Of Aluminium Based Alloy*, 2007.
- [2 ESAB, Friction Stir Welding Technical Handbook.
8]
- [2 J. A. S. J. A. Querin, «Developing An Alternative Heat Indexing Equation For
9] FSW,» vol. 91, 2012.
- [3 A. Torres Ardila, *Influencia Del Perfil De La Herramienta Sobre La
0] Microestructura De Juntas Soldadas De Aleación De Aluminio AA1100 Obtenidas Por el Proceso De Soldadura Por Fricción Agitación*, Barranquilla: Universidad Autónoma Del Caribe, 2013.
- [3 M. M. Attallah, *Microstructure-Development of Friction Stirs Welds in
1] Aluminium-Based Alloys*, Inglaterra, 2007.
- [3 I. A. J. L. H. R. y. P. J. W. P. L. Threadgil, «Friction Stir Welding Of Aluminium
2] Alloys,» *International Materials Reviews*, vol. 54, pp. 49-93, 2009.
- [3 P. L. T. T. Bull., 1997.
3]
- [3 P. B. y. N. R. Mandal, «Effect Of Tool Geometries On Thermal History Of FSW
4] Of AA1100,» *Welding Journal*, pp. 129-135, 2011.
- [3 P. Systems. [En línea]. Available: <http://www.par.com/technologies/friction-stir-welding/>. [Último acceso: 10 08 2016].
5]
- [3 H. G. Svoboda, «Innovación En Soldadura. Proceso De Soldadura Por Fricción
6] Agitación FSW,» INTECIN-FIUBA y CONICET, Buenos Aires, 2009.

- [3 A. A. S. S. L. B. e. al., «Modeling And Analysis Of Friction Stir Welding
7] Processes,» 2001, pp. 42-54.
- [3 S. H. y. H. J., «Thermal modeling of friction sstir welding.,» *SCRIPTA*
8] *MATERIALIA*, vol. Vol. 58, pp. págs. 332-337, 2008.
- [3 R. B. D. S. e. a. Aramyo G., «Modeling Of Friction Stir Welding Process For
9] Fusion Energy Applications In Fusion Materials,» *Semianual Progress Report*
For Period Ending , pp. 2-5, 30 June 2002.
- [4 N. R., «Recent Advances In Friction Stir Welding Process,» pp. 1-5, 2008.
0]
- [4 C. Z. R. J. Cui S., «A Model Relating Tool Torque And Its Associated Power And
1] Specific Energy To Rotation And Foward Speeds During Friction Stir
Welding/Processing,» pp. 1023-1030, 2010.
- [4 A. M. S. G. E. C. y. P. A. F. William R. Longhurst, «Torque control of friction stir
2] welding for manufacturing and automation,» 2010.
- [4 S. J. Chapman, *Máquina Eléctricas*, Santa Fe de Bogotá: Mc Graw Hill, 2000.
3]
- [4 J. A. E. G. älvarez, «asi funciona,» 09 2015. [En línea]. Available:
4] [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_potencia/ke_potencia_elect_3.ht](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_potencia/ke_potencia_elect_3.htm)
m. [Último acceso: 10 2015].
- [4 K. A. Vijay Shivaji Gadakh, «Heat generation model for taper cylindrical pin
5] profile in FSW,» *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 370-375,
2013.
- [4 T. I. a. S. H. Toshio Tmimura, «Effective Dinamic Firction Coeficient between
6] Rotating Rod and Aluminium Alloy Plate Evaluated by Thermal Method,» pp.
104-108, 2009.
- [4 M. T. M. Javadi, «Experimental Investigation Of The Friction Coefficient
7] Between Aluminium And Steel,» vol. 24, 2006.
- [4 Q.-y. S. H. R. S. Terry Dickerson, «Heat Flow Into Friction Stir Welding Tools,»
8] de *4th International Symposium on Friction Stir Welding*, Utah, USA, 2003.

- [4 E. D. N. P. M. B. Stephan w. Kallee, «TWI Global Ltd,» 2016. [En línea].
9] Available: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/application-of-friction-stir-welding-for-the-manufacture-of-aluminium-ferries-may-2000/>. [Último acceso: 10 08 2016].
- [5 S. A. E. a. A. E. Domiaty, «A Refined Energy-Based Model for Friction-Stir
0] Welding,» vol. 53, 2009.
- [5 X. Q. y. W. T. Yuh J. Chao, «Heat Transfer in Friction Stir Welding- Experimental
1] and Numerial Studies,» *Transactions of the ASME*, pp. 138-145, 2003.
- [5 I. B. y. R. Ospino, *Influencia De La Geometria De La Herramienta En los
2] Parametros De Soldadura Por Fricción-Agitación SFA En Aleaciones De Aluminio AA1100-H14*, Barranquilla: Univrsidad Autónoma Del Caribe, 2013.
- [5 J. C. C. I. B. R. O. y J. U. s. , «Optimización del diseño y fabricación de
3] herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación,» *Visión Electronica*, vol. 7, nº 2, pp. 135-144, 2013.
- [5 J. F. y. J. V. Luis Fernandez, «Diseño de herramienta para el proceso SFA
4] desmontable e intercambiable». Colombia 2015.
- [5 «MATWEB Material Property Data,» [En línea]. Available:
5] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7&ckck=1>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [5 S. P. Perez, «Diseño e implementación de un sistema de medición de torque en
6] tiempo real para proceso de soldadura por fricción SFA,» Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, 2015.
- [5 J. y. O. E. Arrieta, *Diseño de un sistema de medición de fuerza axial y normal
7] aplicado a un porceso de soldadura por fricción-agitación*, Barranquilla: Universidad Autónoma Del Caribe, pp. 1-102.
- [5 Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, Segunda edición ed., Limusa
8] Wiley, 2007.
- [5 J. Fabregas, J. V. y J. U. , «Modelado térmico de juntas soldadas de aluminio
9] puro AA1100 obtenidas por proceso de soldadura por fricción-agitación,» *X Congreso Colombiano de Metodos Numéricos*, pp. 1-8, 2015.

- [6 R. W. Fonda, J. A. W. A. P. R. y W. T. , «Friction stir welding of a single crystal
0] aluminium,» *Science and technology of welding and joining*, vol. 12, nº 4, pp.
304-310, 2007.
- [6 B. G. H. J. e. a. SMITH C., «Heat and material flow modeling of friction stir
1] welding process.,» de *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER
TECHNOLOGY IN WELDING*, Detroit, U.S.A., 1999.
- [6 R. L. Mott P.E., *Diseño de elementos de maquina*, Cuarte Edición ed., Pearson
2] Educación, 2006, pp. 34,105.
- [6 P. L. Threadgill, «Terminology in friction stir welding,» *Science and thecnology
3] of welding and joining*, pp. 357-360, 2007.
- [6 F. F. O. Murillo, *Desarrollo Del Proceso De Soldadura FSW A Partir De Una
4] Maquina Fresadora.*, Santiago de Calí, Colombia., pp. 1-54.