



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
ZACATECAS**

**“Francisco García Salinas”**

---

---



**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA I  
Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales**

**“Estudio de la microestructura-propiedad en la  
soldadura por fricción de aluminio-acero”**

# **TESIS**

Que para obtener el título de:  
**Maestro en Ciencia e Ingeniería de los Materiales**

Presenta:

**I.Q Azalea Maldonado Pérez**

Director de tesis:

**Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández**

Asesores:

**Dr. Francisco Alvarado Hernández**

**Dr. Enrique Alejandro López Baltazar**

Asesor externo:

**Dr. Francisco Reyes Calderón**

Zacatecas, Zac a 11 de Junio del 2021

**A Dios, a mi mamá Celia, a mi  
papá Simitrio y a mi hermana  
Larissa.**

## Agradecimientos

A Dios por no dejarme sola en ningún momento, por ser mi mejor amigo, por escucharme, aconsejarme y guiarme en este bello camino de la vida, sin ti y todos los regalos que me das a diario nada sería posible, todo es por ti y para ti. Gracias por darnos una oportunidad más a mí y a mi familia de seguir aquí en medio de esta pandemia y tiempos tan complicados.

A mis padres por ser los mejores padres del mundo, por hacer todo lo que ellos creen que es mejor para mí, por siempre estar conmigo para cuidarme, enseñarme y protegerme. A mi papá porque literalmente sin él no hubiera podido hacer este proyecto ya que siempre me ayudó en todo lo que necesité, desde cortar material hasta explicarme las cosas que a veces no eran fáciles de entender, estoy tratando de seguir tus pasos papá porque me gusta mucho lo que haces y desde niña te vi hacerlo y quiero hacerlo yo también. A mi mamá por ser la más hermosa y ser la mejor del mundo, por su amor incondicional, por escucharme y enseñarme de muchísimas cosas que ella ha aprendido no solo en el ámbito del conocimiento si no cosas para la vida, porque se que todo lo que has hecho ha sido pensando en mi bien. Los amo mucho, son lo más importante para mí y sin ustedes nunca habría soñado con hacer ciencia, gracias por mostrarme este camino que me gusta tanto, gracias por haberme querido preparar lo mejor posible para la vida <3.

A mi hermana por ser la mejor hermana y amiga del mundo, la mejor aliada y cómplice, por siempre estar dispuesta a ayudarme en cualquier cosa que necesite para la escuela y para todo. Gracias por darme tu ejemplo de dedicación y creatividad, te amo mucho bebecita.

A Emilio porque desde que inicié este camino de la maestría ha sabido estar para mí, en momentos buenos y en aquellos donde no veía la luz ni la manera de seguir y a pesar de que a veces era complicado entenderme siempre estuviste ahí para mí dejando a un lado cualquier cosa, animándome para poder hacer más

ameno este camino. Gracias por ayudarme incluso a preparar mis muestras, por acompañarme cuando los días en el taller eran largos y pesados, por ayudarme en lo que yo necesitara de la tesis, gracias por ser mi mejor amigo, te amo mucho.

A mi familia: a mis abuelos Roberto, Rosario, Nacho y Evangelina por haberme dado a mis padres y porque todos son un ejemplo para mí de superación y de cómo ser buenas personas, los quiero muchísimo y le agradezco mucho a Dios su existencia. A mis tías: Lucha, Licho, Mago, Nena, Hermila, las quiero mucho y siempre las tengo presentes. A mis primos, principalmente a Rita y a Gpe que son prácticamente dos hermanas más, que Dios nos permita compartir más momentos; y a mis tías que ya no están, pero siempre tengo en mi mente: Lupe, Tere, María y Ofelia, siempre van a estar en mi corazón.

A la Universidad Autónoma de Zacatecas que ha formado a tantos profesionistas y brinda a la sociedad zacatecana educación de calidad y que nuevamente me acogió para estudiar ahora mi maestría, a la Unidad Académica de Ingeniería I y al Programa de Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales por haberme permitido estudiar.

Al CONACYT por la beca que me otorgó en estos dos años con la cual pude solventarme para poder completar mis estudios.

Al doctor Víctor Hugo Baltazar Hernández por haberme asesorado en este proyecto en el cual aprendí muchísimo de un tema que era totalmente desconocido para mí y pude ampliar mis conocimientos. Muchas gracias por su apoyo, por su tiempo, por las enseñanzas aprendidas.

A los doctores Enrique Alejandro López Baltazar y Francisco Alvarado Hernández por haberme coasesorado y en cada uno de los seminarios haberme dado su retroalimentación para poder mejorar mi trabajo.

Al maestro Emilio Bautista porque trabajó a mi par ayudándome siempre en mi proyecto, desde que empecé a investigar como maquinar las herramientas hasta

que terminé mi última soldadura, ¡muchas muchas gracias! A pesar de que algunos días resultaron tediosos siempre estuvo ayudándome y teniéndome paciencia a mí y a las cosas que iban surgiendo.

Al maestro Ángel González por haberme ayudado a mi preparación de muestras, captura de micrografías, análisis de microdurezas y ensayos a tensión, el trabajo fue mucho pero siempre estuvo ayudándome en todo lo que necesité para concluir con mucha paciencia y su dedicación característica de él.

Al maestro Antonio Sosa porque siempre ha estado dispuesto a ayudarme en cualquier cosa que en el camino vaya necesitando.

A mis maestros que tuve durante la etapa de maestría: Dr. Omero Alonso, Dr. Sergio Haro, Dr. Víctor Baltazar, Dr. Francisco Alvarado, Dr. Pilar Orozco, Dr. Enrique López, Dr. Alejandro López y maestro Cecilio Martínez porque de cada uno me llevo conocimientos muy importantes.

También a cada uno de los maestros que he tenido a lo largo de mi vida porque cada uno ha aportado algo en lo que soy y se ahora, porque siempre confiaron en mí y me dieron alas para volar alto.

A mis compañeros de generación por el tiempo y aprendizajes compartidos.

A Frida, sin ti no sé cómo hubiera sido este trayecto, porque me ayudaste a desenredar mi vida y a querer ser mejor persona para mí principalmente pero también para los demás, a cómo manejar mi estrés y por escucharme siempre.

A Aisha, Lea, Cordelia, Chiara y a Nicki que, aunque ya no esté conmigo fue el ejemplo del más grande y sincero amor, siempre vas a estar en mi corazón y prometo jamás olvidarte. Las amo mucho a todas gracias por tanto amor incondicional y por hacer mis días más felices.

A mis amigas que siempre han estado para mí para pasar momentos de risa interminable pero también para atravesar momentos que quisiéramos no tener que vivir: Lupita, Naomi, Susi y Nidia <3 las amo mucho mucho. Gracias por ser las mejores amigas que podría tener. Nidia en verdad gracias por ser la mejor confidente y por preocuparte por mí siempre.

A J- por toda la inspiración, por ser mi salida en los momentos donde veo las cosas perdidas.

Y por último quiero agradecerme a mí, a Azalea niña por haber sido tan valiente, porque desde ese momento me permití soñar en grande, soñar que quería entender mejor el universo en el que vivo, soñar que algún día sería maestra, doctora y en un futuro más lejano científica, por ser resiliente, por ser estudiosa, por esforzarte en cumplir tus objetivos, por no dejar de creer en mí, por no permitir que las adversidades te detuvieran. Porque desde siempre me importó y me preocupó la manera en la que estamos destruyendo nuestro mundo y tuve la oportunidad de realizar una investigación que trata de mitigar un poco la gran problemática, porque mereces ser feliz, ¡lo hemos logrado! Un paso más cerca de nuestra meta.

# Índice

---

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Problemática .....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.4	Hipótesis .....	3
1.5	Justificación .....	4
1.6	Impacto .....	4
2	Revisión de la literatura.....	1
2.1	Aluminio .....	1
2.2	Acero automotriz.....	5
2.3	Soldadura por fricción-agitación por puntos (FSSW) .....	10
3	Metodología experimental, materiales y equipos .....	29
3.1	Metodología experimental.....	29
3.2	Materiales .....	31
3.3	Equipos para la caracterización .....	31
3.4	Caracterización de los metales base .....	33
3.5	Equipo para la fabricación de las herramientas y sistema de sujeción ...	37
3.6	Material, diseño y fabricación de las herramientas .....	39
3.7	Diseño y fabricación del sistema de sujeción.....	47
3.8	Equipo y preparación de las muestras de soldadura .....	49
3.9	Proceso de soldadura por fricción-agitación por puntos .....	49
3.10	Preparación metalográfica de las uniones soldadas .....	58
3.11	Microdureza .....	61

3.12	Ensayo de tensión uniaxial cortante.....	62
4	Análisis y discusión de resultados.....	63
4.1	Macroestructura de las uniones .....	63
4.2	Análisis microestructural .....	67
4.3	Microdureza .....	72
4.4	Fractura de las uniones ensayadas .....	76
4.5	Capacidades de carga .....	81
5	Conclusiones.....	83
6	Trabajo a futuro.....	85
7	Referencias.....	86
8	Anexos .....	i
8.1	Anexo A Análisis microestructural.....	i
8.2	Anexo B Resultados de microdureza .....	ix
8.3	Anexo C Resultados de ensayos a tensión uniaxial cortante.....	xxi

# Índice de figuras

---

Figura 2-1 Estructura cúbica centrada en las caras [8].	2
Figura 2-2 Uso del aluminio en automóviles [13].	5
Figura 2-3 Elementos estructurales clave de autos [16].	8
Figura 2-4 Porcentaje de elongación vs esfuerzo de cedencia de aceros automotrices [16].	8
Figura 2-5 Microestructura de los aceros DP.	9
Figura 2-6 Relación entre resistencia a la tensión y porcentaje de martensita a diferentes temperaturas [20].	9
Figura 2-7 Ruta temperatura-tiempo para la producción de acero DP laminado en frío [15].	10
Figura 2-8 Puntos de soldadura en Mazda RX-8 [22].	11
Figura 2-9 Tecnología de Mazda para soldadura FSSW [22].	11
Figura 2-10 Etapas de FSSW a) penetración, b) tiempo de permanencia, c) retracción de la herramienta [24].	12
Figura 2-11 Generación y transferencia de calor en proceso FSSW.	12
Figura 2-12 Zonas formadas por FSSW: a) zona de agitación, b) zona afectada termo-mecánicamente, c) zona afectada por el calor, d) metal base [27].	14
Figura 2-13 Evolución microestructural de las zonas formadas por FSSW [28].	14
Figura 2-14 Herramienta FSSW.	16
Figura 2-15 Ventajas de la soldadura FSSW [30].	17
Figura 2-16 Diagrama de fases para el sistema Al-Fe [43].	24
Figura 2-17 Micrografía de la junta soldada de aluminio.	25
Figura 2-18 Mediciones de espesor de capa de compuestos intermetálicos.	27
Figura 3-1 Diagrama de bloques experimental.	30
Figura 3-2 Espectroscopio de fluorescencia de rayos X.	31
Figura 3-3 a) Pulidora, b) microscopio óptico metalográfico (OM).	32
Figura 3-4 a) Microdurómetro, b) máquina universal de ensayos mecánicos.	32
Figura 3-5 Micrografía del AA6063-T6 a 100 x.	34
Figura 3-6 Micrografía del AA6063-T6 a 200 x.	34

Figura 3-7 Micrografía del AA6063-T6 a 500 x.....	35
Figura 3-8 Microestructura del DP780 a 100X. ....	35
Figura 3-9 Microestructura del DP780 a 200X. ....	36
Figura 3-10 Resultados del ensayo de tensión de AA6063-T6. ....	37
Figura 3-11 Resultados del ensayo de tensión de DP780. ....	37
Figura 3-12 a) Torno CNC, b) horno. ....	38
Figura 3-13 a) Durómetro, b) electroerosionadora de hilo.....	38
Figura 3-14 Rectificadora de planos paralelos. ....	39
Figura 3-15 a) Fresadora CNC, b) taladro radial.....	39
Figura 3-16 Barras de acero AISI/SAE-H13.....	40
Figura 3-17 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 200 x. .....	41
Figura 3-18 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 500 x. .....	41
Figura 3-19 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 1000 x. ....	41
Figura 3-20 Primer diseño de herramienta.....	42
Figura 3-21 Segundo diseño de herramienta. ....	43
Figura 3-22 Rutas de temperatura y tiempo de los tratamientos térmicos. ....	44
Figura 3-23 a) Herramientas durante tratamiento térmico, b) extracción de herramientas de la mufla. ....	44
Figura 3-24 a) Herramienta primer diseño tratada, b) herramientas segundo diseño tratadas. ....	45
Figura 3-25 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 tratado a 200 x. ....	45
Figura 3-26 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 tratado a 500 x. ....	46
Figura 3-27 Comparación entre a) el acero tratado y b) sin tratar a 1000 x. ....	46
Figura 3-28 a) Primer diseño de herramienta después de maquinado fino, b) Segundo diseño de herramienta después de maquinado fino. ....	47
Figura 3-29 Diseño de sistema de sujeción.....	47
Figura 3-30 Rectificado de placas. ....	48
Figura 3-31 Perforación de orificios.....	48
Figura 3-32 a) soldaduras fallidas, b) herramienta desgastada.....	50

Figura 3-33 Tercera etapa experimental. ....	57
Figura 3-34 Sistema de sujeción. ....	58
Figura 3-35 Secciones de corte a) sentido transversal, b) sentido longitudinal. ....	59
Figura 3-36 Encapsulado en frío de una muestra. ....	59
Figura 3-37 Proceso de pulido. ....	60
Figura 3-38 Ataque químico por inmersión. ....	60
Figura 3-39 Distribución de las indentaciones en sección transversal de la microdureza en los tres perfiles distintos alrededor de la huella de la herramienta” keyhole” .....	61
Figura 4-1 Macrografía en sentido transversal a 50 % de penetración. ....	64
Figura 4-2 Macrografía en sentido transversal a 60 % de penetración. ....	64
Figura 4-3 Macrografía en sentido transversal a 70 % de penetración. ....	64
Figura 4-4 Macrografía en sentido transversal a 80 % de penetración. ....	64
Figura 4-5 Macrografía en sentido transversal a 90 % de penetración. ....	64
Figura 4-6 Comparación entre penetración nominal y penetración medida en sentido transversal. ....	65
Figura 4-7 Macrografía en sentido longitudinal a 50 % de penetración.....	66
Figura 4-8 Macrografía en sentido longitudinal a 60 % de penetración.....	66
Figura 4-9 Macrografía en sentido longitudinal a 70 % de penetración.....	66
Figura 4-10 Macrografía en sentido longitudinal a 80 % de penetración.....	66
Figura 4-11 Macrografía en sentido longitudinal a 90 % de penetración.....	66
Figura 4-12 Comparación entre penetración nominal y penetración medida en sentido longitudinal.....	67
Figura 4-13 Zonas de soldadura. ....	69
Figura 4-14 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 50 % de penetración en sentido transversal.....	70
Figura 4-15 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 50 % de penetración en sentido longitudinal. ....	71
Figura 4-16 Perfiles de microdureza. ....	72
Figura 4-17 Resultados de microdureza en sentido transversal: a) 50 %, b) 60 %, c) 70 %, d) 80 %, e) 90 % de penetración. ....	73

Figura 4-18 Resultados de microdureza en sentido longitudinal: a) 50 %, b) 60 %, c) 70 %, d) 80 %, e) 90 %.....	75
Figura 4-19 Resultados de los ensayos de tensión uniaxial cortante.....	82
Figura 8-1 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 60 % de penetración en sentido transversal.....	i
Figura 8-2 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 70 % de penetración en sentido transversal.....	ii
Figura 8-3 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 80 % de penetración en sentido transversal.....	iii
Figura 8-4 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 90 % de penetración en sentido transversal.....	iv
Figura 8-5 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 60 % de penetración en sentido longitudinal.....	v
Figura 8-6 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 70 % de penetración en sentido longitudinal.....	vi
Figura 8-7 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 80 % de penetración en sentido longitudinal.....	vii
Figura 8-8 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 90 % de penetración en sentido longitudinal.....	viii

# Índice de tablas

---

Tabla 2-1 Identificación de aleaciones de aluminio [7].	3
Tabla 3-1 Composición química del AA6063-T6.	33
Tabla 3-2 Composición química del recubrimiento de Zn.	33
Tabla 3-3 Composición química del DP780.	33
Tabla 3-4 Parámetros de operación de maquinado.	43
Tabla 3-5 Parámetros de la primera etapa experimental. [4][51][55].	50
Tabla 3-6 Parámetros de la segunda etapa experimental.	51
Tabla 3-7 Resultados de los ensayos a tensión de la segunda etapa experimental.	52
Tabla 3-8 Parámetros de la tercera etapa experimental.	55
Tabla 3-9 Resultados de los ensayos a tensión del tercer diseño experimental.	55
Tabla 3-10 Parámetros de la cuarta etapa experimental.	58
Tabla 4-1 Fractura aparente de las uniones a 50 % de penetración.	76
Tabla 4-2 Fractura aparente de las uniones a 60 % de penetración.	77
Tabla 4-3 Fractura aparente de las uniones a 70 % de penetración.	78
Tabla 4-4 Fractura aparente de las uniones a 80 % de penetración.	79
Tabla 4-5 Fractura aparente de las uniones a 90 % de penetración.	80
Tabla 8-1 Resultados de microdureza al 50 % de penetración.	ix
Tabla 8-2 Resultados de microdureza al 60 % de penetración.	x
Tabla 8-3 Resultados de microdureza al 70 % de penetración.	xi
Tabla 8-4 Resultados de microdureza al 80 % de penetración.	xiii
Tabla 8-5 Resultados de microdureza al 90 % de penetración.	xiv
Tabla 8-6 Resultados de microdureza al 50 % de penetración.	xvi
Tabla 8-7 Resultados de microdureza al 60 % de penetración.	xvii
Tabla 8-8 Resultados de microdureza al 70 % de penetración.	xviii
Tabla 8-9 Resultados de microdureza al 80 % de penetración.	xix
Tabla 8-10 Resultados de microdureza al 90 % de penetración.	xx
Tabla 8-11 Resultados de capacidad de carga	xxi

# Resumen

---

Con los problemas ambientales al alza se está buscando la manera de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, un sector que contribuye en esta contaminación ambiental son los medios de transporte. Las estrictas políticas gubernamentales exigen una solución al problema y plantean que al disminuir los pesos de las estructuras de automóviles y demás medios de transporte el combustible tendrá un mayor rendimiento y por lo tanto habrá una disminución en las emisiones. Para lograr este objetivo se ha planteado el reemplazo de elementos estructurales de aceros convencionales por láminas de aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel - AHSS) y láminas de aleaciones ligeras como aluminio, magnesio y titanio. Sin embargo, la soldadura entre aceros y aleaciones no ferrosas impone un reto por la diferencia entre sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, entre otras. Una tendencia para lograr la soldadura entre materiales disímiles es la soldadura por fricción – agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding - FSSW), un tipo de soldadura en estado sólido.

En el presente trabajo **“Estudio de la microestructura-propiedad en la soldadura por fricción de aluminio-acero”** se parametrizó el proceso de soldadura FSSW para un AA6063-T6 y un acero doble fase denominado DP780, donde además se diseñó y fabricó la herramienta que se utilizó en la soldadura.

Se realizaron soldaduras por FSSW a diferentes porcentajes de penetración del hombro de la herramienta respecto al espesor de la lámina de aluminio (50, 60, 70, 80 y 90 %) manteniendo los otros parámetros del proceso constantes (frecuencia rotacional, tiempo de permanencia y velocidad de penetración), se realizó un análisis de la macroestructura y microestructura de las uniones, así como la evaluación de las propiedades mecánicas de microdureza y capacidades de carga.

Se identificaron las zonas presentes en este tipo de soldaduras para cada una de las muestras analizadas mostrando consistencia entre la microestructura independientemente de la penetración variándose únicamente la extensión de las

zonas, los resultados de las mediciones de microdureza indican que el material sufrió reblandecimiento respecto al metal base y con los resultados de capacidades de carga se determinó que las soldaduras con mayor resistencia fueron las realizadas al 70 % de penetración.

**Palabras clave:** soldadura por fricción - agitación por puntos, disimilar, propiedades mecánicas.

# Abstract

---

With the increase of the environmental problems, a way to reduce the emissions of greenhouse gases is investigated, a sector that contributes to this contamination is the transport means. The strict governmental politics demand a solution for the problem and poses that if structure of automotive weights and the other transport means are reduced, the fuels will have a better performance and so will be a diminish of emissions. To reach this target has been proposed the replacement of structural elements of conventional steels for sheets of Advanced High Strength Steel (AHSS) and sheets of light alloys like aluminum, magnesium and titanium. However, the welding between steels and no ferrous alloys imposes a challenge because of the difference in their physical, chemical, and mechanical properties. A trend to achieve the Welding between dissimilar materials is the Friction Stir Spot Welding (FSSW), a type of welding in solid - state.

In the present investigation “**Study of microstructure - property in the friction welding of aluminum-steel**” the process of FSSW welding between AA6063-T6 and DP780 steel has been parametrized, also the tool for the welding was designed and manufactured.

Welding by FSSW was realized at different percentages of shoulders tool penetration (50, 60, 70, 80, 90%) keeping the other process parameters constant (rotational frequency, dwell time, plunge rate). Analyses of the macro and microstructure, as well as the evaluation of the mechanical properties of microhardness and loading capacity were made.

The zones proper of this kind of Welding for each one of the specimens analyzed were identified showing consistency between the microstructure independently of the penetrations varying only the extension of the zones, the results of the microhardness measurements indicate that the material suffered softening during the process with respect to the base metal and with the results of the loading capacity it was determined that the weldings with the highest resistance were the realized at 70% of penetration.

**Keywords:** Friction Stir Spot Welding, dissimilar, mechanical properties.

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes

Debido a la problemática ambiental se han propuesto políticas cada vez más estrictas que permitan regular las emisiones de gases de efecto invernadero. Una de las propuestas se refiere a la disminución de los pesos de las estructuras de aviones, naves espaciales, automóviles y barcos con el fin de incrementar la eficiencia de combustible y aminorar los efectos dañinos de los gases de efecto invernadero [1].

Con el fin de aligerar las estructuras de los medios de transporte ya mencionados se ha considerado el uso de materiales que permitan esta disminución sin comprometer la seguridad de los pasajeros, es decir, manteniendo las propiedades mecánicas de los materiales.

Las dos grandes vertientes de materiales sugeridos para lograr estos objetivos son reemplazar las estructuras de aceros comunes como aceros de bajo contenido de carbono por aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel- AHSS) que a causa de sus procesos de fabricación se pueden producir láminas de espesores delgados y la implementación de materiales ligeros como las aleaciones de aluminio, magnesio y titanio [2]. Dentro de los materiales ligeros, los más factibles a utilizar son las aleaciones de aluminio que muestran buenas propiedades mecánicas y tienen un costo accesible, así mismo es un material con una alta reciclabilidad.

La unión disímil entre aluminio y acero ha sido de principal interés en la industria automotriz y es considerada la alternativa más eficaz para conseguir la disminución de pesos que se exige, el desarrollo de técnicas que permitan la unión entre estos dos materiales cobró importancia, la soldadura por resistencia por puntos (Resistance Spot Welding - RSW) es el proceso de unión más usado en la

## C1: Introducción

producción de autos por su rapidez y versatilidad [3], pero cuando se trata de soldar aluminio con acero no resulta ser la mejor opción ya que al ser un método de fusión se forma una capa de compuestos intermetálicos en la interfase que disminuye la resistencia a la tensión de las uniones [4].

Para resolver este problema, Mazda desarrolló el proceso de soldadura de fricción-agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding – FSSW) que es un tipo de soldadura que se lleva a cabo en estado sólido disminuyendo así las temperaturas del proceso con lo que se evita la formación de compuestos intermetálicos frágiles y además disminuye la contracción y distorsión de las láminas [4][5], pero este par de materiales sigue siendo un reto por las diferencias evidentes entre el acero y el aluminio como en su punto de fusión y conductividad térmica. Este proceso de soldadura es prometedor en la manufactura automotriz ya que también permite la soldadura disímil de aceros con otros materiales como acero con magnesio, titanio, polímeros y cobre.

La soldadura FSSW consiste en la penetración de una herramienta giratoria no consumible que es forzada en las láminas a unir, al forzarla con cierta presión se genera fricción y a su vez calor con lo que se logra la unión de las piezas.

### 1.2 Problemática

Aunque exista información reportada sobre investigaciones de la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras disímiles por FSSW entre aluminio y acero esta es muy escasa, cada parámetro del proceso (frecuencia rotacional, velocidad de penetración, penetración y tiempo de permanencia) juega un papel importante en el desempeño de las uniones, aún se requiere de más investigación de esta combinación disimilar para lograr una optimización y encontrar los parámetros que producen mejores soldaduras, al igual que otros factores que juegan un papel importante en las soldaduras como la geometría de la herramienta y el sistema de sujeción.

Además de la disminución de pesos en los autos por la aplicación de aceros AHSS y aleaciones de aluminio la soldadura FSSW se considera un proceso

## C1: Introducción

“verde” ya que requiere de un menor gasto energético respecto a otros procesos como RSW, la herramienta con la que se realiza sufre un desgaste mínimo por lo que se pueden realizar varios puntos de soldadura y prácticamente es no consumible.

Si bien hay artículos de FSSW de aluminio con aceros AHSS, la realidad es que investigaciones entre aluminio con aceros doble fase que son los más utilizados actualmente en la industria automotriz es aún insuficiente lo que disminuye su posibilidad de aplicación, es necesario un mayor conocimiento del comportamiento de estas soldaduras.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar la microestructura y propiedades mecánicas en uniones disímiles de AA6063-T6 con DP780 obtenidas por Friction Stir Spot Welding (FSSW).

#### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar, fabricar, preparar y analizar la herramienta para el proceso de soldadura FSSW.
2. Diseñar y fabricar un sistema de sujeción para soldadura por FSSW.
3. Parametrizar el proceso de unión disímil AA6063-T6 - DP780.
4. Analizar la microestructura de las distintas regiones en la soldadura por microscopía óptica.
5. Evaluar las propiedades mecánicas de la unión disímil AA6063-T6 - DP780 mediante ensayos de microdureza y ensayos de tensión uniaxial cortante.

### 1.4 Hipótesis

Es posible la unión disímil a traslape de aluminio AA6063-T6 con acero DP780 mediante el proceso de soldadura por FSSW con una herramienta fabricada a

## C1: Introducción

partir de AISI/SAE-H13 y la penetración influirá directamente proporcional en la capacidad de carga de las uniones.

### 1.5 Justificación

Derivado de los problemas ambientales se busca en el sector automotriz aligerar los pesos de las estructuras automovilísticas con el fin de aumentar la eficiencia de los combustibles, una alternativa es la implementación de aluminios por su bajo peso y sus buenas propiedades mecánicas, sin embargo, se requiere más investigación para su unión disímil con aceros avanzados de alta resistencia por métodos de soldadura no convencionales como lo es la FSSW.

### 1.6 Impacto

El impacto del presente proyecto de investigación recae directamente sobre el sector automotriz.

Actualmente la industria automotriz en su totalidad utiliza AHSS en la fabricación de las carrocerías de los autos, estos materiales tienen la capacidad de absorber altas energías de impacto en caso de accidentes lo cual brinda una mayor protección a los pasajeros aunado a sus bajos espesores, esto derivado de la necesidad de un menor impacto ecológico por los altos niveles de polución en el ambiente y emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo existe la necesidad de aligerar aún más los pesos de estas estructuras con el fin de aumentar los rendimientos de los combustibles y atender a las políticas ambientales gubernamentales, una posible solución es la ampliación del uso de aluminio en partes estratégicas de los autos, no obstante aún no tiene auge debido a que los procesos de soldadura convencionales dificultan la unión disímil de los materiales ya mencionados, es por eso que se busca más información de la soldadura disímil de aceros con aluminios mediante procesos de soldadura que no impliquen la fusión de los mismos y evitar defectos en las soldaduras.

## 2 Revisión de la literatura

La industria automotriz representa un reto para la ciencia e ingeniería de los materiales. Cada día es más común escuchar en los medios de comunicación la problemática ambiental que terminaría por destruir todo lo que conocemos, científicos de todo el mundo se dedican actualmente a la investigación, mejora y creación de nuevos materiales que permitan una reducción en los pesos de las estructuras de los automóviles, lo cual se traduce a una mayor eficiencia de las gasolinas, de modo que haya una menor emisión de gases de efecto invernadero. A la par de los automóviles de combustión se encuentra en apogeo la producción de automóviles híbridos y eléctricos, que también se verían beneficiados con la reducción en peso de los vehículos, es por eso que comienzan a investigarse y a implementarse materiales nuevos como lo son las aleaciones de aluminio, titanio, magnesio y algunos plásticos, sin dejar de lado las características mecánicas requeridas y bajos costos de producción.

### 2.1 Aluminio

Uno de los materiales que se ha introducido en la industria automotriz para competir con el acero es el aluminio.

El aluminio es el segundo elemento metálico con mayor abundancia en la tierra, debido a que en la naturaleza se encuentra en combinación con otros elementos fue identificado por primera vez en el siglo XIX por Sir Humphrey, pero su aplicación se incrementó hacia 1880 cuando se patentó el proceso Hall-Heroult para la obtención de aluminio metálico por reducción de alúmina  $Al_2O_3$  que se encuentra en los minerales bauxita y criolita, este proceso es el que se sigue usando actualmente [6].

### 2.1.1 Aluminio y sus propiedades

El aluminio es un metal blanco plateado no ferroso con número atómico 13, masa atómica de 26.98 g/mol, su punto de fusión es de 660.20 °C y su densidad es de aproximadamente 2.70 g/cm<sup>3</sup>, comparándose con un acero convencional cuya densidad es de 7.85 g/cm<sup>3</sup> se observa que equivale al 34 % del peso del acero, tiene una alta conductividad térmica y eléctrica y es fácil de reciclar, cerca del 30 % de la producción estadounidense es de material reciclado [7]. Es un metal altamente reactivo, se forma constantemente una capa de óxido la cual lo hace resistente a la corrosión.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, al igual que otros metales no ferrosos el aluminio no posee características óptimas para aplicaciones ingenieriles, de hecho, no muestra un límite elástico, punto de cedencia o límite de proporcionalidad bien definidos, sin embargo, al alearse con otros elementos como zinc, cobre, manganeso, magnesio, silicio, entre otros; sus características se ven enriquecidas, además de tener una alta relación resistencia-peso [7].

Tiene una microdureza en escala Vickers de 15, un módulo de elasticidad de 69 GPa y un módulo de Poisson de 0.36, esfuerzo último a la tensión (Ultimate Tensile Strength - UTS) de 45 MPa y un porcentaje de deformación cerca del 50 % [6].

Por último, el aluminio cristaliza en una estructura cúbica centrada en las caras (Face Cube Centered - FCC) como se representa en la Figura 2-1, este tipo de estructura cuenta con 12 sistemas de deslizamiento, lo cual quiere decir que tiene una alta capacidad de deformación a diferencia de metales con estructura hexagonal compacta (Hexagonal Close Packed – HCP) como el magnesio que solo cuenta con 3 planos de deslizamiento por lo que tienden a ser frágiles.

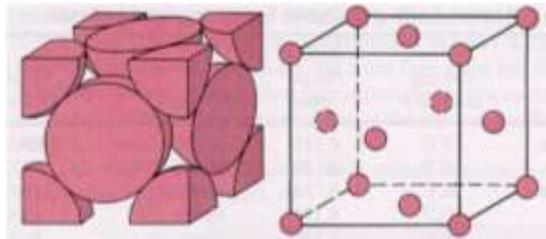


Figura 2-1 Estructura cúbica centrada en las caras [8].

### 2.1.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio metálico es un material con características pobres, cuyo uso en la ingeniería se vería limitado, no obstante, al alearse con otros materiales y gracias a los tratamientos térmicos es posible su uso en distintas aplicaciones de la ingeniería.

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grandes grupos: para vaciado y para forja las cuales equivalen al 85 % del total de las aleaciones de aluminio [9][10]. Las aleaciones para vaciado se identifican por la denominación BS 1490 LM y las aleaciones para forja tienen un sistema de identificación internacional de 4 dígitos, el primer dígito indica el elemento principal de la aleación como se explica en la Tabla 2-1, también se indican algunos de sus usos.

La implementación de las aleaciones de aluminio ha incrementado gracias a su alta relación resistencia-peso, facilidad de fabricación, alto grado de trabajabilidad, ductilidad, excelente conductividad térmica, alta resistencia a la corrosión, buen acabado y su 100 % de reciclabilidad. Esto le ha abierto las puertas para su aplicación en ingeniería de minas, en la industria alimenticia, en la agronomía, ingeniería marina, en aplicaciones militares, en la joyería, en la industria aeroespacial, en la industria de transportes terrestres y en la ingeniería estructural [6], de hecho, se estima que un 25 % de la producción global de aluminio se destina a fabricar estructuras [9].

1XXX	Aluminio con un mínimo de pureza del 99 %	Plantas químicas, intercambiadores de calor, conductores eléctricos
2XXX	Cobre	Elementos estructurales de aviones, piezas de alta precisión
3XXX	Manganeso	Tuberías de presión, utensilios de cocina
4XXX	Silicio	Elementos que sufran alta tasa de desgaste
5XXX	Magnesio	Entorno marino, carrocería con bajo estrés

## C2: Revisión de la literatura

6XXX	Magnesio + Silicio	Estructuras soldadas, arquitectura
7XXX	Zinc	Sector aeronáutico y medios de transporte
8XXX	Otros elementos	

### 2.1.3 Aleaciones de aluminio en la industria automotriz

Aunque pareciera que la aplicación del aluminio en la industria automotriz se ha dado en años recientes, su uso en este sector comenzó hace por lo menos 100 años, inicialmente los autos construidos en los años 70's incluían en sus estructuras un aproximado de 35 kg de aluminio, lo cual ha ido en aumento hasta alcanzar un total de 200 kg según datos del 2017 [11].

Las primeras aplicaciones del aluminio en los autos fueron en la fabricación del tren motriz pero actualmente se utiliza en otras partes de las estructuras.

Cabe mencionar que el uso del aluminio en la industria automotriz se da tanto para aleaciones de vaciado como con aleaciones de forja.

Una de las aplicaciones de las aleaciones de vaciado es en la fabricación de los motores, piezas de soporte del motor, bombas, partes del sistema de audio, partes del cinturón de seguridad [6].

Las aleaciones que se emplean con más frecuencia en el sector automotriz son las de las series 6XXX y 5XXX, aunque según los registros recientes cada vez se inclina más hacia la serie 6XXX, ya que con estas aleaciones se logra alcanzar resistencias más altas, son más versátiles, tratables térmicamente, conformables y soldables; de acuerdo a los números, las aleaciones 6XXX representan por lo menos el 80 % del aluminio usado en automóviles [7][9].

La mayoría de los proveedores de aluminio producen la aleación 6016-A que se utiliza principalmente en Europa para paneles externos de vehículos, en algunos modelos desarrollados por Ferrari, Jaguar y Land Rover, en la Figura 2-2 se muestran algunas partes del auto que están hechas con láminas de aluminio [12].

## C2: Revisión de la literatura

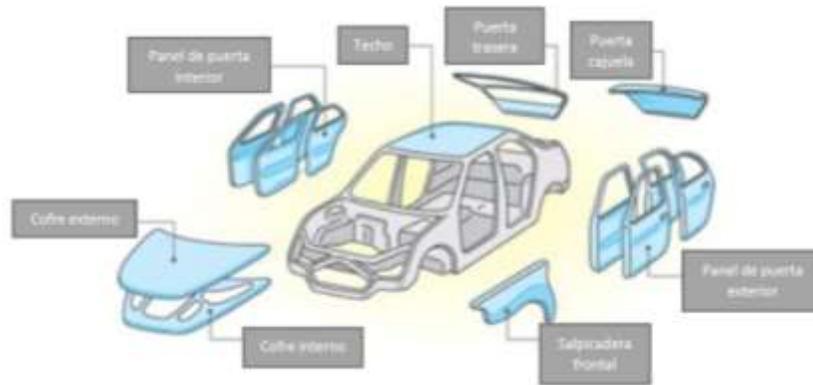


Figura 2-2 Uso del aluminio en automóviles [13].

### 2.1.4 AA6063

La aleación AA6063 está en la serie 6000, es decir, sus principales aleantes son el silicio y el magnesio. Es la aleación más usada para la extrusión, está compuesta por: 97.5 % de aluminio, 0.45-0.90 % de magnesio, 0.20-0.60 % de silicio y contiene otros elementos como cromo, cobre, hierro, manganeso, titanio y zinc. Es una aleación tratable térmicamente, soldable y tiene una buena resistencia a la corrosión, su UTS es de 241 MPa y un módulo de elasticidad de 68.90 GPa, sus principales usos son en extrusiones arquitectónicas, muebles, tuberías y recientemente se ha investigado su aplicación en estructuras automotrices [6].

Como se mencionó hay poca bibliografía reportada sobre su uso en aplicaciones automotrices por lo que el presente proyecto buscará hacer una aportación en este rubro.

### 2.2 Acero automotriz

El material metálico más importante es el sistema binario hierro-carbono más conocido como acero.

Los aceros se han modificado de acuerdo a las necesidades de la humanidad, con la adición de elementos aleantes y rutas de tratamientos térmicos adquieren propiedades que le hacen apto para una aplicación específica.

## C2: Revisión de la literatura

Es complicado establecer sus propiedades físicas, químicas y mecánicas ya que estas dependen del tipo de acero, pero su densidad promedio es de  $7.85 \text{ g/cm}^3$  y su punto de fusión es cerca de  $1375 \text{ °C}$  [8].

### 2.2.1 Historia del acero automotriz

Si bien el primer auto se fabricó en 1885 a partir de estructuras de madera, la historia del acero automotriz data del inicio del siglo XX, cuando surgieron mejores procesos de manufactura para desarrollar láminas y convertirlas en formas complejas para así remplazar a la madera [14].

Los primeros aceros que se emplearon en la industria automotriz son los aceros de bajo contenido de carbono que muestran buena resistencia, formabilidad, bajo costo y facilidad de diseño, más tarde, a partir de los años 70's surgieron nuevos estándares que requerían disminuir los pesos de las estructuras e incrementar la economía de los combustibles por lo que se desarrollaron nuevos aceros hasta el surgimiento de los aceros de alta resistencia (High Strength Steel - HSS), con los cuales se pretendía que mejorara la seguridad de los pasajeros y la eficiencia del combustible; no obstante la implementación de estos aceros no resultó exitosa ya que las empresas no estaban preparadas para su producción, generando aceros con propiedades mecánicas irregulares aunado a una menor ductilidad respecto a los aceros de bajo contenido de carbono [14], aunque esto dio pie a que emergieran materiales con mayor posibilidad de comercialización.

Así pues, en las últimas décadas se desarrollaron los aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel - AHSS) para su aplicación en la industria automotriz.

Los AHSS poseen resistencias mínimas de 500 MPa y tienen una alta ductilidad en comparación con aceros convencionales, una alta capacidad de deformación lo cual se traduce en facilidad de deformación.

### 2.2.2 Tipos de acero automotriz

Actualmente se usan 3 diferentes tipos de acero en la industria automotriz, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su microestructura, a continuación, se enlistan las categorías [14]:

1. *Aceros de bajo contenido de carbono y aceros de alta resistencia (HSS)*

Aceros de bajo contenido de carbono (LC)

Acero endurecido por solución sólida (SSS)

Acero de baja aleación de alta resistencia (HSLA)

2. *Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) de primera generación*

Acero de doble fase (DP)

Acero de fase compleja (CP)

Acero martensítico (MS)

Acero de plasticidad inducida por transformación (TRIP)

3. *Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) de segunda generación*

Acero de plasticidad inducida por maclaje (TWIP)

Aceros ligeros con plasticidad inducida (L-IP)

Si bien existen diferentes tipos de acero automotriz, la tendencia de los AHSS está al alza, se colocan en partes específicas de la estructura del auto como los pilares A, B y C que son los encargados de la seguridad de los pasajeros, así como rieles del techo, proa, miembros frontales, transversales y laterales, refuerzo de parachoques, entre otros [15]; en la Figura 2-3 se identifican estas partes mencionadas.

## C2: Revisión de la literatura

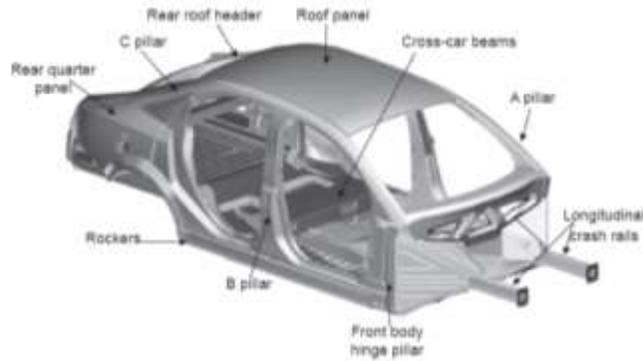


Figura 2-3 Elementos estructurales clave de autos [16].

En la Figura 2-4 se muestra un diagrama de porcentaje de elongación vs punto de cedencia de los tipos de acero automotriz, donde se observa que exhiben puntos de cedencia de hasta 1600 MPa, en comparación con aceros de bajo contenido de carbono que su punto de cedencia es de 400 MPa la diferencia es prominente.

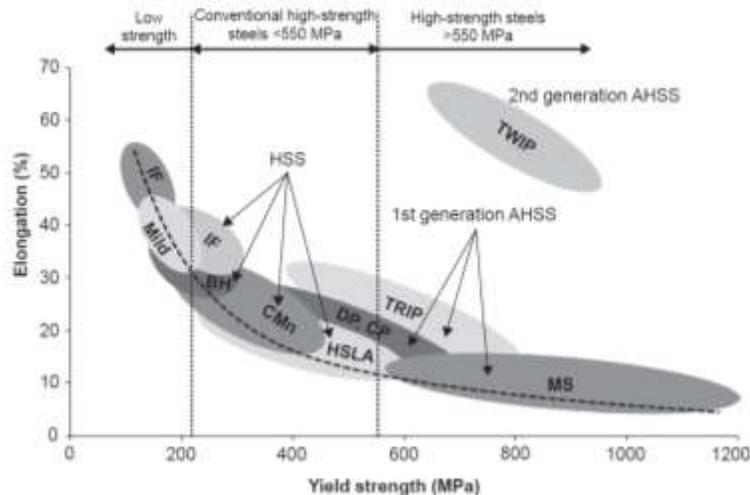


Figura 2-4 Porcentaje de elongación vs esfuerzo de cedencia de aceros automotrices [16].

### 2.2.3 Aceros de doble fase (DP)

Como se mencionó antes, uno de los AHSS de la primera generación es el acero doble fase (Double Phase - DP), de todos los AHSS el DP es el más comúnmente utilizado para aplicación automotriz [17].

## C2: Revisión de la literatura

Los aceros DP poseen una estructura *ferrítica-martensítica*, la matriz ferrítica (del 10 al 70 % en volumen [18]) le brinda una alta elongación mientras que la martensita en forma de islas aporta la dureza y resistencia requerida, en la Figura 2-5 se muestra una imagen de la microestructura de los aceros DP [19].

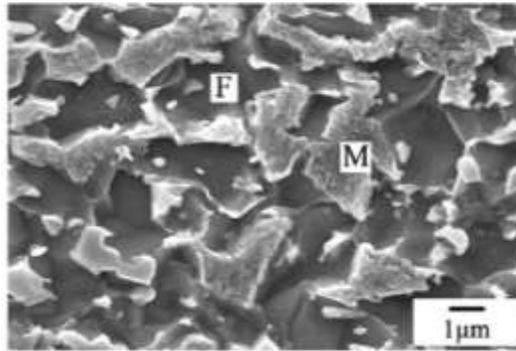


Figura 2-5 Microestructura de los aceros DP.

Actualmente existen aceros DP con resistencias que van desde 500 a 1180 MPa, mientras más alta sea la resistencia existe mayor volumen de martensita en el acero [15], como se observa en la Figura 2-6.

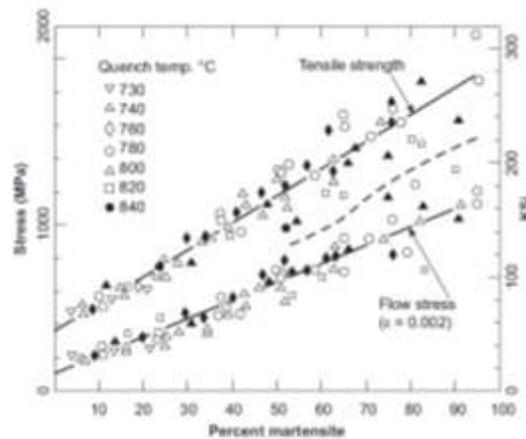


Figura 2-6 Relación entre resistencia a la tensión y porcentaje de martensita a diferentes temperaturas [20].

Para la producción de cualquier AHSS se requiere seguir una “ruta metalúrgica” que combina la optimización de la composición de los elementos de aleación con

## C2: Revisión de la literatura

rutas de tratamientos térmicos para obtener aceros con las propiedades precisadas.

En el caso de los aceros DP se manufactura DP laminado en caliente y en frío; el laminado en caliente es más utilizado para las partes estructurales y llantas de los carros [15], los laminados en caliente se producen por enfriamiento controlado desde la fase austenítica y para el caso del laminado en frío desde una zona ferrítica + austenítica para transformar austenita en ferrita, enseguida se efectúa un enfriamiento rápido para transformar la austenita remanente en martensita [21], como se explica en la Figura 2-7.

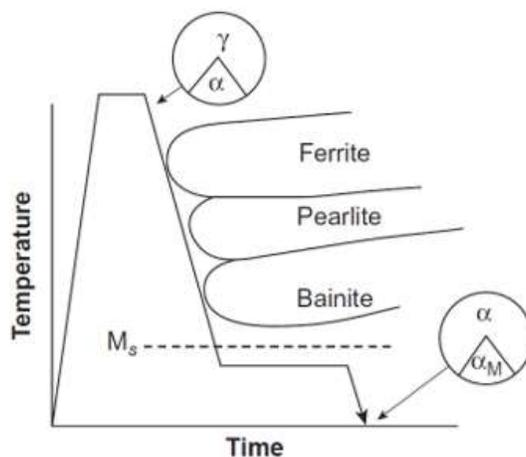


Figura 2-7 Ruta temperatura-tiempo para la producción de acero DP laminado en frío [15].

Numerosos estudios del comportamiento de absorción de energía de aceros DP muestran la capacidad de este tipo de aceros para absorber energía durante choques automovilísticos, también se ha encontrado que el potencial de absorción de energía está relacionado con la resistencia a la tensión [14].

Los principales elementos de aleación para los aceros DP son: carbono, manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel.

### 2.3 Soldadura por fricción-agitación por puntos (FSSW)

La soldadura por fricción-agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding - FSSW) es una variante del proceso de soldadura por fricción agitación (Friction Stir Welding - FSW), fue desarrollada por Mazda en el 2003, específicamente para la

## C2: Revisión de la literatura

soldadura del panel de la puerta trasera del Mazda RX-8 [5] (ver Figura 2-8 y Figura 2-9) entre aluminio y acero. En la actualidad es un proceso especial para la unión de láminas metálicas y de polímeros.



Figura 2-8 Puntos de soldadura en Mazda RX-8 [22].



Figura 2-9 Tecnología de Mazda para soldadura FSSW [22].

La diferencia entre FSW y FSSW radica en que para la soldadura FSW la herramienta además de un movimiento giratorio se traslada transversalmente entre las láminas a soldar formando “un cordón” por otro lado en FSSW es un movimiento meramente rotacional por lo que la unión se realiza en un solo punto.

La soldadura por FSSW se describe en las siguientes etapas: a) la herramienta penetra las placas hasta una profundidad específica, b) la herramienta tiene un tiempo de permanencia con el que aumenta la generación de calor y agitación, c) es retractada la herramienta, como se observa en la Figura 2-10. Actualmente su aplicación va más allá del sector automotriz, también es empleado con amplitud en la aeronáutica [23].

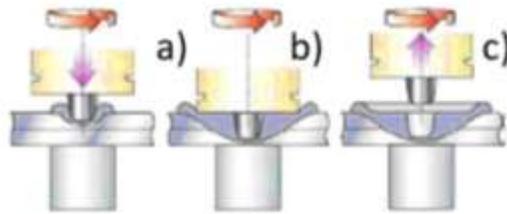


Figura 2-10 Etapas de FSSW a) penetración, b) tiempo de permanencia, c) retracción de la herramienta [24].

En la Figura 2-11 se muestra una representación de cómo se da la generación de calor en el proceso FSSW, así como la transferencia de calor, como se observa en la figura la generación de calor se da por dos formas: por la fricción entre la herramienta y las láminas ( $Q_s$ ) y por la deformación generada ( $Q_v$ ), por lo que el calor total generado durante el proceso se define por la Ecuación 2-1 [25].

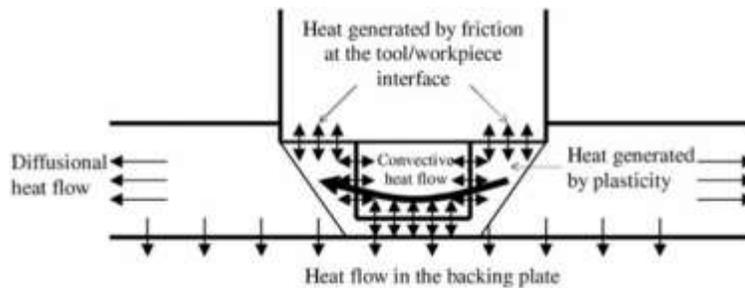


Figura 2-11 Generación y transferencia de calor en proceso FSSW.

$$Q_{total} = Q_s + Q_v \quad \text{Ecuación 2- 1}$$

### 2.3.1 Zonas formadas en uniones soldadas por FSSW

A diferencia de las uniones soldadas por procesos de fusión, las soldaduras por FSW y FSSW muestran 4 zonas distintas con claras diferencias en su microestructura por los diferentes aportes térmicos y de deformación, se encuentran adyacentes desde la huella formado por la herramienta hasta el metal que no fue afectado por la herramienta: zona de agitación, zona afectada termo-

## C2: Revisión de la literatura

mecánicamente, zona afectada por el calor y metal base, estas zonas son simétricas respecto al centro de la herramienta.

### *Zona de Agitación (ZA):*

Es la zona donde el pin ejerce directamente la presión, en cuanto a cambios microestructurales el material en esta zona sufre recristalización, se caracteriza por la presencia de granos equiaxiales finos [26].

### *Zona Afectada Termo-Mecánicamente (ZATM):*

Es una zona que presenta afectación por las altas temperaturas generadas por la fricción y además se encuentra plásticamente deformada por la herramienta, esta zona sufre de recristalización, recuperación, crecimiento de grano y nucleación de precipitados [26] .

### *Zona Afectada por el Calor (ZAC):*

Esta zona presenta modificaciones en la microestructura del material, sin embargo no está deformada, se caracteriza por presentar recuperación estática, crecimiento de granos, nucleación de precipitados, crecimiento y disolución [25].

### *Metal Base (MB):*

Es la zona que no ha sido deformada ni sufrió la afectación térmica necesaria para mostrar cambios en su microestructura, es la zona más alejada de la zona de agitación.

En la Figura 2-12 se muestra una representación de las distintas zonas formadas por FSSW y en la Figura 2-13 se muestra la evolución de la microestructura en las zonas.

## C2: Revisión de la literatura



Figura 2-12 Zonas formadas por FSSW: a) zona de agitación, b) zona afectada termo-mecánicamente, c) zona afectada por el calor, d) metal base [27].

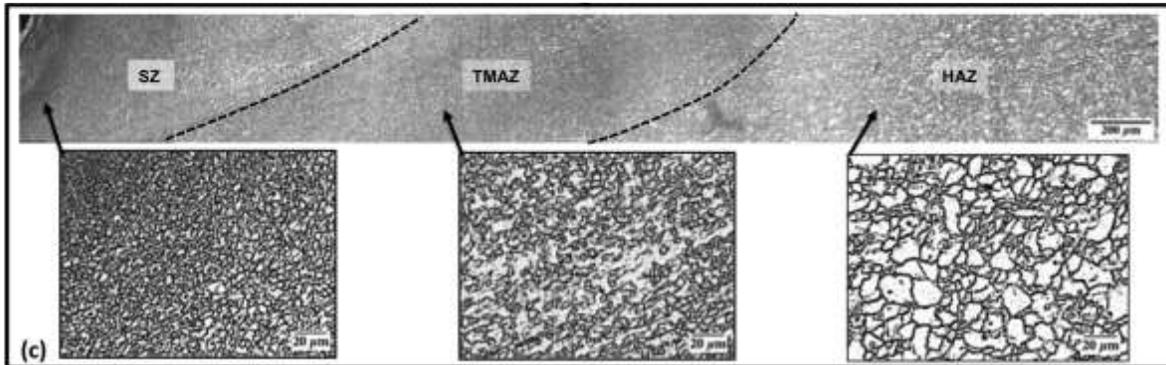


Figura 2-13 Evolución microestructural de las zonas formadas por FSSW [28].

### 2.3.2 Parámetros del proceso FSSW

Los parámetros de operación más importantes para soldadura FSSW son: frecuencia rotacional (rpm), velocidad de penetración (mm/min), tiempo de permanencia (s) y penetración (%), a continuación, se dará una breve explicación de cada parámetro.

#### *Frecuencia rotacional ( $F_r$ ):*

Es la velocidad a la que gira la herramienta, es el parámetro que más influye en la generación de calor ya que la mayor parte de la energía generada en el proceso es debida al torque de la herramienta, también controla la agitación y mezclado del material bajo la herramienta. A mayores rpm se generan mayores temperaturas y se produce un mezclado más intenso [25].

## C2: Revisión de la literatura

### *Velocidad de penetración ( $V_p$ ):*

La velocidad de penetración es un parámetro que no se ha investigado con amplitud, pero tiene una importancia crítica ya que las condiciones termo-mecánicas del material sufren un cambio drástico durante el proceso, la velocidad de penetración determina la velocidad en la que el material es calentado y deformado. A mayores velocidades de penetración el tiempo de soldadura disminuye lo cual significa un aumento en la productividad [25].

### *Penetración:*

Es un parámetro importante ya que la macroestructura depende significativamente de la penetración del hombro, incrementando la penetración del hombro la zona de agitación se expande y el material deformado de la lámina superior tiende a salir de la zona de la herramienta lo que en algunos casos puede resultar contraproducente debido al adelgazamiento de la lámina, pero la penetración del hombro debe ser la suficiente para lograr un buen contacto interfacial, comúnmente se elige una penetración aproximada de 0.2 mm al tener espesores de lámina menores o iguales a 1 mm, sin embargo, la penetración aumenta al tener mayores espesores de lámina; este parámetro se determina por el espesor de las láminas y por la longitud del pin [25], se mide en porcentaje respecto al espesor de la lámina.

### *Tiempo de permanencia ( $T_p$ ):*

En algunos casos al llegar la herramienta a la penetración establecida esta es retraída, pero al existir un tiempo de permanencia se garantiza una mayor generación de calor aportado por la fricción entre el hombro y la superficie; el tiempo de permanencia produce la energía necesaria para la formación de la zona de agitación y para la unión entre las láminas a soldar [29].

Estudios anteriores del proceso FSSW realizados por Shen et al. [25], indican que las dos variables del proceso con mayor influencia son la frecuencia rotacional y el

tiempo de permanencia ya que determinan las propiedades mecánicas de los puntos de soldadura influyendo en la generación de calor y el flujo de material.

### 2.3.3 Herramienta

A demás de los parámetros de operación mencionados, un factor que influye en la unión soldada por FSSW es la herramienta, la herramienta tiene tres funciones principales: calentar las láminas, hacer fluir el material para producir la unión y retener el material semisólido debajo de la herramienta.

La herramienta está formada por dos partes concéntricas: el hombro y el pin (ver Figura 2-14), esta herramienta debe estar fabricada de un material que cubra las siguientes características: resistencia a la temperatura del proceso, mayor resistencia que los materiales a soldar, resistencia a la fatiga a la temperatura del proceso, tenacidad a la fractura, resistencia al desgaste, estabilidad térmica, estabilidad química; además de estas características inherentes a los materiales debe ser un material accesible [30]. Dentro de los materiales más usados para la fabricación de herramientas están aceros para herramientas, aceros de alta velocidad, super aleaciones, materiales refractarios, cerámicos y materiales super abrasivos. Como se infiere del párrafo anterior, el material de la herramienta se elige en base a los materiales de las láminas a soldar.



Figura 2-14 Herramienta FSSW.

Hay una gran variedad en el diseño de la geometría de la herramienta, en cuanto al hombro se diseñan generalmente con una geometría cilíndrica, aunque también existen cónicos, la superficie que está en contacto con la lámina superior suele ser

## C2: Revisión de la literatura

plana, cóncava o convexa. En cuanto a los pines, se fabrican en varias geometrías: cilíndricos, cónicos, triangulares, cuadrados, hexagonales, entre otros; sus acabados pueden ser lisos o enroscados, estos últimos fueron diseñados con la intención de mejorar el flujo de material e incrementar la generación de calor por el aumento de área interfacial. Sin embargo su maquinado resulta más complejo y para la soldadura de algunos materiales como el acero puede causar desgaste severo generando soldaduras con baja resistencia [25].

### 2.3.4 Ventajas de la soldadura FSSW

Con el desarrollo de la soldadura FSW y FSSW se ha logrado soldar materiales que antes resultaban complicados de soldar como las aleaciones de aluminio y magnesio lo cual ha contribuido al incremento de la aplicabilidad de estos materiales, así como la posibilidad de realizar soldaduras disímiles entre materiales con propiedades físicas diferentes que antes no eran soldables. No obstante, estos procesos presentan por añadidura varias ventajas frente a otros tipos de soldadura, dado que es un proceso en estado sólido la distorsión y la contracción de las láminas es baja, se puede operar en todas las posiciones [31]. Otras ventajas se presentan en la Figura 2-15.



Figura 2-15 Ventajas de la soldadura FSSW [30].

### 2.3.5 Soldadura de metales similares

La soldadura de aleaciones similares puede ser obtenida por distintos procesos, tales como soldadura por arco, soldadura por arco de metal y gas (Gas Metal Arc Welding - GMAW), soldadura con electrodo revestido (Shield Metal Arc Welding - SMAW, FSW, entre otros; no representa una mayor dificultad ya que se evitan problemas como diferencias en propiedades de los materiales [32].

La soldadura de aluminio, cobre, magnesio y titanio por procesos de fusión es compleja; la baja soldabilidad del aluminio, se debe en gran parte a su alta reactividad y formación de óxidos [33]; la dificultad de soldar cobre reside en su alta difusividad térmica que es de 10-100 veces mayor que para el acero y aleaciones de níquel y por lo tanto se requiere un mayor aporte térmico [30]; el magnesio presenta también dificultades para soldar por su porosidad, su alto coeficiente de expansión térmica además de también ser un elemento reactivo y que puede llegar a incendiarse durante su soldadura por fusión [34]. Las aleaciones de titanio aunque pueden soldarse por procesos de fusión como soldadura por arco de tungsteno y gas (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) requieren tratamientos de precalentamiento, lo cual eleva sus costos de manufactura; estos problemas pueden ser eliminados con la soldadura FSW y FSSW, recientemente se han publicado varios artículos de uniones similares de ellos así como aceros.

Badarinarayan [35], investigó el efecto de la herramienta usada en la soldadura similar de AA5083 utilizando dos herramientas diferentes con un hombro de 12 mm variando la geometría del pin: cilíndrico enroscado y triangular. Utilizando una frecuencia rotacional de 1500 rpm, 20 mm/min de velocidad de penetración, 2 s de tiempo de permanencia y 0.2 mm de penetración del hombro en la lámina. La resistencia para las uniones realizadas con el pin triangular fue de 3.6 kN, por otro lado, las uniones realizadas con el perfil cilíndrico obtuvieron una resistencia de 1.8 kN esto se debe a que la geometría del pin afectó la simetría del “gancho” (grieta que puede orientarse favorablemente para el crecimiento de microgrietas

## C2: Revisión de la literatura

bajo carga de servicio [36]), también se menciona que el pin triangular tiene un giro asimétrico lo cual incrementó la deformación del material y refinó en mayor grado la microestructura de la zona de agitación.

Akinlabi [37], propone una soldadura por FSSW similar de cobre utilizando una herramienta fabricada con acero H13 con un diámetro de hombro de 18 mm y un pin cilíndrico de 5 mm de diámetro. El tiempo de permanencia fue 5 s y se usaron las frecuencias rotacionales de 1200, 1600 y 2000 rpm. Se realizaron ensayos a tensión cortante y la resistencia última a la fractura más alta (99 MPa) se dio a la frecuencia rotacional de 1600 rpm, la microestructura de las soldaduras realizadas a 2000 rpm sufrió de recristalización dinámica mientras que el tamaño de grano para las soldaduras a 1200 rpm es mayor, a 1600 rpm se alcanzó una refinación de grano óptima, los valores de microdureza en escala Vickers más altos fueron para las uniones soldadas a 2000 rpm con valores de 67.2 HV.

Rodriguez et al. [28], estudiaron la soldadura símil de la aleación de magnesio ZEK100 (con un espesor de 1.4 mm) a frecuencias rotacionales de 1500 y 2250 rpm y penetraciones del hombro en la lámina de 0, 0.2 y 0.6 mm con una herramienta de hombro cóncavo de 12 mm de diámetro de hombro y un pin cilíndrico de 1.8 mm. La caracterización microestructural de las soldaduras reveló una zona de agitación con granos recristalizados que se fueron engrosando hacia las periferias. Los valores más altos (3.2 kN) de resistencia a la fractura se obtuvieron a una penetración de 0.2 mm y frecuencia rotacional de 1500 rpm. Los resultados de los ensayos a tensión se ven mayormente influenciados por la macroestructura de la soldadura como el ancho del área efectiva de unión y el espesor de las láminas.

García-Castillo et al. [27], estudiaron la evaluación microestructural de uniones soldadas por FSSW de láminas de Ti-6Al-4V (1.5 mm de espesor) realizadas a frecuencias rotacionales de 500–800 rpm, 3 s de tiempo de permanencia y velocidad de penetración de 1-2 mm/s. Se empleó una herramienta fabricada de

## C2: Revisión de la literatura

nitruro de boro cúbico policristalino con un hombro de 36.8 mm de diámetro y un pin de 5 mm de diámetro y 0.94 mm de longitud.

La zona de agitación presentó refinación de grano, la resistencia a la tracción máxima fue de 1118 MPa a 800 rpm y 1 mm/s de velocidad de entrada. El proceso FSSW fue apto para la soldadura de aleaciones de titanio.

### 2.3.6 Soldadura de materiales disimilares

La soldadura de materiales disimiles ha sido un tema de interés en los procesos de manufactura ya que se obtienen las ventajas de ambos materiales para la solución de problemas industriales como el remplazo de uniones remachadas reduciendo costos y pesos [5] [38]. Las soldaduras disímiles además de referirse a materiales con base diferente abarcan también la soldadura de materiales con la misma base, pero diferente composición; el problema es que implica un mayor reto a la soldadura similar el tener materiales con propiedades térmicas, químicas, físicas y mecánicas diferentes.

Para obtener una buena soldadura disímil es necesaria una ardua investigación y encontrar los parámetros de proceso como la geometría de la unión, espesor de las láminas, distorsiones, corrosión galvánica, esfuerzos residuales, puntos de fusión, efecto del ciclo térmico en las microestructuras de los materiales y la formación de compuestos intermetálicos [5], esto último es de vital importancia ya que al soldar materiales no ferrosos como el aluminio se forman capas de compuestos intermetálicos en la interfase, lo cual se traduce en fragilidad y agrietamiento en la unión [39].

La soldadura entre materiales con diferentes puntos de fusión puede provocar cambios en las composiciones como resultado de la evaporación de elementos con menor punto de fusión produciendo soldaduras con menor calidad [33].

FSSW es una alternativa para la soldadura disímil ya que la unión se realiza en gran parte por deformación plástica manteniendo la temperatura del proceso por debajo de los puntos de fusión de los materiales con lo cual se evita una alta formación de compuestos intermetálicos, adicionalmente ofrece una mayor

## C2: Revisión de la literatura

posibilidad de combinaciones para la industria automotriz como aluminio, magnesio, titanio, cobre, polímeros y aceros lo cual lo pone en ventaja con la soldadura por resistencia por puntos [25].

La soldadura disimilar por FSSW para materiales con puntos de fusión similares tales como aleaciones de diferente composición aluminio-aluminio y magnesio-magnesio, aluminio-magnesio no representan un gran reto, lo complicado es soldar materiales con puntos de fusión variados como aluminio-acero, magnesio-acero.

Piccini et al. [40], proponen una soldadura de aleaciones disimilares de aluminio AA5052-AA6063 (con espesores de 3 y 2 mm respectivamente) estudiando el efecto de la penetración de la herramienta. Realizaron las soldaduras a una frecuencia rotacional de 680 rpm, una velocidad de penetración de 19 mm/s y un tiempo de permanencia de 2 s. La herramienta se realizó con acero H13 y se varió la penetración de 0.05 a 1.25 mm, se realizaron experimentos con la lámina de AA5052 en la posición superior y viceversa. Los resultados indicaron que para la lámina de AA6063 superior la carga máxima de 5.5 kN se alcanza a una penetración de 1 mm en diferencia con la lámina de AA5052 superior de aproximadamente 3 kN a una mayor penetración de 1.2 mm, probablemente por la diferencia de espesores el área soldada efectiva varía.

Chowdhury et al. [1], sugieren soldaduras símiles y disímiles entre la aleación de magnesio AZ31-H24 y AA5754-O (con espesores de 2 mm), evaluando la resistencia a ensayos de tensión cortante y su vida a la fatiga. Los experimentos se realizaron con una herramienta fabricada de acero AISI/SAE-H13 con un diámetro de hombro de 13 y 5 mm de diámetro del pin y 2.8 mm de largo, usando una frecuencia rotacional de 2000 rpm, una velocidad de penetración de 3 mm/s, una penetración de 0.2 mm y un tiempo de permanencia de 2 s. Los resultados del ensayo de tensión arrojaron que se obtuvo mayor carga entre las soldaduras similares aluminio-aluminio y magnesio-magnesio respecto a la unión disímil. La resistencia máxima a la fractura para la soldadura similar de aluminio fue de 3.5

## C2: Revisión de la literatura

kN aproximadamente, la resistencia de la soldadura similar de magnesio fue de 4 kN y la resistencia para la soldadura disímil fue de 1 kN, esta disminución se debe a la formación de compuestos intermetálicos en la interfase. Los resultados de las curvas S-N mostraron que la resistencia a la fatiga tiene la misma tendencia, la soldadura disímil presentó una menor resistencia a la fatiga por los compuestos intermetálicos.

Por otro lado, Manickam et al. [41], evaluaron la resistencia a la fractura cortante y su relación con los parámetros de soldadura de uniones disimiles de aluminio-cobre. Para sus experimentos utilizaron AA6061-T6 y una aleación comercial de cobre con níquel y fósforo. Los parámetros usados fueron las frecuencias rotacionales de 1600, 1800, 2200 y 2400 rpm, velocidades de penetración de 5, 6, 7, 8 y 9 mm/min, tiempos de permanencia de 15, 20, 25, 30 y 35 s, las herramientas se fabricaron con una relación D/d (diámetro de hombro/diámetro de pin) de 4, 3.5, 2.5, 3 y 4.5. La mayor carga de resistencia a la fractura cortante fue de 4.79 kN y se obtuvo cuando se usaron los parámetros intermedios (2000 rpm, 7 mm/min, 25 s y D/d=3.5) y se encontró que a estas condiciones las dimensiones del “gancho” eran óptimas lo cual propiciaron la mayor carga, también se menciona que la formación de compuestos intermetálicos propició cargas de fractura altas.

Ravi et al. [42], analizaron el efecto de la superficie del hombro y el perfil del pin en la soldadura FSSW tipo sándwich de AA6081-T6 con un polímero (HDPE) con aplicaciones en la fabricación de grandes componentes de doble curvatura, los parámetros de proceso se mantuvieron constantes (frecuencia rotacional de 600 rpm, velocidad de penetración de 22 mm/min y penetración de 1 mm) utilizando ocho herramientas diferentes: pin cilíndrico con hombro plano, pin cilíndrico con hombro cóncavo, pin cilíndrico con hombro convexo, pin cónico con hombro plano, pin roscado con hombro plano, pin triangular con hombro plano, pin cuadrado con hombro plano y pin hexagonal con hombro plano. Ellos encontraron que la unión era posible con las geometrías de herramienta estudiadas pero la herramienta con

## C2: Revisión de la literatura

pin cuadrado produjo una unión con mayor resistencia a la fractura de aproximadamente 2.75 kN por otro lado los de menor resistencia fueron las uniones realizadas por pin roscado y cónico con una resistencia menor a 0.5 kN, esto se debe a que la soldadura realizada con la herramienta cuadrada tiene un tamaño moderado de gancho.

Chen [3], describe en su artículo la soldadura por FSSW entre AA6111-T4 y un acero DC04 de 1 mm de espesor. Se empleó una herramienta con un hombro de 11 mm de diámetro y un pin de WC cónico de 3 mm de diámetro y 1 mm de longitud. Los parámetros evaluados fueron: frecuencias rotacionales de 800, 1200, 1600 y 2000 rpm, tiempos de permanencia de 1, 2, 4, 5, 7 y 9 s y velocidades de penetración en un rango de 60-2000 mm/min, los resultados dan a conocer que la carga máxima a la fractura se consiguió con la modificación del parámetro de velocidad de penetración alcanzando el resultado de capacidad de carga máximo de 3.5 kN a la velocidad de penetración de 1000 mm/min.

### **2.3.7 Estado del arte de soldaduras de aleaciones de aluminio-aceros doble fase**

La soldadura de aleaciones de aluminio con AHSS resulta de un especial interés para la industria automotriz puesto que las dos grandes tendencias para cubrir las necesidades ambientales son la aplicación de materiales ligeros y de AHSS pero sigue siendo un reto debido a su diferencia abismal de propiedades principalmente físicas y térmicas con lo cual es difícil su unión por procesos de soldadura por fusión que implicarían la formación de compuestos intermetálicos entre el aluminio y acero, por ejemplo en su diagrama binario de fases se observa  $FeAl$ ,  $FeAl_2$ , entre otros; como se muestra en la Figura 2-16.

## C2: Revisión de la literatura

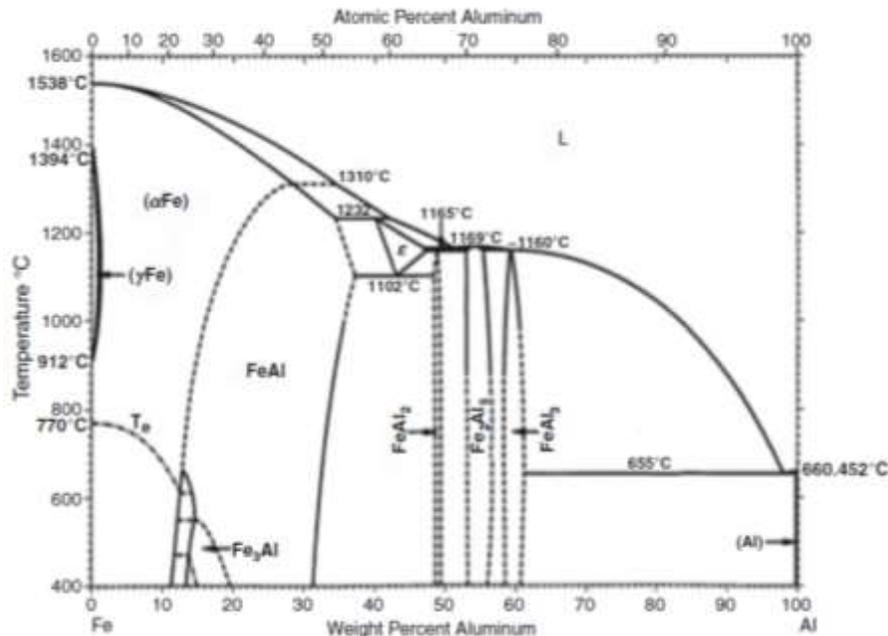


Figura 2-16 Diagrama de fases para el sistema Al-Fe [43].

Una vez más la mejor alternativa para soldar aluminio con acero son los procesos en estado sólido como FSSW, aunque sigue siendo necesaria la investigación ya que al tratarse de acero las herramientas para soldar por FSSW requieren de una alta resistencia al desgaste, comúnmente se fabrican de WC o pCBN pero elevan el costo del proceso [33]. Aunque se ha encontrado que la soldadura entre aluminio y acero puede ser lograda con herramientas fabricadas de aceros comunes como AISI/SAE-H13 si esta permanece por encima de la superficie del acero y realiza la unión por difusión [44].

Dentro de la categoría de AHSS se encuentra el acero DP que es de los más usados en la industria automotriz.

La soldadura entre aluminio/acero es de gran interés para esta industria ya que es altamente usada en el ensamblaje de partes: pilares, paneles de puertas y componentes automotrices (cofres y puertas de la cajuela) [45].

En la literatura se encuentran reportados resultados de investigaciones similares de soldadura en estado sólido de aleaciones de aluminio con aceros avanzados, existen varias publicaciones de soldadura FSW de aluminio con aceros DP,

## C2: Revisión de la literatura

soldadura FSSW con aceros galvanizados, aceros TRIP; no obstante artículos que investiguen la soldadura FSSW de aluminio específicamente con DP son muy escasos por lo que es un área de oportunidad.

Marconi et al. [46], investigaron la unión disimilar entre AA1050 y un acero DP1000 (de 2 mm de espesor ambas láminas) por FSSW. Para este experimento se varió la frecuencia rotacional entre 1000, 1500 y 2000 rpm, la velocidad de penetración fue de 10, 20 y 40 mm/min, penetración constante de 2.8 mm y el tiempo de permanencia fue de 2 s. Para este trabajo se diseñó una herramienta con perfil cónico de níquel con 11 mm de diámetro del pin. Los resultados de los ensayos a tensión cortante arrojaron que la mayor carga fue de 3.33 kN y se dio a 1500 rpm y una penetración de 20 mm/min, también se realizó un estudio del perfil de microdureza, el aluminio no tuvo una variación notable en su microdureza, se mantuvo constante por debajo de 50 HV, por su parte el acero alcanzó microdurezas superiores a 400 HV y la mejor registrada fue de aproximadamente 200 HV. En la Figura 2-17 se muestra una micrografía de las distintas zonas formadas en el aluminio, se observan estructuras muy finas recristalizadas derivadas del proceso FSSW.

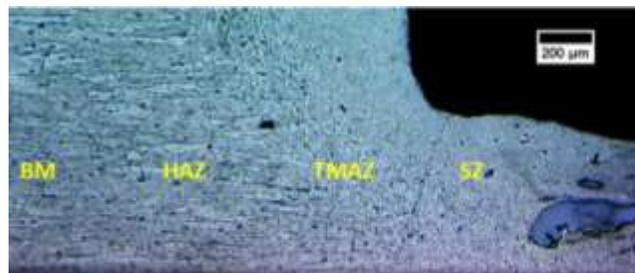


Figura 2-17 Micrografía de la junta soldada de aluminio.

Miyagawa et al. [47], dan a conocer en su publicación los efectos del recubrimiento de zinc en una soldadura FSSW. Para ello utilizaron AA5052 y tres tipos de aceros: sin galvanizar, galvanizado por galvanoplastia de zinc, galvanoplastia de aleación de zinc y níquel y galvanización de zinc en baño caliente. Se usó una frecuencia rotacional de 3000 rpm, velocidad de penetración de 50 mm/min,

## C2: Revisión de la literatura

penetración de 0.4 mm y un tiempo de permanencia de 5 s. Los resultados de tensión cortante arrojaron que la mayor resistencia a la tensión se alcanzó con el acero galvanizado por galvanoplastia de zinc (3.5 kN), la menor resistencia se obtuvo con el acero galvanizado por el método de galvanoplastia de zinc y níquel (1.5 kN aproximadamente) por lo que se concluye que estas diferencias en resistencias se deben a la composición química en donde se inició la fractura. También se debe posiblemente a que durante la soldadura la capa de zinc se remueve de manera positiva por lo que la interacción se da con mayor facilidad entre el aluminio y el acero.

Liyanage et al. [48], analizaron la soldadura FSSW de AA6111 (1.5 mm) y un acero de bajo carbono (1.8 mm) con recubrimiento de zinc. Para la soldadura se utilizó una herramienta con un diámetro de hombro de 10 mm y un pin cónico de 4 mm de diámetro y 1.7 mm de altura fabricada de W-25Re. La penetración varió de 0.35 a 0.85 mm de la punta del pin en la lámina de acero, el tiempo de permanencia fue de 4 s y una frecuencia rotacional de 3000 rpm. Se realizó un estudio de microdureza y el acero obtuvo valores en un rango de 174 a 263 HV en contraste con las regiones ricas en aluminio donde la microdureza obtuvo el valor mínimo de 88 y hasta 552 HV lo cual indica la formación de compuestos intermetálicos. En los resultados de ensayos de tensión cortante el valor más bajo fue de 2 kN y el más alto de 3.6 kN respecto al aumento de penetración de 0.4 a 0.85 mm, lo que indica que es un parámetro importante para la resistencia.

Kurtenbach et al. [49], revelaron la investigación de la soldadura entre AA6022 y un acero rolado en frío proporcionado por General Motors <sup>TM</sup> galvanizado y sin galvanizar. Para la soldadura se usó una herramienta comercial de AMP <sup>TM</sup> de acero para herramientas con un pin de carburo de tungsteno y níquel. Se utilizaron tiempos de permanencia de 1 s, una frecuencia rotacional de 2200 rpm, el proceso FSSW se hizo con la variación de refill ya que el pin se insertó en el acero y el hombro solo permaneció en la lámina de aluminio. La herramienta fue un problema debido a la alta afinidad entre el níquel y el acero y se atascó en el punto

## C2: Revisión de la literatura

de soldadura. Se realizaron ensayos a tensión y la mayor resistencia fue de 3.4 kN y se obtuvo para la soldadura de aluminio con acero galvanizado, nuevamente se observa un efecto positivo del recubrimiento de zinc en las soldaduras FSSW.

Piccini et al. [5], reportaron su investigación de la optimización de la geometría de la herramienta para la soldadura FSSW de un AA5052 (1 mm) con un acero de bajo carbono (0.65 mm). Se usaron tres herramientas diferentes: herramienta A con un pin cónico de 0.3 mm de longitud y 5 mm de diámetro, herramienta B pinless y herramienta C con un pin cónico de 0.4 mm de longitud y 9.6 mm de diámetro. Los parámetros fueron 35 mm/min, tiempo de permanencia de 2 s y 1200 rpm. La penetración varió entre 0.05 y 0.65 mm. Los resultados reportaron la alta deformación de la lámina superior al alcanzarse la penetración máxima, observaron compuestos intermetálicos en la interfase. Se realizaron estudios de microdureza y el valor más alto en la zona de agitación del aluminio se alcanzó con la herramienta A de aproximadamente 70 HV, se observa que ocurre una cristalización dinámica en esta zona. En cuanto a los resultados de resistencia a la tensión el valor más alto (2.6 kN) fue para la herramienta C que en su evaluación microestructural mostró tener una capa de intermetálicos más gruesa y continua (ver Figura 2-18). Se concluye que es importante una optimización de la herramienta para obtener mejor calidad en la soldadura.

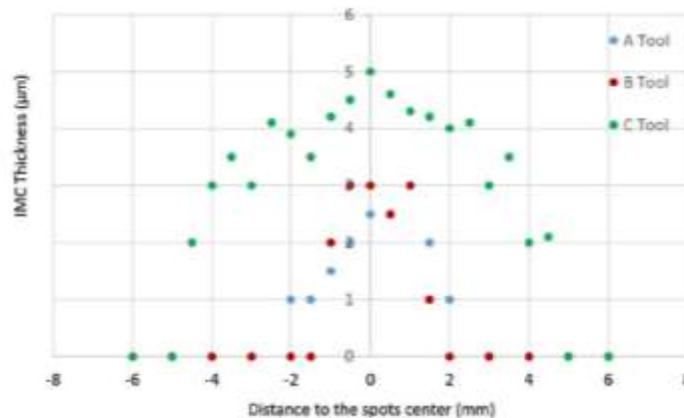


Figura 2-18 Mediciones de espesor de capa de compuestos intermetálicos.

## C2: Revisión de la literatura

Chen et al. [4], analizaron el efecto de los parámetros de proceso FSSW en la soldadura de AA6061-T6 con TRIP780/800, ambas de 1.5 mm de espesor. La herramienta que se utilizó fue de carburo de tungsteno con 10 % de cobalto con una dureza de 91.8 HRA, con un pin cilíndrico de 12.7 mm de hombro y 3.7 mm de diámetro de pin y 1.2 mm de longitud. Para los experimentos se utilizaron velocidades de penetración de 5, 10 y 15 mm/min y tiempos de permanencia de 1, 5 y 10 s, dejando la frecuencia rotacional y penetración constantes a 2000 rpm y 0.4 mm de penetración en el acero. De acuerdo con el análisis que realizaron se determinó que la variable con mayor influencia en la resistencia de las uniones fue el tiempo de permanencia, ya que el efecto de la velocidad de penetración depende a la vez del tiempo de permanencia. Debido a los tiempos altos el aporte térmico fue alto, lo que propició una excesiva formación de compuestos intermetálicos en la interfase que disminuyeron la resistencia de las soldaduras. La resistencia a la tensión más alta (cerca de 4 kN) se registró al modificarse el parámetro de tiempo de permanencia, siendo la de mejor resultado a 1 s.

De lo anterior se deduce que se han realizado estudios de soldadura por FSSW de aleaciones de aluminio con diferentes tipos de acero, sin embargo, el estudio específico de aluminio con aceros DP es muy escaso, sigue resultando interesante mejorar el proceso específicamente para este sistema, es un área de oportunidad de investigación que traerá beneficios a la industria al conocerse mejor su comportamiento.

## **3 Metodología experimental, materiales y equipos**

### **3.1 Metodología experimental**

Para el desarrollo del proyecto se propusieron las siguientes etapas experimentales: caracterización de los metales base, caracterización del material de la herramienta, diseño y preparación de la herramienta, diseño y fabricación del sistema de sujeción, proceso de soldadura por fricción-agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding - FSSW) y análisis y evaluación de la microestructura y las propiedades mecánicas de las uniones, como se exhibe en la Figura 3-1.

En los siguientes capítulos se presenta cada etapa de experimentación de manera desarrollada, así como los resultados, discusión y conclusiones.

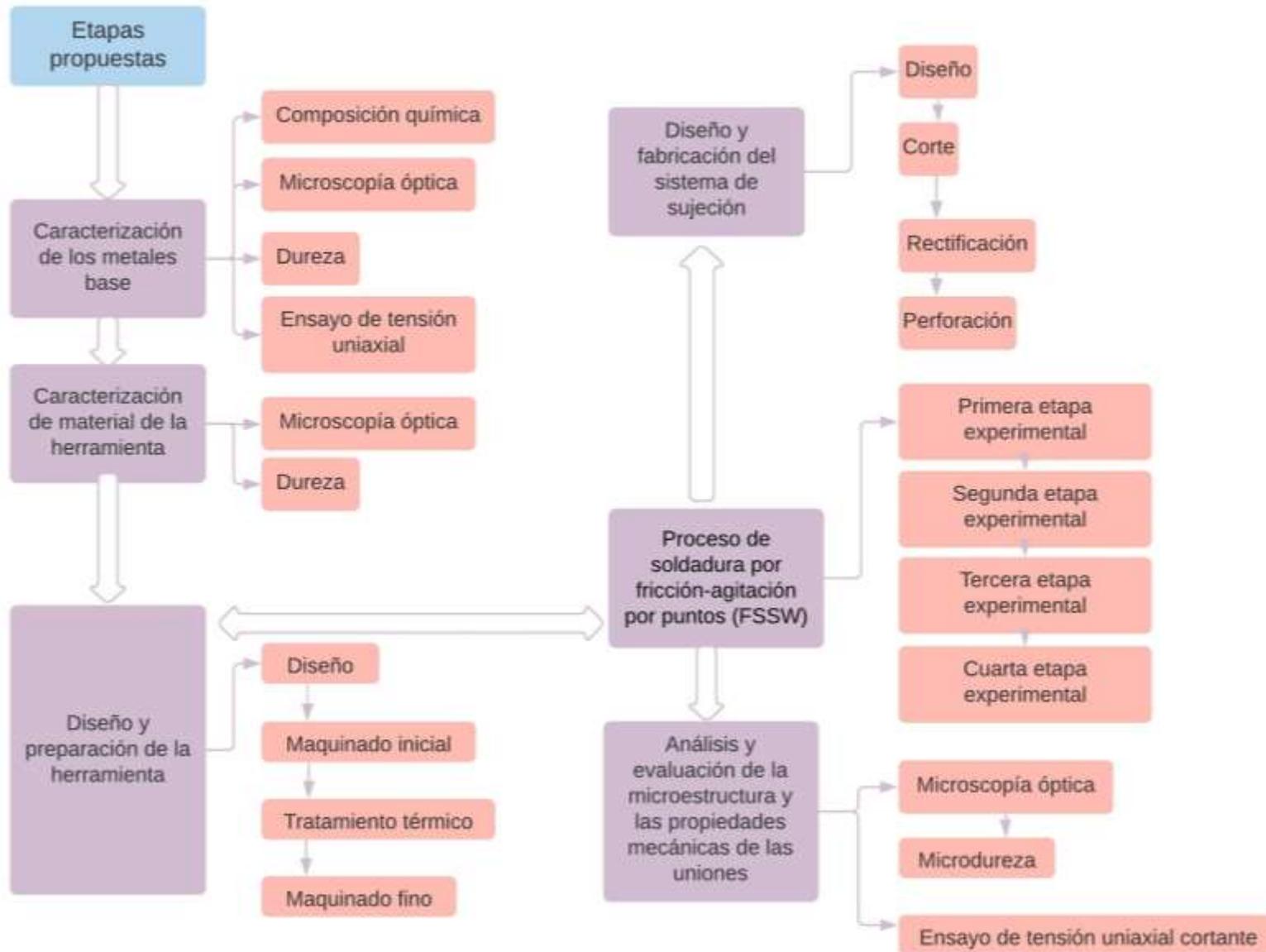


Figura 3-1 Diagrama de bloques experimental.

### 3.2 Materiales

Los materiales utilizados para las pruebas fueron una lámina de aluminio AA6063-T6 de 3.175 mm de espesor, así como una lámina de acero galvanizada DP780 de 1.240 mm de espesor.

### 3.3 Equipos para la caracterización

Para la caracterización de los metales base y las soldaduras se utilizaron los siguientes equipos bajo las condiciones mencionadas.

- La composición química se obtuvo con un espectroscopio de fluorescencia de rayos X marca Bruker <sup>TM</sup> modelo S2 PUMA utilizando cobre como fuente de rayos X (ver Figura 3-2).



Figura 3-2 Espectroscopio de fluorescencia de rayos X.

- Las muestras se pulieron con una pulidora metalográfica marca Prazis <sup>TM</sup>, como se aprecia en la Figura 3-3 a); la macro y microestructura se obtuvo con un microscopio óptico metalográfico marca Union Versament-3 <sup>TM</sup> (ver Figura 3-3 b)), con ayuda de una cámara adaptada al microscopio se capturaron imágenes a diferentes aumentos.

### C3: Materiales y metodología experimental



Figura 3-3 a) Pulidora, b) microscopio óptico metalográfico (OM).

- La medición de las penetraciones se realizó con el software de procesamiento y análisis de imágenes Image Pro <sup>TM</sup>.
- Para la obtención de la microdureza se empleó un microdurómetro marca Shimadzu modelo HMV-2T<sup>TM</sup> como se observa en la Figura 3-4 a), las condiciones de ensayo fueron: carga de 300 g y un tiempo de 10 s por cada indentación; la evaluación de la resistencia a la tensión uniaxial se realizó con una máquina universal de ensayos mecánicos marca Shimadzu modelo AG-1 (ver Figura 3-4 b)), los ensayos se realizaron a una velocidad de desplazamiento de 3 mm/min.

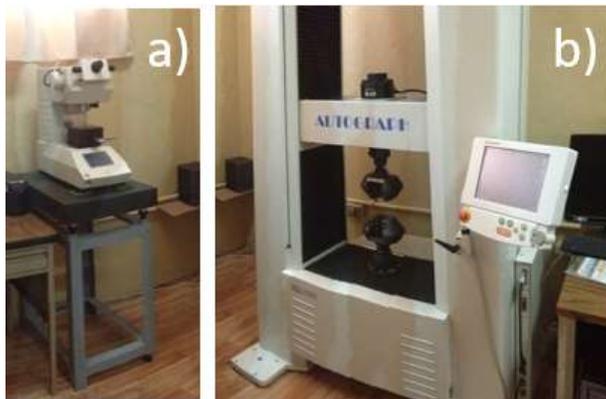


Figura 3-4 a) Microdurómetro, b) máquina universal de ensayos mecánicos.

- Para la captura de imágenes de la fractura se utilizó un microscopio digital marca Digimicro USB <sup>TM</sup>.

### 3.4 Caracterización de los metales base

#### 3.4.1 Composición de los metales base

Se seccionaron cuadros de las láminas de aluminio y acero de 10 mm de lado con ayuda de una segueta, enseguida se desbastaron con lijas de carburo de silicio de 100, 240, 400, 600 y 1200; también se analizó la composición del recubrimiento de zinc del acero, para esto se limpió la superficie del acero únicamente con la lija 1200.

En la Tabla 3-1, Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se muestran los resultados de la composición química de la aleación de aluminio AA6063-T6, del recubrimiento de zinc y del acero DP780.

Tabla 3-1 Composición química del AA6063-T6.

Elemento	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	V	Ti
Composición (%)	94.54	3.04	1.80	0.44	0.08	0.05	0.02	0.02

Tabla 3-2 Composición química del recubrimiento de Zn.

Elemento	Zn	Fe	Al	Si	Cl	K	V	Cr	Mn	Mo	Ta	Hf
Composición (%)	75.27	22.36	0.62	0.19	0.01	0.74	0.06	0.07	0.47	0.05	0.13	0.03

Tabla 3-3 Composición química del DP780.

Elemento	Fe	Al	Si	P	Sc	Cr	Mn	Ni	Cu	Ir	Mo	Bi
Composición (%)	96.88	0.16	0.37	0.01	0.28	0.30	1.77	0.01	0.09	0.01	0.01	0.01

#### 3.4.2 Microestructura

Se seccionaron cuadros del aluminio y acero de 5 mm de lado. La preparación de las muestras consistió en encapsulado, desbaste, pulido preliminar y final con

### C3: Materiales y metodología experimental

alúmina y sílica coloidal de 0.3 y 0.05  $\mu\text{m}$  respectivamente hasta obtener acabado espejo en la superficie, el último paso fue realizar un ataque químico para revelar la microestructura interna.

En la Figura 3-5 y Figura 3-6, se observan las micrografías de la microestructura del AA6063-T6 a 100 y 200 X; cómo se puede notar la microestructura está compuesta por granos gruesos y equiaxiales de la matriz de aluminio, las diferentes coloraciones indican las distintas orientaciones de grano; también se observan precipitados de magnesio y silicio en color oscuro inmersas en la matriz, como se muestra en la Figura 3-7.

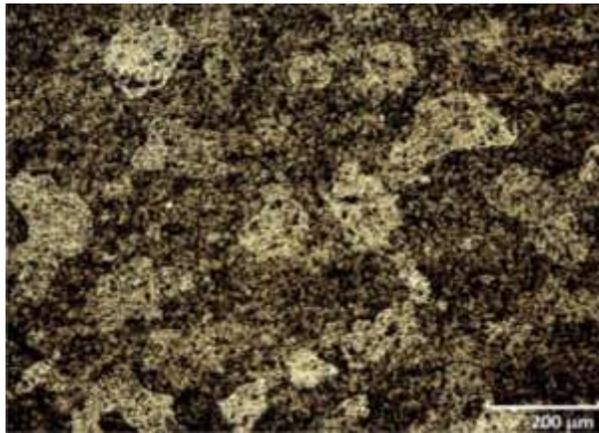


Figura 3-5 Micrografía del AA6063-T6 a 100 x.



Figura 3-6 Micrografía del AA6063-T6 a 200 x.



Figura 3-7 Micrografía del AA6063-T6 a 500 x.

En la Figura 3-8 y Figura 3-9, se muestran las micrografías del acero DP780 a 100 y 200 X. En estas figuras se observa el sentido de laminación, así como granos alargados de ferrita que se distingue en color claro, también se observan las islas de martensita características de los aceros doble fase en color oscuro.

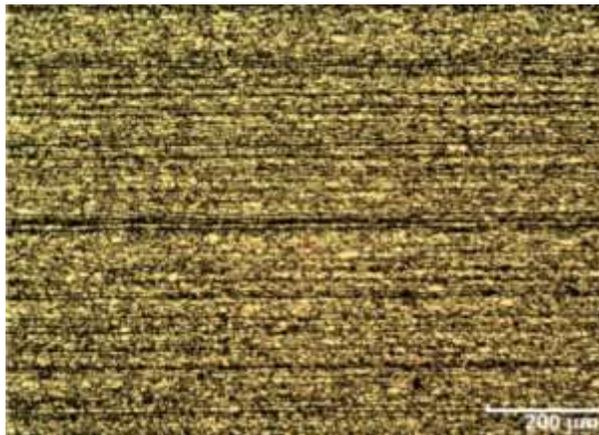


Figura 3-8 Microestructura del DP780 a 100X.

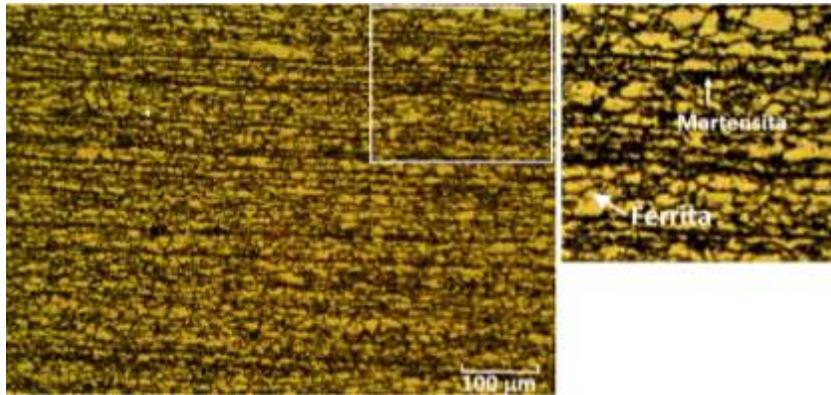


Figura 3-9 Microestructura del DP780 a 200X.

### 3.4.3 Medición de la dureza

Las muestras con preparación metalográfica se llevaron al microdurómetro, donde se realizaron cinco indentaciones por muestra. El promedio de la microdureza del aluminio es de 75 HV y para el acero es de 244 HV.

### 3.4.4 Evaluación de la resistencia a la tensión uniaxial

Para la evaluación de la resistencia a la tensión uniaxial del AA6063-T6 y acero DP780 se obtuvieron probetas para ensayo a tensión uniaxial basadas en la norma E 8/E 8M – 08 de la ASTM.

En la Figura 3-10 y Figura 3-11 se muestran los resultados de los ensayos a tensión para el aluminio y el acero, el aluminio exhibió esfuerzo último a la tensión (Ultimate Tensile Strength - UTS) promedio de 214 MPa observándose en el gráfico una deformación de aproximadamente 20 % característica de las aleaciones de aluminio, mientras que el acero obtuvo un UTS promedio de 814 MPa, no se observa que exista una zona de transición entre la zona de deformación elástica-plástica por lo que no hubo generación de bandas de Lüders, la deformación es visiblemente menor que para el aluminio.

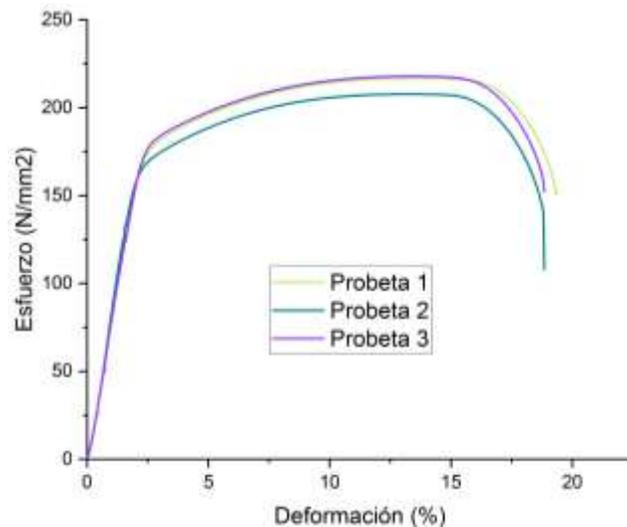


Figura 3-10 Resultados del ensayo de tensión de AA6063-T6.

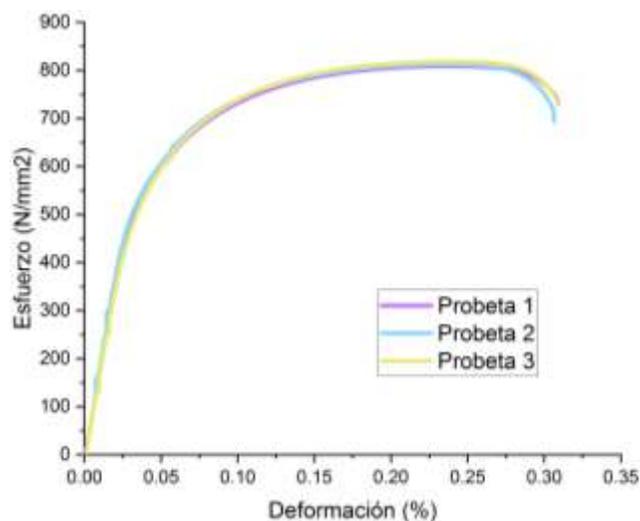


Figura 3-11 Resultados del ensayo de tensión de DP780.

### 3.5 Equipo para la fabricación de las herramientas y sistema de sujeción

#### *Fabricación de las herramientas*

- Para la fabricación de las herramientas se utilizó un torno de control numérico marca TITANIUM™ modelo BJ-1640 VS CNC, como se muestra en la Figura 3-12 a); los tratamientos térmicos se realizaron en un horno tipo mufla marca Felissa™, como se exhibe Figura 3-12 b).

### C3: Materiales y metodología experimental



Figura 3-12 a) Torno CNC, b) horno.

- Para las mediciones de dureza se utilizó un durómetro marca Affri <sup>TM</sup> modelo 206 RT, de acuerdo a los estándares se utilizó una carga de 150 kg y un penetrador en forma de diamante, en la Figura 3-13 a); los cortes de las herramientas se realizaron con una electroerosionadora de hilo marca TITANIUM WEDM-HS <sup>TM</sup>, como se ilustra en la Figura 3-13 b).



Figura 3-13 a) Durómetro, b) electroerosionadora de hilo.

#### *Fabricación del sistema de sujeción*

- Para el corte de la placa se utilizó la electroerosionadora de hilo mencionada en el punto anterior; la rectificación de las placas se llevó a cabo con una rectificadora horizontal de disco marca Chevalier <sup>TM</sup> modelo FSG-618M, como se observa en la Figura 3-14, utilizando un líquido refrigerante para evitar altas temperaturas en las placas.



Figura 3-14 Rectificadora de planos paralelos.

- Para la ubicación de los puntos se usó una fresadora CNC marca GSK™ modelo XK7130A, Figura 3-15 a); esta fresadora se utilizó también para realizar las uniones por soldadura de fricción - agitación por puntos (Friction Stir Spot Welding – FSSW); la perforación de la placa de sujeción se realizó con un taladro radial marca Tago modelo M-90, en la Figura 3-15 b).



Figura 3-15 a) Fresadora CNC, b) taladro radial.

## 3.6 Material, diseño y fabricación de las herramientas

### 3.6.1 Material para la herramienta

Se eligió el acero AISI/SAE-H13, Figura 3-16, como material para fabricar las herramientas debido a que es un material resistente a altas temperaturas, económico y accesible, se cortaron segmentos de 11 cm aproximadamente en los cuales se maquinó un pin en cada extremo de la barra.



Figura 3-16 Barras de acero AISI/SAE-H13.

#### *3.6.1.1 Microestructura y medición de la dureza*

Se cortó una sección de la barra para su análisis microestructural y medición de la dureza inicial antes de cualquier tratamiento térmico, previo a estos procedimientos se realizó la preparación metalográfica de la muestra (encapsulado, desbaste, pulido y ataque químico).

En la Figura 3-17, Figura 3-18, y Figura 3-19 se observa la microestructura del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro a diferentes aumentos, el resultado promedio de las mediciones de la dureza del acero es de 20 HRC.

De acuerdo con la microestructura y a la dureza obtenida se observa que viene de origen con un tratamiento térmico propio del proceso de manufactura. En las zonas oscuras de la micrografía se observa perlita, bainita, ferrita y presencia de carburos de acuerdo al diagrama TTT para este tipo de acero [50].

### C3: Materiales y metodología experimental

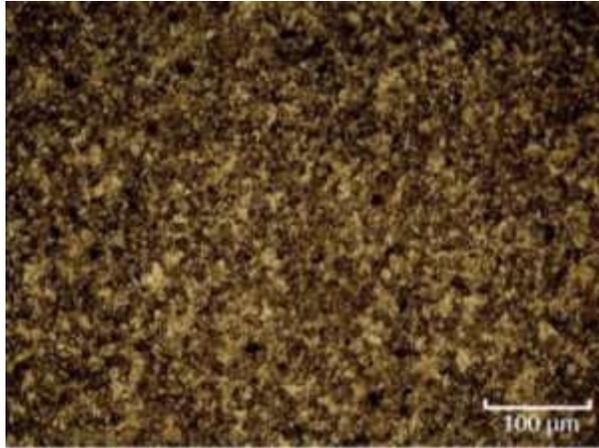


Figura 3-17 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 200 x.

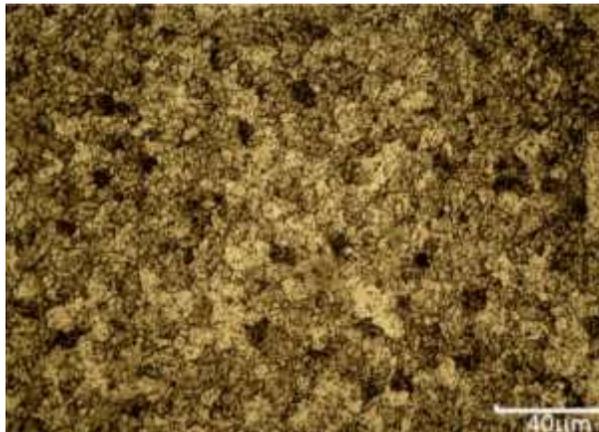


Figura 3-18 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 500 x.

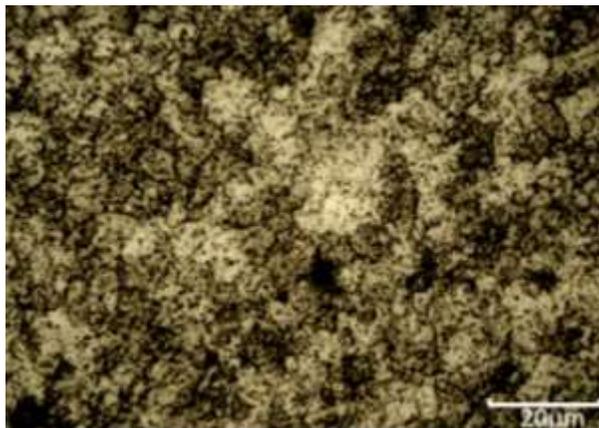


Figura 3-19 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 en condición de suministro 1000 x.

### 3.6.2 Primer diseño de herramienta

Se optó por diseñar una herramienta con perfil cónico empleando el software SolidWorks <sup>TM</sup>, para su diseño se tomaron en cuenta los siguientes puntos: para lograr una unión efectiva se requiere un mínimo de 30 % de penetración del pin en la segunda lámina [51], el hombro entra alrededor del 5 % del espesor de la primera lámina [52], una ligera concavidad en el hombro evita el desplazamiento de material [25].

En la Figura 3-20 a) y b) se observa una imagen del perfil de la herramienta y dimensiones y una imagen 3D respectivamente.

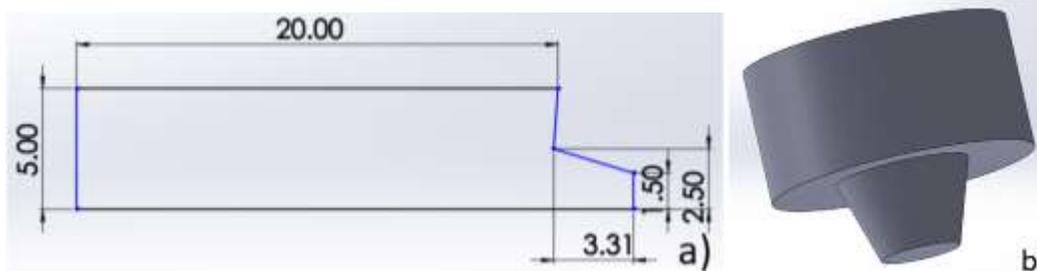


Figura 3-20 Primer diseño de herramienta.

### 3.6.3 Segundo diseño de herramienta

Se realizó un segundo diseño de herramienta con la finalidad de eliminar problemas que se observaron en las soldaduras realizadas con la primera herramienta: el pin era muy largo y el hombro no entraba lo suficiente en la lámina de aluminio, para evitar el desgaste de la herramienta se decidió mantenerlo por encima de la superficie de DP, diseñar un hombro sin concavidad y se optó por cambiar el perfil cónico por un perfil de pin cilíndrico con el fin de evitar que el aluminio se adhiriera a la superficie de la herramienta, se mantuvo una relación de diámetro de hombro/diámetro de pin ( $D/d = 3$ ) como sostiene Vijayavel [53].

El diseño se realizó en el software SolidWorks <sup>TM</sup>, en la Figura 3-21 a) se observa una imagen del diseño de la herramienta con sus dimensiones y en b) el diseño en 3D.

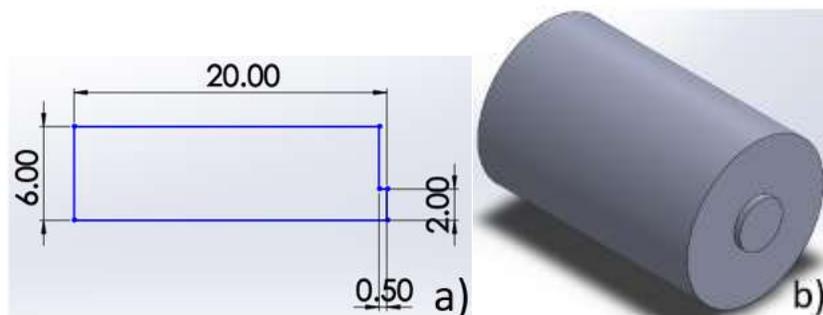


Figura 3-21 Segundo diseño de herramienta.

### 3.6.4 Fabricación de las herramientas

Después de realizar los diseños, el proceso de fabricación para ambos diseños de herramientas fue el mismo. En primer lugar, se obtuvo un código CNC con el software Mastercam™ para el maquinado de la herramienta en torno; enseguida se procedió a realizar un maquinado inicial (burdo) con el que se obtuvo la geometría cónica del pin diseñada, realizándose un desbaste de torno y un refrentado con la finalidad de tener mejor precisión en las dimensiones.

De acuerdo con los estudios de Hartmann et al. [54], se sugiere que, para obtener mejores resultados en la apariencia visual de las soldaduras por fricción, así como mejores propiedades mecánicas se recomienda que el acabado del maquinado de la herramienta tenga rugosidades mínimas aproximadamente de  $0.8 \mu\text{m}$ , por lo que se buscaron los parámetros de maquinado. En la Tabla 3-4 se muestran los parámetros de maquinado utilizados para la obtención de la geometría deseada de la herramienta.

Tabla 3-4 Parámetros de operación de maquinado.

<b>Velocidad de avance</b> $\left(\frac{\text{mm}}{\text{rev}}\right)$	0.03048
<b>Avance de penetración</b> $\left(\frac{\text{mm}}{\text{rev}}\right)$	0.127
<b>Frecuencia rotacional (rpm)</b>	1200
<b>Profundidad de corte (mm)</b>	0.09956

### C3: Materiales y metodología experimental

Posterior al maquinado inicial, se realizaron los tratamientos térmicos de templado y revenido en el horno para aumentar la dureza y la tenacidad previo al proceso de soldadura, en la Figura 3-22 se proporcionan los tiempos y temperaturas de los tratamientos térmicos mencionados (en color azul el templado y en rojo el revenido), en ambos tratamientos se alcanzó la temperatura ambiente por normalizado, en la Figura 3-23 a) se muestra una imagen de las herramientas durante el tratamiento térmico en la b) se observa cómo se realizó el tratamiento.

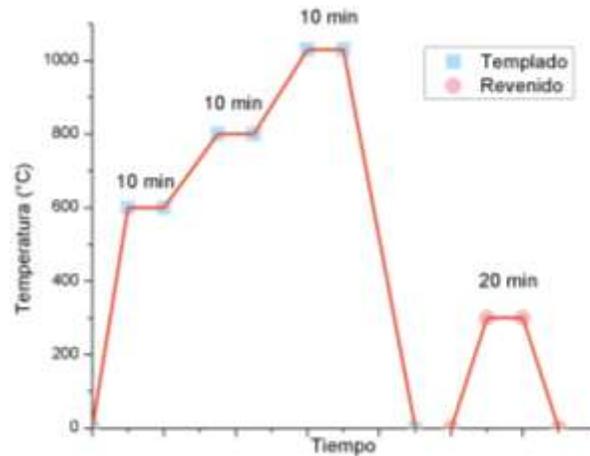


Figura 3-22 Rutas de temperatura y tiempo de los tratamientos térmicos.



Figura 3-23 a) Herramientas durante tratamiento térmico, b) extracción de herramientas de la mufla.

### C3: Materiales y metodología experimental

Después se realizó un segundo maquinado (fino) en el torno para retirar la capa de óxido formada durante los tratamientos térmicos y se corroboró que se hubiera alcanzado la dureza deseada, se realizaron 5 mediciones de dureza obteniéndose un promedio de 49 HRC que coincide con lo reportado en la literatura, en la Figura 3-24 [45] se muestran imágenes de los dos diseños de herramientas después del tratamiento térmico.

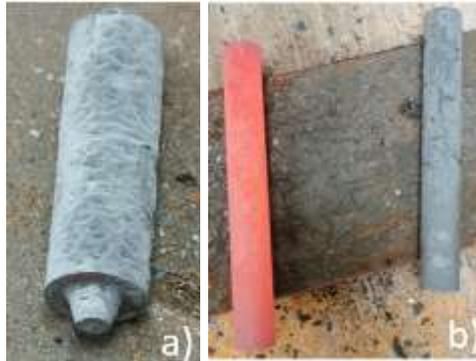


Figura 3-24 a) Herramienta primer diseño tratada, b) herramientas segundo diseño tratadas.

En la Figura 3-25 y Figura 3-26, se presenta una micrografía del acero AISI/SAE-H13 después del tratamiento térmico de templado y revenido, se observa una microestructura con presencia de bainita, martensita, presumiblemente precipitación de carburos de vanadio, cromo y molibdeno, y una fracción en volumen menor de austenita retenida como se observa en la imagen comparativa en la Figura 3-27.

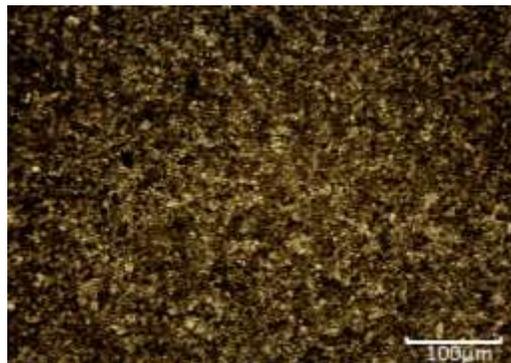


Figura 3-25 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 tratado a 200 x.

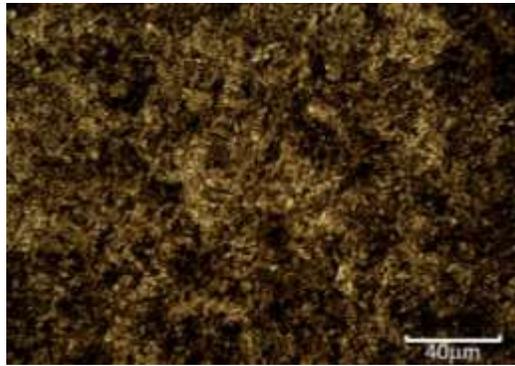


Figura 3-26 Micrografía del acero AISI/SAE-H13 tratado a 500 x.

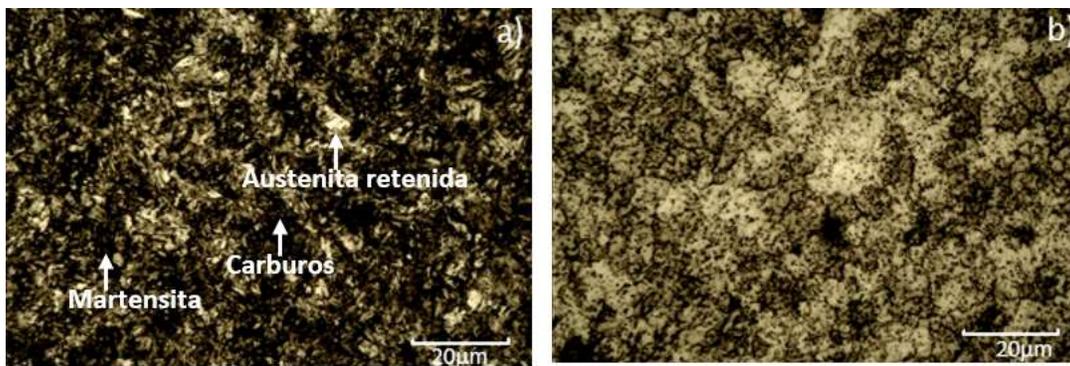


Figura 3-27 Comparación entre a) el acero tratado y b) sin tratar a 1000 x.

En Figura 3-28 se muestran imágenes de los dos diseños de herramienta con maquinado fino, finalmente, después del maquinado fino, la herramienta se seccionó por la mitad con la electroerosionadora obteniéndose dos herramientas por cada segmento.



Figura 3-28 a) Primer diseño de herramienta después de maquinado fino, b) Segundo diseño de herramienta después de maquinado fino.

### 3.7 Diseño y fabricación del sistema de sujeción

Con la finalidad de evitar que a partir de la vibración y el torque generados del proceso las láminas se deslizaran y que las soldaduras tuvieran un mejor acabado, se diseñó y fabricó un sistema de sujeción, el cual consiste en dos placas que son sujetadas a la fresadora y en medio de estas se colocan las láminas a soldar, la placa superior tiene un orificio donde entra la herramienta.

El sistema de sujeción se diseñó en el software SolidWorks™, en la Figura 3-29 se muestra el diseño, como se observa el sistema consiste en 4 orificios de sujeción y un orificio de mayor diámetro donde entra la herramienta.

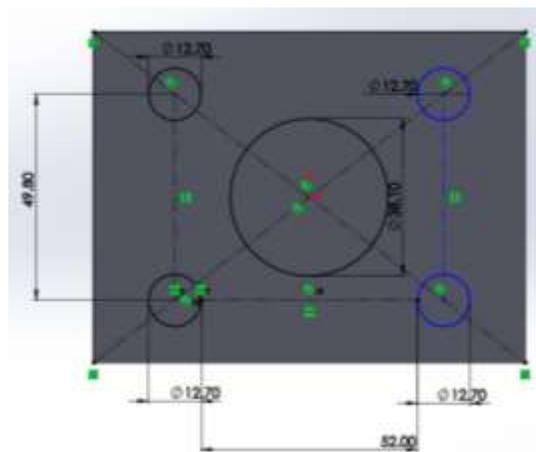


Figura 3-29 Diseño de sistema de sujeción.

### C3: Materiales y metodología experimental

Para su fabricación se empleó una placa de acero A36 de 12.70 mm de espesor la cual se cortó en dos piezas rectangulares de 80 mm de ancho por 103.94 mm con la electroerosionadora, en seguida se alinearon las placas con la rectificadora, Figura 3-30.

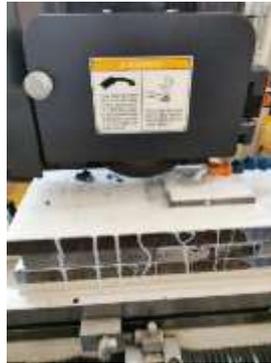


Figura 3-30 Rectificado de placas.

Una vez que se rectificaron las placas, se marcaron los centros de los orificios de sujeción y de entrada de la herramienta con la fresadora CNC, con el fin de ubicarlos con mayor precisión, después de marcar los orificios se procedió a realizar las perforaciones con ayuda de un taladro de banco, utilizando brocas de  $\frac{1}{2}$  y de  $1 \frac{1}{2}$  pulgada para los orificios mencionados con anterioridad y se retiraron las asperezas generadas durante el proceso de perforación con una lima, en la Figura 3-31 se muestra una imagen de la perforación.



Figura 3-31 Perforación de orificios.

Finalmente se realizaron ranuras en las placas con la fresadora para colocar las láminas con mayor facilidad.

### **3.8 Equipo y preparación de las muestras de soldadura**

- Para realizar las soldaduras se utilizó la fresadora CNC como se mencionó en el epígrafe 3.5.

Para todos los diseños experimentales la preparación de las muestras de soldadura consistió en seccionar las láminas aluminio y acero en segmentos de 100 mm de longitud y 25.40 mm de ancho por medio de la electroerosionadora.

### **3.9 Proceso de soldadura por fricción-agitación por puntos**

#### **3.9.1 Primera etapa experimental**

Por cada condición de parámetros se realizó una soldadura como prueba de los parámetros, en la Tabla 3-5 se muestran los parámetros usados para la primera etapa experimental, en esta etapa se empleó la primera herramienta para realizar las soldaduras y se soldó a una longitud de traslape de 25.40 mm, los parámetros se eligieron utilizando como referencia investigaciones previas, el porcentaje de penetración se mide respecto al espesor de la lámina inferior (acero).

### C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-5 Parámetros de la primera etapa experimental. [4][51][55]

Tiempo de permanencia/ $T_p$ (s)	Velocidad de penetración/ $V_p$ (mm/min)	Frecuencia rotacional/ $F_r$ (rpm)	Penetración (%) en la lámina de acero
5	15	1854	10
			20
			30
		2359	10
			20
			30
		2836	10
			20
			30

#### 3.9.1.1 Resultados preliminares de la primera etapa experimental

Después de las primeras pruebas de soldaduras realizadas de acuerdo a los parámetros de la Tabla 3-5, se determinó que los porcentajes de penetración establecidos no eran adecuados ya que no se consiguió soldar ninguna lámina, además de que al aumentarse la penetración al 30 % del espesor de la lámina de acero la herramienta sufría un desgaste total.

En la Figura 3-32 a), se muestran las láminas después de realizarse los puntos de la unión, y en b) se muestra la herramienta donde se visualiza el desgaste sobre la superficie de contacto.

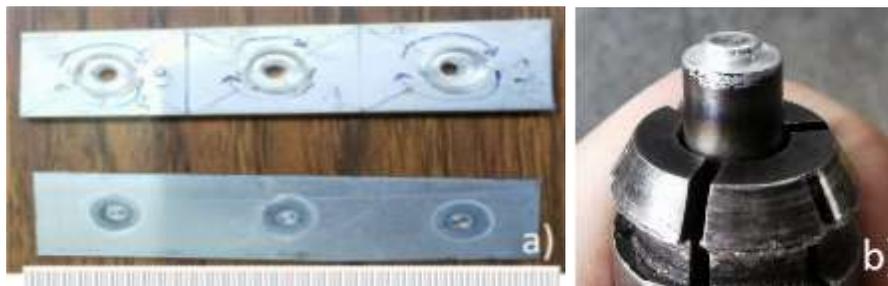


Figura 3-32 a) soldaduras fallidas, b) herramienta desgastada.

### C3: Materiales y metodología experimental

Después de la primera etapa experimental sin resultados se decidió ampliar la ventana de experimentación para solucionar los problemas que se observaron durante la realización de la primera etapa.

#### 3.9.2 Segunda etapa experimental

Con las conclusiones preliminares de la primera etapa experimental se procedió a una segunda etapa, en la Tabla 3-6 se muestran los parámetros de soldadura empleados de acuerdo a la segunda etapa experimental de tipo aleatorio, por cada combinación de condiciones se realizaron 4 soldaduras, manteniendo la longitud de traslape a 25.40 mm. Los parámetros se eligieron con base a los resultados de la primera etapa experimental, ampliando el tiempo de permanencia y el porcentaje de penetración.

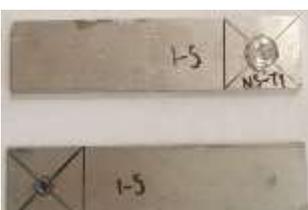
<b>T<sub>p</sub></b> <b>(s)</b>	<b>V<sub>p</sub></b> <b>(mm/min)</b>	<b>F<sub>r</sub></b> <b>(rpm)</b>	<b>Penetración (%) en la</b> <b>lámina de acero</b>
5, 15	15	1854, 2359, 2836	20, 30, 40

##### 3.9.2.1 Resultados preliminares de la segunda etapa experimental

De la segunda etapa experimental, se obtuvieron 15 uniones que se ensayaron en la máquina de tensión universal. En la Tabla 3-7 se presentan los resultados de las cargas obtenidas para las uniones. Como se observa en la Tabla 3-7, los resultados de las cargas son bajas (se resaltan las cargas superiores a 1 kN las cuales se soldaron a las frecuencias rotacionales de 2359 y 2836 rpm). Se determinó que el hombro no estaba generando suficiente fricción y calor en la superficie de aluminio; además, la herramienta siguió sufriendo una tasa alta de desgaste aunado a la adhesión de aluminio al perfil del pin, por lo que se decidió realizar una nueva etapa experimental para aumentar los resultados de la carga y solucionar los problemas que se encontraron en la segunda etapa experimental.

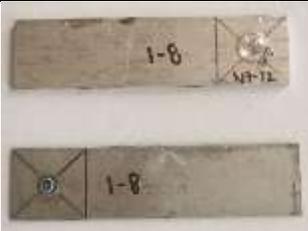
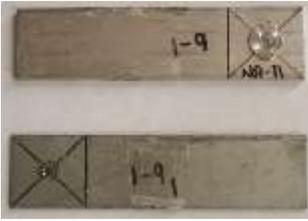
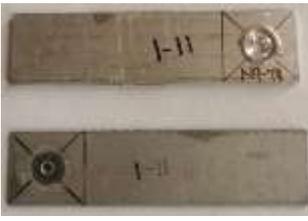
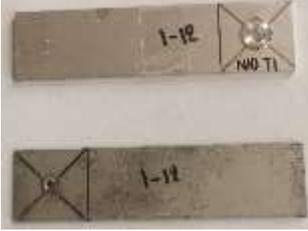
### C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-7 Resultados de los ensayos a tensión de la segunda etapa experimental.

No	T <sub>p</sub> (s)	Penetración (%) en lámina de acero	F <sub>r</sub> (rpm)	Carga máxima (kN)	Fractura	Herramienta
1	15	40	2836	1.3356		
2	15	40	2836	0.00112		
3	15	40	2836	0.16041		
4	5	40	1854	0.48897		
5	5	20	2359	0.01422		
6	5	30	2359	0.44313		

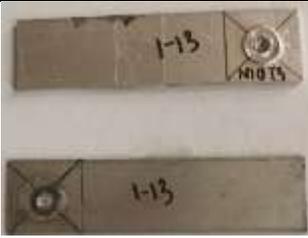
### C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-7 Resultados de los ensayos a tensión de la segunda etapa experimental.

No	T <sub>p</sub> (s)	Penetración (%) en lámina de acero	F <sub>r</sub> (rpm)	Carga máxima (kN)	Fractura	Herramienta
7	5	40	2359	0.41425		
8	5	40	2359	1.09444		
9	5	20	2836	0.34103		
10	5	30	2836	1.63550		
11	5	30	2836	0.03972		
12	5	40	2836	0.61872		

### C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-7 Resultados de los ensayos a tensión de la segunda etapa experimental.

No	T <sub>p</sub> (s)	Penetración (%) en lámina de acero	F <sub>r</sub> (rpm)	Carga máxima (kN)	Fractura	Herramienta
13	5	40	2836	0.01494		
14	5	99	2836	1.19969		
15	5	99	2836	1.29062		

#### 3.9.3 Tercera etapa experimental

Para el desarrollo de la tercera etapa experimental se siguieron los pasos de corte ya mencionados, la herramienta que se empleó fue de acuerdo con el diseño de herramienta dos, con el sistema de sujeción original; con los resultados obtenidos en la segunda etapa experimental se mantuvo la frecuencia rotacional constante a 2836 rpm y la longitud de traslape a 25.40 mm. En la Tabla 3-8 se muestran los parámetros empleados en este experimento, por cada condición se realizaron dos soldaduras.

### C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-8 Parámetros de la tercera etapa experimental.

Tiempo de permanencia (s)	Velocidad de penetración (mm/min)	Frecuencia rotacional (rpm)	Penetración (%) del hombro en lámina de aluminio
5	15	2836	20
			40
			60
			80

#### 3.9.3.1 Resultados preliminares de la tercera etapa experimental

Se obtuvieron seis uniones de las ocho esperadas debido a que al 20 % de penetración no se logró una unión. Fue posible ensayar a tensión las uniones a 40, 60 y 80 % de penetración en la máquina universal bajo los parámetros ya mencionados.

En la Tabla 3-9 se presentan los resultados de las cargas obtenidas para las uniones.

Tabla 3-9 Resultados de los ensayos a tensión del tercer diseño experimental.

Penetración (%) del hombro en Al	Carga (kN)	Fractura
20	-	-
40	0.1000	

C3: Materiales y metodología experimental

Tabla 3-9 Resultados de los ensayos a tensión del tercer diseño experimental.		
Penetración (%) del hombro en Al	Carga (kN)	Fractura
60	2.53437	
	0.22813	
	2.42812	
80	2.20281	
	1.90313	

De acuerdo con la Tabla 3-9, se logró aumentar las cargas obteniéndose valores mayores a 2 kN, la herramienta no sufrió desgaste visible, empero al entrar más el

### C3: Materiales y metodología experimental

hombro en el aluminio las láminas se deslizaron y distorsionaron durante el proceso como se observa en la Figura 3-33 por lo que se determinó que era necesario implementar un nuevo sistema de sujeción y se procedió a su fabricación como se mencionó en la sección 3.6 para realizar una nueva etapa experimental con el nuevo sistema de sujeción.



Figura 3-33 Tercera etapa experimental.

#### 3.9.4 Cuarta etapa experimental

Para la cuarta etapa experimental se estableció que la longitud de traslape de las láminas fuera de 50.80 mm. Por cada condición de parámetros se realizaron 6 pruebas, donde 4 se usaron como probetas para su ensayo a tensión y 2 se segmentaron para su análisis metalográfico, en la Figura 3-34 se observan las láminas colocadas en el sistema de sujeción listas para ser soldadas.



Figura 3-34 Sistema de sujeción.

Las soldaduras se realizaron en la fresadora vertical. En la Tabla 3-10 se presentan los parámetros de operación.

Tabla 3-10 Parámetros de la cuarta etapa experimental.

$T_p$ (s)	$V_p$ (mm/min)	$F_r$ (rpm)	Penetración (%) del hombro en la lámina de aluminio	Penetración del hombro en la lámina de aluminio (mm)
5	15	2836	50	1.5875
			60	1.9050
			70	2.2225
			80	2.5400
			90	2.8575

### 3.10 Preparación metalográfica de las uniones soldadas

Primeramente, para cada condición de prueba de soldadura se segmentaron con la electroerosionadora las dos pruebas destinadas para su análisis metalográfico en sentidos transversal (T) y longitudinal (L), como se observa en la Figura 3-35 a) y b) respectivamente.

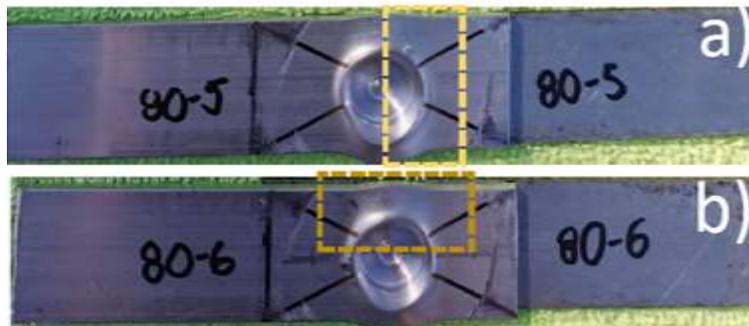


Figura 3-35 Secciones de corte a) sentido transversal, b) sentido longitudinal.

Estas pruebas fueron seccionadas en el área de soldadura obteniéndose segmentos de 25.40 mm de longitud y 12.7 mm de ancho con el fin de poder observar las zonas importantes en la soldadura por FSSW.

Enseguida, los cortes obtenidos se prepararon previo a su análisis metalográfico, la preparación consistió en los siguientes pasos: encapsulado, desbaste grueso y fino, pulido y ataque químico.

El encapsulado consistió en montar las muestras a analizar en un molde donde después se vació resina epóxica hasta cubrir la cara expuesta de la muestra, pasando por un proceso de curado de la resina por 24 h, en la Figura 3-36 se exhibe una imagen del encapsulado.



Figura 3-36 Encapsulado en frío de una muestra.

Una vez que la resina terminó de polimerizarse, se procedió a realizar los desbastes grueso y fino con el fin de eliminar la alta rugosidad derivada del corte, para ello se utilizaron lijas de carburo de silicio (100, 240, 400, 600 y 1200).

### C3: Materiales y metodología experimental

Después de finalizar el desbaste, las muestras pasaron por una etapa de pulido donde se logró que las muestras obtuvieran un acabado espejo, el pulido se realizó sobre un paño adherido a la pulidora a una frecuencia rotacional de 270 rpm, utilizando alúmina de  $0.3\ \mu\text{m}$  y sílica coloidal de  $0.05\ \mu\text{m}$ , en la Figura 3-37 se exhibe una muestra en la pulidora.



Figura 3-37 Proceso de pulido.

Finalmente, las muestras pasaron por un proceso de ataque químico haciendo reaccionar la superficie a analizar con un agente químico, en este caso se utilizó una solución acuosa de ácido fluorhídrico al 0.05 % por inmersión y frotación durante un tiempo aproximado de 2 minutos para evitar un sobreataque, como se observa en la Figura 3-38, con el que se revelaron aspectos microestructurales de las soldaduras, después de este tiempo las muestras se limpiaron y secaron minuciosamente para su análisis.



Figura 3-38 Ataque químico por inmersión.

Posterior a la preparación, las muestras se analizaron con microscopía óptica con el microscopio metalográfico, obteniéndose micrografías a diferentes aumentos.

### 3.11 Microdureza

Estas pruebas son ampliamente usadas para la caracterización de soldaduras debido a que es una medida de cómo el aporte térmico recibido durante el proceso modificó la microestructura de los materiales creando distintas zonas de soldadura y a su vez las propiedades mecánicas como la resistencia y ductilidad.

Una vez que se terminó con la captura de micrografías las muestras fueron llevadas directamente al microdurómetro ya que no requirieron de alguna preparación extra a la preparación metalográfica.

Se realizaron tres perfiles de microdurezas de manera lineal por cada una de las muestras. El perfil 1 se realizó a 250  $\mu\text{m}$  por encima de la superficie del aluminio, el perfil 2 se realizó a 250  $\mu\text{m}$  por debajo de donde se encuentra la base del hombro de la herramienta y el perfil 3 se realizó 250  $\mu\text{m}$  por debajo de la parte superior de la lámina de aluminio, la distancia entre las indentaciones fue de 400  $\mu\text{m}$  en los tres perfiles. En la Figura 3-39 se muestra la distribución de los perfiles, el centro de la muestra es el origen de las indentaciones (señalado por el "0"), indicando una dirección positiva hacia la derecha y una dirección negativa hacia la izquierda del origen.

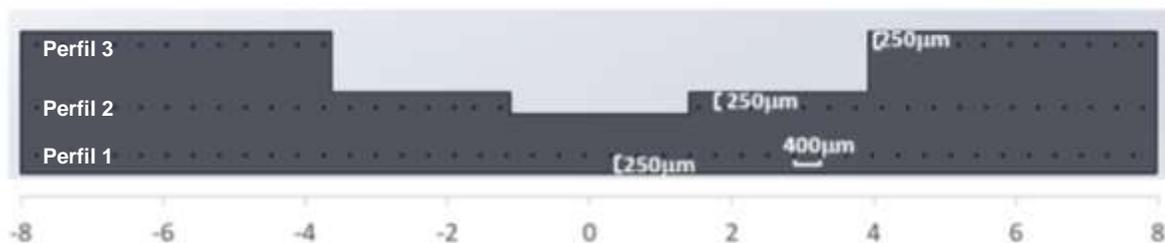


Figura 3-39 Distribución de las indentaciones en sección transversal de la microdureza en los tres perfiles distintos alrededor de la huella de la herramienta "keyhole".

### 3.12 Ensayo de tensión uniaxial cortante

Se realizaron ensayos de tensión uniaxial cortante a las uniones con el fin de conocer cuál es su resistencia a la tensión, cuatro ensayos por cada una de las condiciones bajo las que se soldó.

No fue necesaria una preparación previa a los ensayos de tensión, una vez que se obtuvieron las probetas designadas para la evaluación de capacidad de carga, se adecuó una calza en la lámina de acero para igualar los espesores de las láminas disímiles y evitar añadir torsión a las pruebas.

Se capturaron imágenes de la superficie de fractura tanto en las láminas de aluminio como en las de acero después de su ensayo a tensión y se midió el área aparente de fractura en la lámina de acero (zona clara brillante) por el método de malla de puntos.

## 4 Análisis y discusión de resultados

### 4.1 Macroestructura de las uniones

#### 4.1.1 Aspecto geométrico sentido transversal

De la Figura 4-1 a la Figura 4-5 se muestran las macrografías de las uniones a los diferentes porcentajes de penetración de la herramienta en el sentido transversal, en la Figura 4-1 se identifican los aspectos importantes de la macrografía de las uniones en manera representativa para los demás porcentajes de soldadura y se explican a continuación. Es notable que la macroestructura es simétrica al ser solo un punto de soldadura, se observa una alta deformación plástica en la parte superior e inferior de las láminas de aluminio, la lámina de acero no presentó ninguna deformación al no haber sido penetrada por la herramienta por lo que no se realizó su análisis.

En todos los casos la soldadura presenta la forma de “cuenca” debido a que el proceso toma parte principalmente en la lámina superior [25].

Hacia el centro de la muestra se encuentra el “keyhole”, que es la huella que se forma en la lámina superior después de la penetración de la herramienta, así mismo este keyhole se encuentra formado por la penetración del hombro, con una longitud igual al diámetro del hombro de la herramienta (12 mm) y por la penetración del pin, de longitud igual al diámetro del pin de la herramienta.

En la parte superior de la lámina se observa desplazamiento de material que según estudios se ha encontrado que al penetrar la herramienta en las láminas el material bajo el hombro se desplaza hacia el pin para después ser extruido a la parte inferior del pin y se expulsa hacia arriba [25].

Para la penetración de 50 % se observa que la zona central (zona de agitación) no llega hacia la superficie de la lámina como lo hace en las demás penetraciones, lo cual indica que al aumentar la penetración de la herramienta la extensión de la zona de agitación se incrementó también.

#### C4: Análisis y discusión de resultados

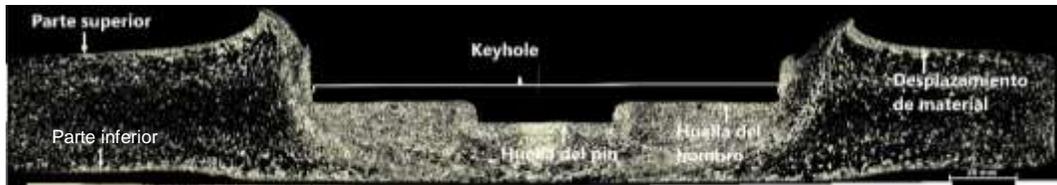


Figura 4-1 Macrografía en sentido transversal a 50 % de penetración.

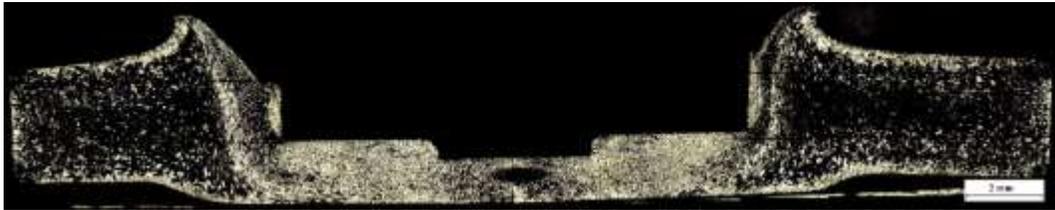


Figura 4-2 Macrografía en sentido transversal a 60 % de penetración.



Figura 4-3 Macrografía en sentido transversal a 70 % de penetración.

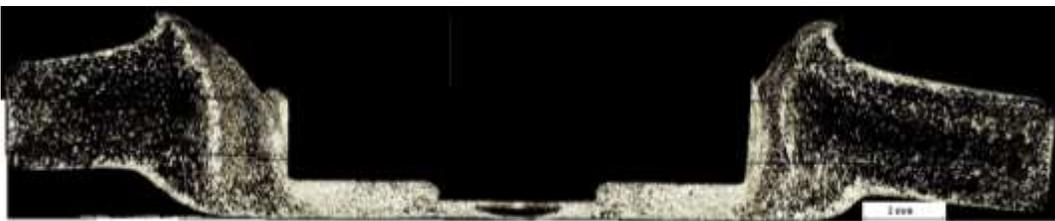


Figura 4-4 Macrografía en sentido transversal a 80 % de penetración.

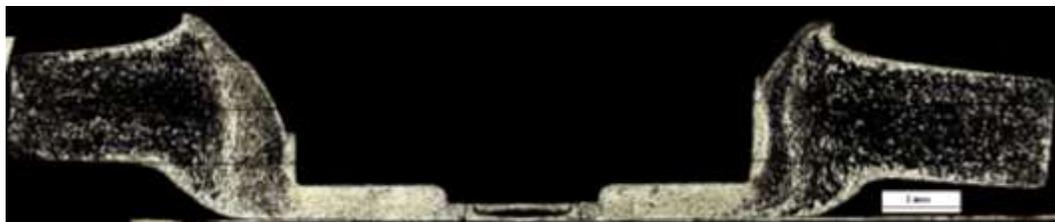


Figura 4-5 Macrografía en sentido transversal a 90 % de penetración.

#### C4: Análisis y discusión de resultados

Se midieron las penetraciones del hombro en la lámina de aluminio en las imágenes anteriores con apoyo del software mencionado en el epígrafe 3.3, en la Figura 4-6 se muestra un gráfico del espesor de la lámina de aluminio contra el porcentaje de las muestras, graficando la penetración nominal (penetración establecida) y penetración medida (penetración real), se observa una consistencia entre la penetración medida y la penetración nominal, resultando en todos los casos una penetración medida superior a la penetración nominal, exceptuando el porcentaje de 50, en donde se mantuvo por debajo de la penetración nominal.

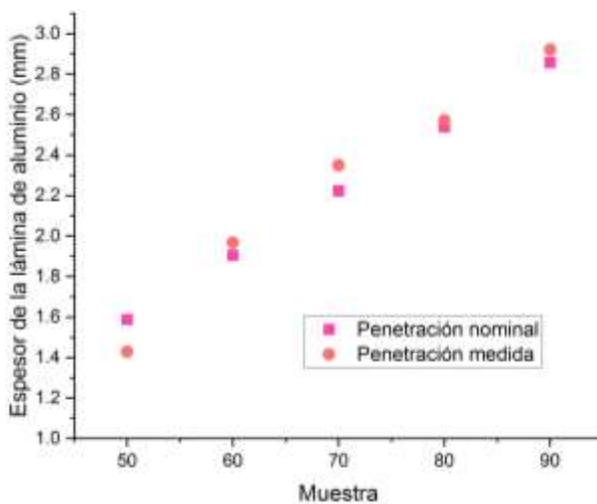


Figura 4-6 Comparación entre penetración nominal y penetración medida en sentido transversal.

#### 4.1.2 Aspecto geométrico sentido longitudinal

En la Figura 4-7 a la Figura 4-11, se presentan las macrografías de las uniones en sentido longitudinal.

En general, la geometría de la soldadura en el sentido longitudinal es comparable respecto al sentido transversal. Sin embargo, la deformación plástica aparente en el sentido longitudinal es menor en comparación al sentido transversal; esto es debido al sistema de sujeción, ya que existe una mayor restricción de las láminas en el sentido longitudinal, por lo que el flujo plástico es mayor hacia el sentido transversal.

#### C4: Análisis y discusión de resultados



Figura 4-7 Macrografía en sentido longitudinal a 50 % de penetración.

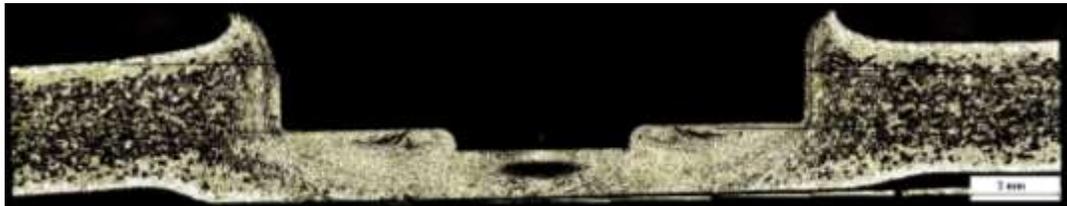


Figura 4-8 Macrografía en sentido longitudinal a 60 % de penetración.

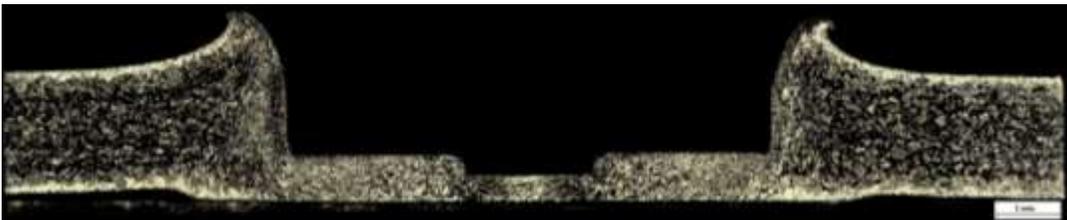


Figura 4-9 Macrografía en sentido longitudinal a 70 % de penetración.



Figura 4-10 Macrografía en sentido longitudinal a 80 % de penetración.



Figura 4-11 Macrografía en sentido longitudinal a 90 % de penetración.

#### C4: Análisis y discusión de resultados

Para las macrografías en sentido longitudinal también se realizó la medición de las penetraciones como se mencionó anteriormente y de igual forma se precisó que las penetraciones medidas son cercanas a las penetraciones nominales, siendo las más consistentes al 80 % de penetración, en el gráfico de la Figura 4-12 se muestran los resultados de las penetraciones medidas.

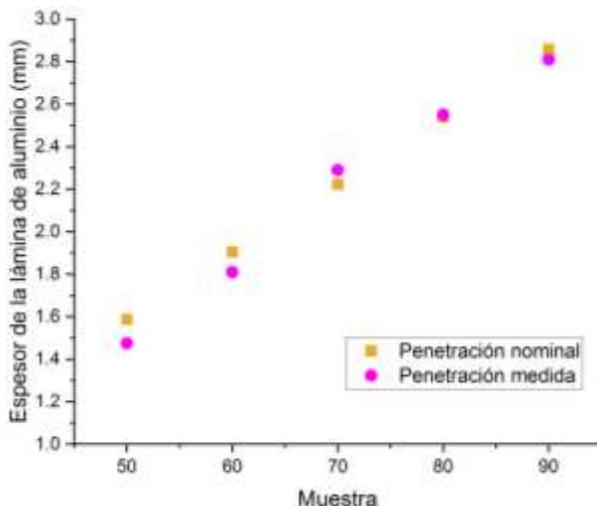


Figura 4-12 Comparación entre penetración nominal y penetración medida en sentido longitudinal.

#### 4.2 Análisis microestructural

En la Figura 4-13 se muestra una macroestructura representativa de las diferentes zonas de la soldadura v.gr. Zona de Agitación (ZA), *Zona Afectada Termo-Mecánicamente (ZATM)*, *Zona Afectada por el Calor (ZAC)*.

En la comparación de las macrografías en ambos sentidos (T y L) es notoria la mayor extensión de las diferentes zonas de soldadura para las muestras en sentido transversal que para el sentido longitudinal, esto también por los puntos de restricción de deformación y desplazamiento que se impusieron por el sistema de sujeción.

A continuación, se describen las microestructuras en cada una de las zonas de soldadura, como se puede observar, las microestructuras en cada zona son comparables independientemente de la penetración y del sentido del corte, por lo que a continuación se realiza una descripción de las mismas para cada una de las zonas de soldadura.

#### C4: Análisis y discusión de resultados

##### *Zona de Agitación (ZA):*

Debido a la alta deformación plástica y el calor generado durante el proceso se observa en la zona de agitación una microestructura de granos finos y equiaxiales y una evidente recristalización dinámica [33]. En la zona de agitación se distinguen dos subzonas las cuales se han identificado como zona de agitación de grano grueso (ZAG) y zona de agitación de grano fino (ZAF). La ZAG se observa hacia el centro de la soldadura cercano al keyhole del pin y la ZAF se localiza hacia el final de donde se encontró posicionado el hombro de la herramienta; esta diferencia entre tamaños de grano se debe a la diferente tasa de recristalización.

##### *Zona Afectada Termo-Mecánicamente (ZATM):*

En la zona consecuente de la ZA se encuentra la ZATM, se distinguen granos gruesos y alargados debido a las altas velocidades de giro de la herramienta y la deformación plástica, es la zona donde la deformación es más evidente, en esta zona no se observa que exista recristalización[33].

##### *Zona Afectada por el Calor (ZAC):*

En la periferia de la ZATM se encuentra la ZAC, que es una zona que no sufrió deformación plástica, pero experimentó cambios por el calor generado por la fricción de la herramienta con la lámina, la microestructura es más similar en tamaño y forma a la del metal base, los granos son equiaxiales, debido a que la temperatura alcanzada excede la temperatura solvus también existe presencia de precipitados.

Se observó que para la penetración de 90 % en sentido transversal los granos de la zona afectada por el calor también se encuentran ligeramente alargados.

#### C4: Análisis y discusión de resultados



Figura 4-13 Zonas de soldadura.

En la Figura 4-14 y Figura 4-15 se detalla la microestructura de las diferentes zonas a 100 y 200 x para las soldaduras al 50 % de penetración en sentido transversal y longitudinal respectivamente, esto en manera representativa para la microestructura a los demás porcentajes de penetración debido a que no se encontraron diferencias significativas entre las muestras, en la Figura 8-1 a la Figura 8-4 ubicadas en el Apéndice A del epígrafe 8.1.1 se muestran las microestructuras para los porcentajes de penetración del 60 – 90 % en sentido transversal, en la Figura 8-5 a la Figura 8-8 en el epígrafe 8.1.2 de igual forma se presentan las microestructuras en sentido longitudinal para las muestras del 60 – 90 % de penetración.

#### 4.2.1 Sentido transversal

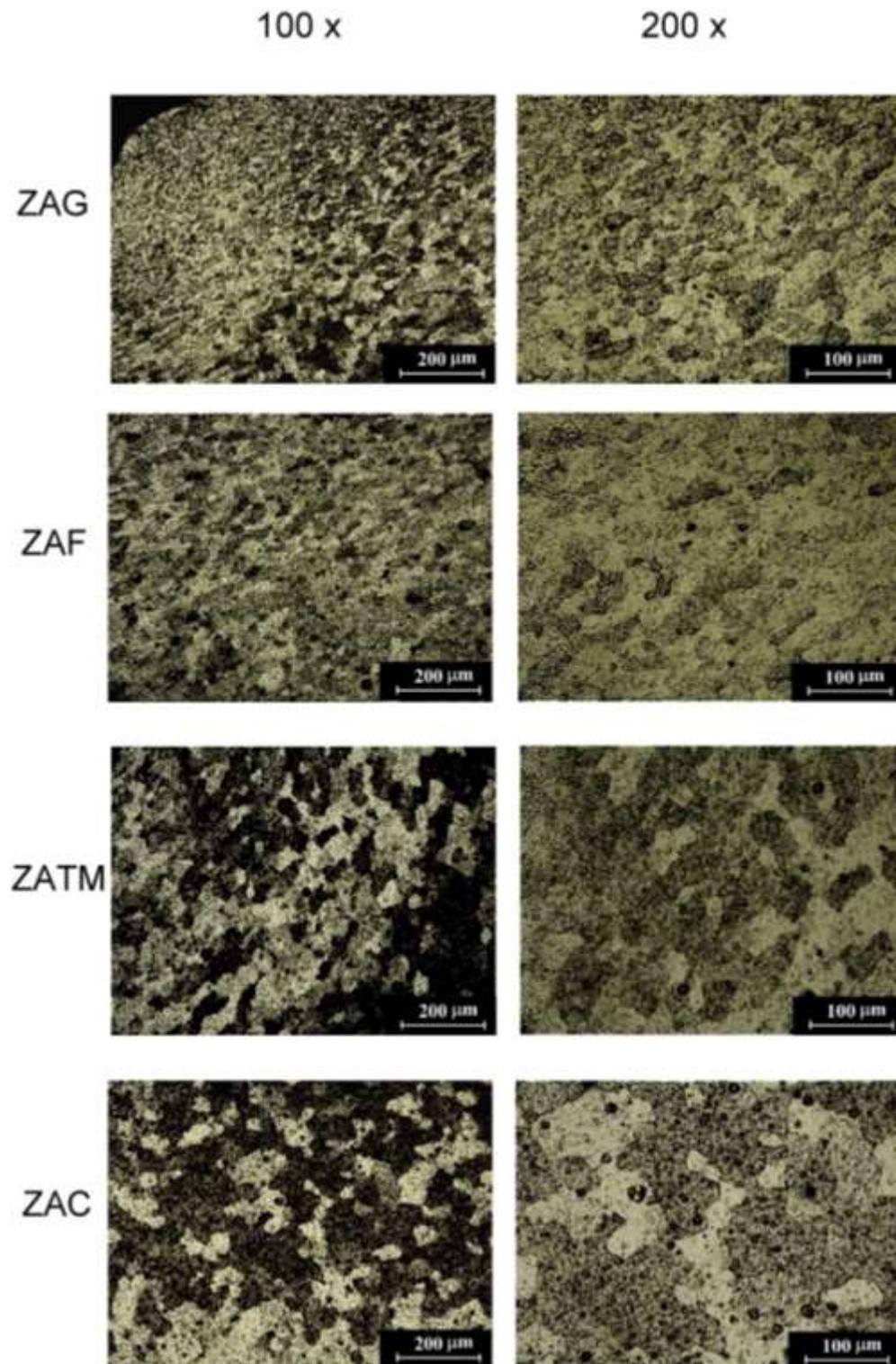


Figura 4-14 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 50 % de penetración en sentido transversal.

#### 4.2.2 Sentido longitudinal

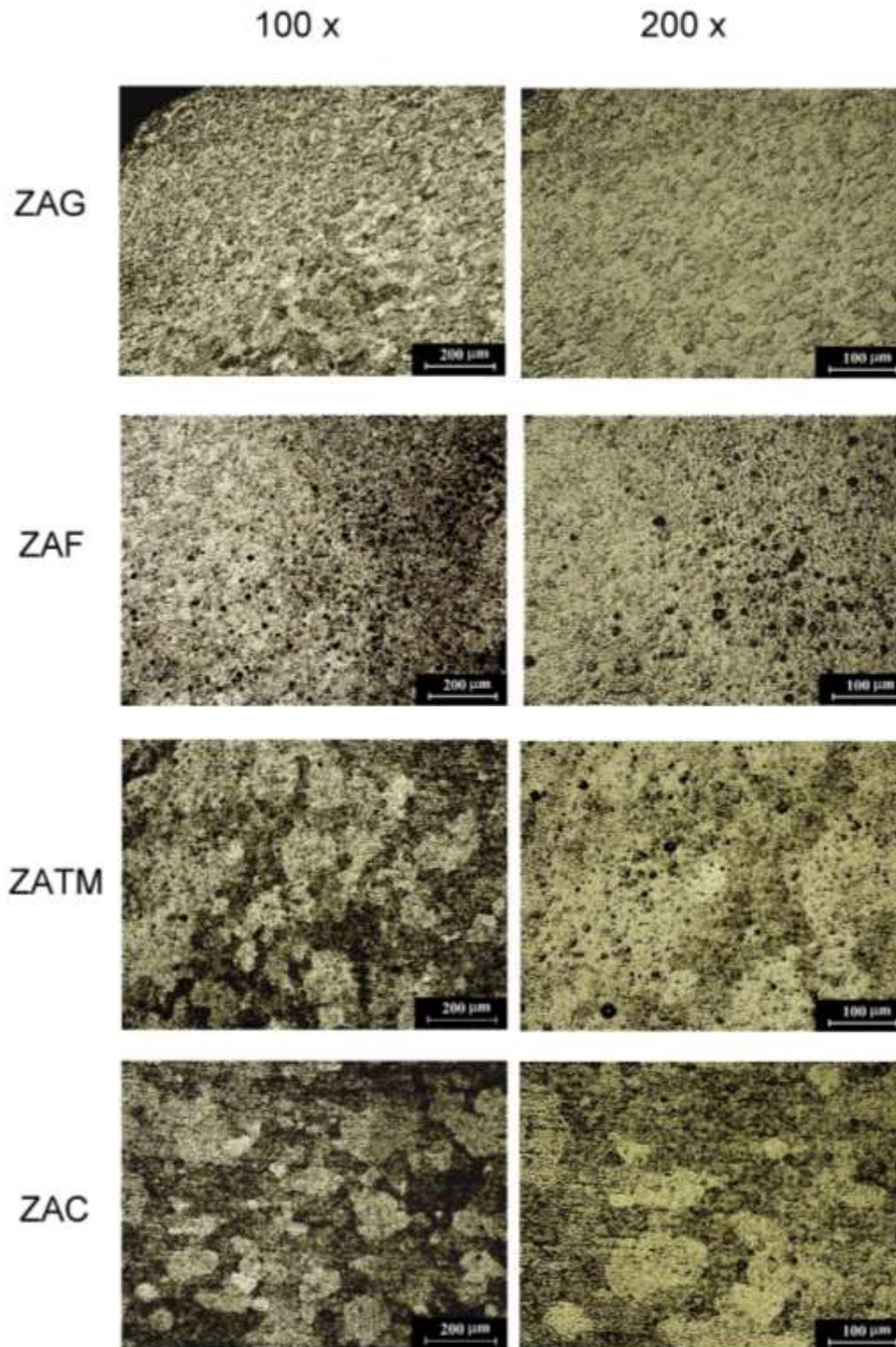


Figura 4-15 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 50 % de penetración en sentido longitudinal.

### 4.3 Microdureza

#### 4.3.1 Sentido transversal

En la Figura 4-16 se muestra la distribución de los perfiles de microdureza que se realizaron.

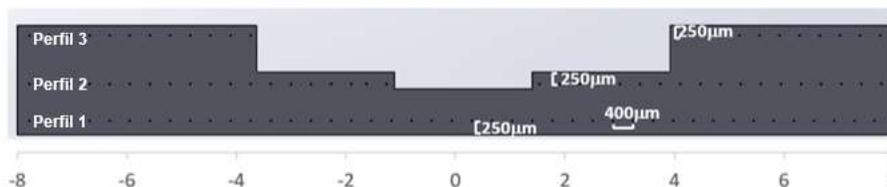


Figura 4-16 Perfiles de microdureza.

En la Figura 4-17 se presentan los resultados de los tres perfiles de microdureza mencionadas en el epígrafe 3.11 para las muestras en sentido transversal.

En el análisis de los gráficos se observa que los tres perfiles de microdureza tienen resultados similares, en un rango entre 40 y 60 HV. En comparación con el promedio de microdureza del metal base (75 HV) se percibe que hubo un reblandecimiento en la lámina del aluminio, contrario a un esperado endurecimiento por trabajado mecánico como ocurriría con las aleaciones de la serie 5XXX [40], coincidiendo con la literatura, Shen et al. [25], donde mencionan que las mediciones de microdureza para las soldaduras por FSSW depende en gran medida de las condiciones iniciales de la aleación, la aleación AA6063-T6 se considera una aleación tratable térmicamente (endurecida por precipitación) y es sensible a la generación de calor de la herramienta, la microdureza se ve influenciada por la fase, tamaño y distribución de precipitados, por lo que el proceso FSSW generará una soldadura reblandecida debido al engrosamiento o disolución de los precipitados durante el proceso FSSW, por lo que se intuye que la transferencia de calor tiene influencia considerable en las propiedades mecánicas de las uniones.

C4: Análisis y discusión de resultados

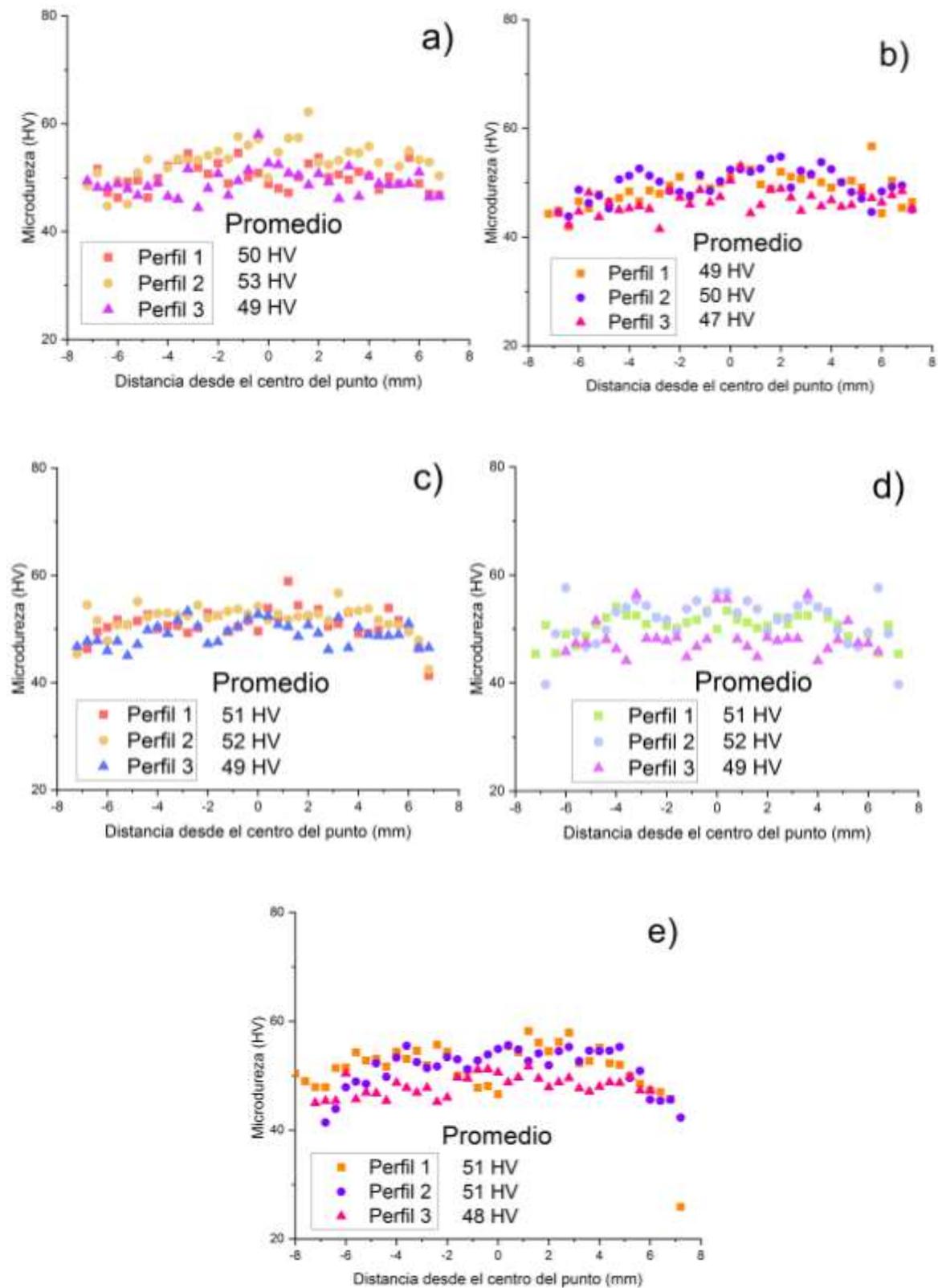


Figura 4-17 Resultados de microdureza en sentido transversal: a) 50 %, b) 60 %, c) 70 %, d) 80 %, e) 90 % de penetración.

### 4.3.2 Sentido longitudinal

La Figura 4-18 muestra los resultados de las mediciones de microdureza en sentido longitudinal, los resultados son similares para las penetraciones en este sentido, además son comparables a los obtenidos en sentido transversal, existe un reblandecimiento respecto al metal base, este es un comportamiento esperado para las aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación ya que la zona del punto de soldadura está caracterizada por la disolución y crecimiento de estos precipitados, como ratifica Sato et al. [56]. En los resultados de microdureza para la penetración de 50 %, el perfil 2 (mayor proporción de área de recristalización) arrojó valores de dureza ligeramente más altos en comparación con las muestras de mayor penetración, esto se debe a que, al haber menor penetración de la herramienta, hay menor fricción y por lo tanto hay una disminución en la generación de calor respecto a mayores porcentajes, de esta manera la homogenización de los precipitados tiene un menor efecto, de acuerdo a investigaciones anteriores de simulaciones del proceso FSSW para aleaciones de aluminio de la serie 6XXX, al entrar en contacto el hombro de la herramienta con la superficie de aluminio esta alcanza una temperatura aproximada de 450 °C [57], en el análisis del diagrama de fase de aluminio-magnesio-silicio a temperaturas menores se da la formación de algunos compuestos como  $Al_{12}Mg_{17}$  a 437 °C y  $Al_3Mg_2$  a 450 °C [58], sin embargo la temperatura de solubilización para la aleación 6063 es 520 °C [59].

C4: Análisis y discusión de resultados

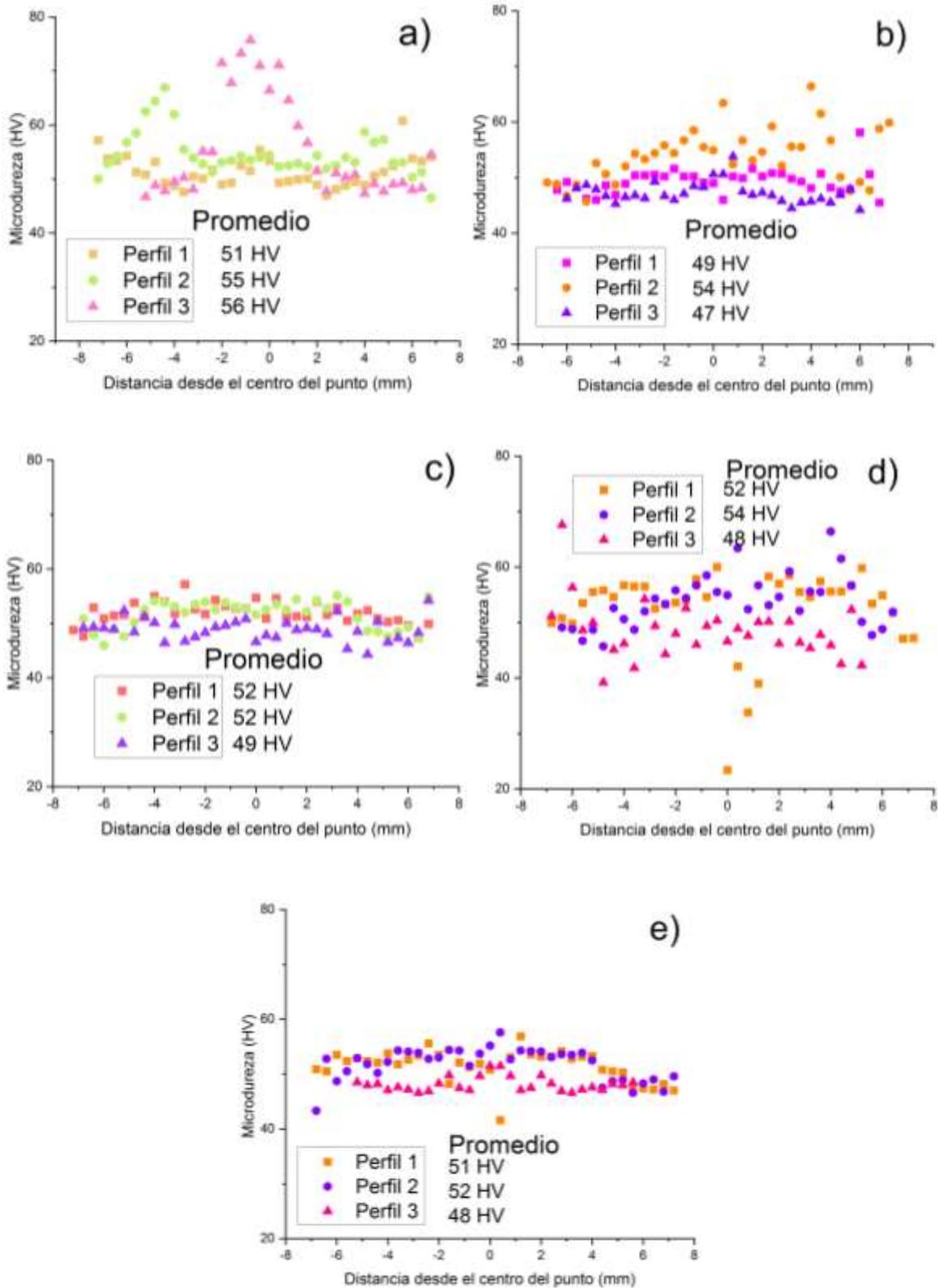


Figura 4-18 Resultados de microdureza en sentido longitudinal: a) 50 %, b) 60 %, c) 70 %, d) 80 %, e) 90 %.

#### 4.4 Fractura de las uniones ensayadas

En las Tabla 4-1 - Tabla 4-5 se exhiben las imágenes de la superficie de fractura aparente de las uniones después de su ensayo a tensión, se tienen imágenes positiva y negativa (correspondientes a las láminas de aluminio y acero respectivamente). En las imágenes de la Tabla 4-1 para las probetas de 50 % de penetración prácticamente no se observan zonas claras brillantes, por lo que se infiere que no hay unión consolidada.

Tabla 4-1 Fractura aparente de las uniones a 50 % de penetración.

Identificación	Aluminio	Acero	Área aparente de fractura
50-1			2.26 %
50-2			0.75 %
50-3			0
50-4			0

C4: Análisis y discusión de resultados

En las imágenes de la Tabla 4-2 para la penetración de 60 % se observa un incremento en el área de las zonas claras brillantes, aunque no son continuas, la unión comienza a consolidarse a partir de este porcentaje de penetración, hacia la izquierda de la lámina de aluminio se observa rebaba remanente del proceso de FSSW.

Tabla 4-2 Fractura aparente de las uniones a 60 % de penetración.

Identificación	Aluminio	Acero	Área aparente de fractura
60-1			46.24 %
60-2			27.44 %
60-3			9.77 %
60-4			8.27 %

#### C4: Análisis y discusión de resultados

En la Tabla 4-3 se muestran las fracturas aparentes de las probetas al 70 % de penetración, en la lámina de acero se observa una zona continua clara brillante por lo que se infiere que a partir de este porcentaje de penetración la unión está consolidada, en las periferias del punto se encuentra rebaba derivada del proceso FSSW.

Tabla 4-3 Fractura aparente de las uniones a 70 % de penetración.

Identificación	Aluminio	Acero	Área aparente de fractura
70-1			68.79 %
70-2			71.42 %
70-3			31.57 %
70-4			46.99 %

#### C4: Análisis y discusión de resultados

En la Tabla 4-4 se exhiben las imágenes de las fracturas aparentes para las probetas a 80 % de penetración, en el contorno del punto en la lámina de acero se observan zonas claras brillantes correspondientes al área aparente de fractura, de igual forma se percibe rebaba de material en la circunferencia de ambas láminas.

Tabla 4-4 Fractura aparente de las uniones a 80 % de penetración.

Identificación	Aluminio	Acero	Área aparente de fractura
80-1			7.89 %
80-2			6.39 %
80-3			27.81 %
80-4			31.57 %

#### C4: Análisis y discusión de resultados

En las imágenes de la Tabla 4-5 correspondientes a las fracturas aparentes al 90 % de penetración se observan zonas claras brillantes prácticamente continuas en todo el diámetro correspondiente a la penetración del hombro de la herramienta, el área aparente de fractura más alto es para la probeta 90-1 con un área de 80.45 %, a diferencia de las de las imágenes anteriores al 90 % se visualiza en ambas láminas una especie de dona hacia el centro del punto.

Tabla 4-5 Fractura aparente de las uniones a 90 % de penetración.

Identificación	Aluminio	Acero	Área aparente de fractura
90-1			80.45 %
90-2			66.92 %
90-3			70.68 %
90-4			47.36 %

#### C4: Análisis y discusión de resultados

De acuerdo al análisis de las imágenes de la fractura se observa en algunos casos fractura interfacial y una combinación entre fractura interfacial y fractura por delaminación.

#### 4.5 Capacidades de carga

Los resultados de las capacidades de carga son los resultados de mayor interés para el presente proyecto de investigación dado que las variaciones en las cargas se cuantifican para fines de la medición de la eficiencia de la soldadura, es decir, indican la resistencia que tendrán las uniones, la cual depende del área real de unión.

En la Figura 4-19 se muestran los resultados de los ensayos de tensión uniaxial cortante. De acuerdo al gráfico se observa que la menor capacidad de carga fue para el 50 % de penetración del hombro en el aluminio, con un promedio de 0.18906 kN, con la desviación estándar más baja, para el 60 % de penetración se obtuvieron cargas medias con un promedio de 2.33516 kN, para los porcentajes de penetración de 70, 80 y 90 % se obtuvieron las mayores cargas con promedios superiores a los 3 kN.

De acuerdo a las mediciones de área de fractura aparentes de la sección anterior se observa que a mayores porcentajes de penetración hay mayor área de fractura aparente las cuales coinciden con los resultados de capacidades de carga, es decir, para 50 y 60 % de penetración, donde no hay una unión consolidada, las cargas resultantes son relativamente más bajas, en comparación con penetraciones arriba del 70 % en donde las áreas aparentes de fractura son mayores las cargas son también mayores.

#### C4: Análisis y discusión de resultados

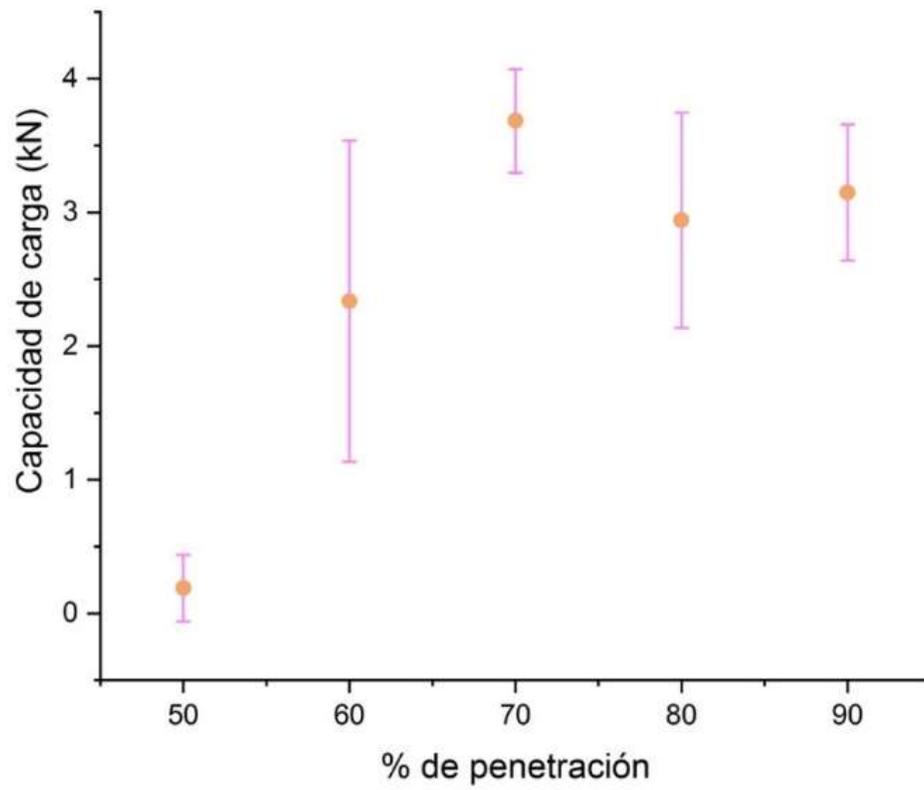


Figura 4-19 Resultados de los ensayos de tensión uniaxial cortante.

## 5 Conclusiones

1. La soldadura por fricción de una aleación de aluminio AA6063-T6 con un acero DP-780 fue realizada de manera exitosa con una herramienta diseñada, fabricada y tratada térmicamente a partir de acero AISI/SAE-H13.
2. Se realizaron cuatro diseños experimentales preliminares de los cuales se dedujo que los parámetros: a) penetración del hombro, b) las revoluciones de giro de la herramienta y c) el sistema de sujeción eran aspectos fundamentales para consolidar las uniones disímiles.
3. Se diseñó y fabricó un sistema eficiente de sujeción que permite tener un flujo de la deformación plástica del material en el sentido transversal y una restricción de la deformación en el sentido longitudinal.
4. Los resultados de la metalografía confirman que la deformación plástica es mayor en la orientación transversal, adicionalmente, se observa que a mayor penetración de la herramienta la extensión de las diferentes zonas de soldadura es mayor.
5. El resultado del análisis microestructural indica un gradiente de recristalización en la lámina de aluminio, (justo debajo del hombro de la herramienta), resultando en granos recristalizados finos en la zona de contacto donde la herramienta tiene mayor velocidad tangencial.
6. En la zona afectada termo-mecánicamente del aluminio se observa de manera consistente granos alargados altamente deformados, mientras que en la zona afectada por el calor los granos tienen una geometría más equiaxial, en comparación con el metal base AA6063-T6- en donde los granos son elongados en el sentido de la laminación.
7. Los resultados de microdureza indican valores consistentes alrededor de la unión en un rango de 40-60 HV, no hay una diferencia contundente entre los sentidos de análisis de las muestras (transversal y longitudinal) ni entre los diferentes porcentajes de penetración.

## C5: Conclusiones

8. Las mediciones de la microdureza arrojaron un suavizamiento alrededor de la unión con respecto al AA6063-T6, debido al calor generado por la herramienta, la subsecuente recristalización, y la posible disminución de los precipitados.
9. El área de fractura aparente tiende a ser mayor para mayores penetraciones de la herramienta, siendo el mecanismo predominante la falla interfacial.
10. De los resultados de ensayos a tensión se concluye que se tuvieron capacidades de carga aceptables (superiores a 3 kN) a partir del 70 % de penetración.

## 6 Trabajo a futuro

- Con los resultados obtenidos se determinó que el centrado de la herramienta era un factor que debe ser considerado más importante, ya que juega un papel importante en la distribución de la deformación de las láminas. Es importante buscar la forma de calibrar de una manera no manual para que este centrado no dependa de la visión de la persona que calibra.
- Se debe investigar cómo cambian las propiedades de la unión con un cambio en el diámetro del hombro, haciendo experimentos con un diámetro de 11 y 10 mm.
- Se debe hacer un análisis más fino de las soldaduras en relación a la generación de la capa de compuestos intermetálicos (la composición, espesor y extensión de la misma) para saber qué papel juega en la resistencia de las uniones por medio de microscopía electrónica de barrido.
- Se debe evaluar el área real de unión mediante análisis de ensayos no destructivos por ultrasonido o rayos X.

## 7 Referencias

- [1] S. H. Chowdhury, D. Chen, S. D. Bhole, X. Cao, and P. Wanjara, “Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 556, pp. 500–509, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.07.019.
- [2] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, “Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-steel joints,” *Procedia Materials Science*, vol. 9, pp. 504–513, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.05.023>.
- [3] Y. C. Chen, A. Gholinia, and P. B. Prangnell, “Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 134, no. 1, pp. 459–463, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.03.017>.
- [4] K. Chen, X. Liu, and J. Ni, “Effects of Process Parameters on Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High-Strength Steel,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, Mar. 2017, doi: 10.1115/1.4036225.
- [5] J. Piccini and H. Svoboda, “Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26, pp. 142–154, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.004.
- [6] F. King, *El aluminio y sus aleaciones*. Ciudad de Mexico, 1992.
- [7] J. R. Kissell, S. G. Pantelakis, and G. N. Haidemenopoulos, “Aluminum and Aluminum Alloys,” in *Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [8] W. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté, 2004.
- [9] E. Georgantzia, M. Gkantou, and G. S. Kamaris, “Aluminium alloys as structural material: A review of research,” *Engineering Structures*, vol. 227.

## C7: Referencias

- Elsevier Ltd, p. 111372, Jan. 15, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372.
- [10] J. A. Islas-Mascareñas, “Estudio de aleación de aluminio reforzada con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2013.
- [11] P. K. Mallick, *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. 2010.
- [12] W. S. Miller *et al.*, “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 280, no. 1, pp. 37–49, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X).
- [13] UACJ, “Aluminum Alloy Sheets for Automobile Panels.” <https://www.uacj.co.jp/english/products/sheeting/aas-panel.htm>.
- [14] C. D. Horvath, “Advanced steels for lightweight automotive structures,” in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Elsevier Ltd., 2010, pp. 35–78.
- [15] M. Shome and M. Tumuluru, “Introduction to welding and joining of advanced high-strength steels (AHSS),” in *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, Elsevier Inc., 2015, pp. 1–8.
- [16] T. B. Hilditch, T. de Souza, and P. D. Hodgson, “Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS),” in *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, Elsevier Inc., 2015, pp. 9–28.
- [17] Y. L. Kang, Q. H. Han, X. M. Zhao, and M. H. Cai, “Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanisms of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium,” *Materials and Design*, vol. 44, pp. 331–339, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.068.
- [18] C. D. Horvath, “Advanced steels for lightweight automotive structures,” in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Elsevier Ltd., 2010, pp. 35–78.
- [19] K. Kaviyaran, J. Pradheep Kumar, S. Karthik Anandh, M. Sivavishnu, and S. Gokul, “Comparison of mechanical properties of Al6063 alloy with ceramic

## C7: Referencias

- particles,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2019, vol. 22, pp. 3067–3074, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.442.
- [20] R. G. Davies, “Influence of martensite composition and content on the properties of dual phase steels,” *Metall Mater Trans A*, pp. 671–679, 1978, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02659924>.
- [21] V. H. López Cortés, “Soldabilidad de aceros avanzados de alta resistencia AHSS tipo martensíticos mediante soldadura de puntos por resistencia RSW en componentes automotrices,” COMIMSA, 2009.
- [22] M. Newsroom, “Mazda Develops World’s First Steel and Aluminum Joining Technology Using Friction Heat,” 2005. <https://newsroom.mazda.com/en/publicity/release/2005/200506/050602.html>.
- [23] R. Hancock, “Friction welding of aluminum cuts energy costs by 99%,” *Welding Journal*, vol. 83, no. 40–45, 2004.
- [24] A. E. T. Mubiayi M.P., “An Overview on Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Materials,” in *Transactions on Engineering Technologies*, Springer, Ed. 2015, pp. 537–549.
- [25] Z. Shen, Y. Ding, and A. P. Gerlich, “Advances in friction stir spot welding,” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 45, no. 6, pp. 457–534, Nov. 2020, doi: 10.1080/10408436.2019.1671799.
- [26] R. Mishra, P. De, and N. Kumar, *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. 2014.
- [27] F. A. et al. García-Castillo, “Evolución Microestructural en Uniones de la Aleación Ti-6Al-4V Mediante el Proceso de Soldadura de Punto por Fricción-agitación,” *Soldag. insp.*, vol. 21, pp. 185–196, 2016.
- [28] R. Rodríguez *et al.*, “Microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir spot welded rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy sheets,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 618, pp. 637–644, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.msea.2014.09.010.
- [29] P. Su, A. Gerlich, T. North, and G. Bendzsak, “Energy utilisation and generation during friction stir spot welding,” *Science and Technology of*

## C7: Referencias

- Welding & Joining*, vol. 11, pp. 163–169, Mar. 2006, doi: 10.1179/174329306X84373.
- [30] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 50, no. 1–2. Elsevier, pp. 1–78, Aug. 31, 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [31] TWI, “The Welding Institute.” <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/friction-welding/friction-stir-welding/benefits-and-advantages>.
- [32] M. Uddin and N. Sharmin, *Mechanical Properties of Similar and Dissimilar Weld-bonded Materials*. 2016.
- [33] R. S. et al Mishra, *Friction Stir Welding and Processing*. 2014.
- [34] P. Asadi, K. Kazemi-Choobi, and A. Elhami, “Welding of Magnesium Alloys,” 2012, pp. 121–158.
- [35] H. Badarinarayan, Q. Yang, and S. Zhu, “Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 142–148, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.09.004.
- [36] S. R N, “Effect of FSW Parameters on Hook formation, Microstructure and Fracture Strength of Al, Mg alloys,” *IJEDR*, vol. 5, Jun. 2017.
- [37] E. T. Akinlabi, K. O. Sanusi, E. Muzenda, and S. A. Akinlabi, “Material behaviour characterization of Friction Stir Spot Welding of Copper,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 166–177, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.010>.
- [38] M.-K. Besharati-Givi and P. Asadi, *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*. Woodhead Publishing, 2014.
- [39] Norman. Bailey, *Welding dissimilar metals*. Welding Institute, 1986.
- [40] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, “Effect of the Tool Penetration Depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Dissimilar Aluminum Alloys,” *Procedia Materials Science*, vol. 8, pp. 868–877, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.147>.

## C7: Referencias

- [41] S. Manickam, C. Rajendran, and V. Balasubramanian, "Investigation of FSSW parameters on shear fracture load of AA6061 and copper alloy joints," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04077, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04077>.
- [42] K. K. Ravi, R. G. Narayanan, and P. K. Rana, "Friction Stir Spot Welding of Al6082-T6/HDPE/Al6082-T6/HDPE/Al6082-T6 sandwich sheets: hook formation and lap shear test performance," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 615–622, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.05.011>.
- [43] H. Okamoto, M. E. Schlesinger, and E. M. Mueller, *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*. 1992.
- [44] K. TANAKA, M. KUMAGAI, and H. YOSHIDA, "Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheets by friction stir spot welding," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 56, no. 6, pp. 317–322, 2006, doi: [10.2464/jilm.56.317](https://doi.org/10.2464/jilm.56.317).
- [45] M. Haghshenas, A. Abdel-Gwad, A. M. Omran, B. Gökçe, S. Sahraeinejad, and A. P. Gerlich, "Friction stir weld assisted diffusion bonding of 5754 aluminum alloy to coated high strength steels," *Materials & Design*, vol. 55, pp. 442–449, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.013>.
- [46] C. Marconi, V. Pereira, E. Bertoni da Fonseca, A. Costa, F. Hesse, and H. Svoboda, *Soldadura FSSW de Juntas Disimiles de AA1050 y Acero DP1000 (Welding FSSW of Dissimilar joints of AA1050 and DP 1000 Steel)*. 2017.
- [47] K. Miyagawa, M. Tsubaki, T. Yasui, and M. Fukumoto, "Spot Welding between Aluminum Alloy and Zn Coated Steel by Friction Stirring," *Welding International*, vol. 23, pp. 648–653, Sep. 2009, doi: [10.1080/09507110902842828](https://doi.org/10.1080/09507110902842828).
- [48] T. Liyanage, J. Kilbourne, A. Gerlich, and T. North, "Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds," *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 14, pp. 500–508, Aug. 2009, doi: [10.1179/136217109X456960](https://doi.org/10.1179/136217109X456960).

## C7: Referencias

- [49] K. Kurtenbach, "Dissimilar Friction Stir Spot Welding of Aluminum to Steel For Use in the Automotive Industry," Rapid City, South Dakota, 2013.
- [50] C. de recuperación y difusión de técnicas de Herrería, "UNE F-5318 - AISI H13 - BÖHLER W302." [Online]. Available: <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/h13/>.
- [51] W. J. Kyffin, "Recent developments in friction stir spot welding of automotive steels," 2006.
- [52] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, and P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51, no. 3, pp. 250–261, Jul. 2012, doi: 10.1179/1879139512Y.0000000015.
- [53] P. Vijayavel, V. Balasubramanian, and S. Sundaram, "Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites," *Materials and Design*, vol. 57, pp. 1–9, May 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.008.
- [54] M. Hartmann, S. Böhm, and S. Schüddekopf, "Influence of Surface Roughness of Tools on the Friction Stir Welding Process," *Journal of Welding and Joining*, vol. 32, pp. 22–28, Dec. 2014, doi: 10.5781/JWJ.2014.32.6.22.
- [55] S. Bozzi, A. L. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Criqui, and J. G. Kerbiguet, "Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 16–17, pp. 4505–4509, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.03.097.
- [56] Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, and T. Hashimoto, "Precipitation sequence in friction stir weld of 6063 aluminum during aging," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, no. 12, pp. 3125–3130, 1999, doi: 10.1007/s11661-999-0223-5.
- [57] P. Lacki, Z. Kucharczyk, R. E. Sliwa, and T. Gałaczyński, "Effect of Tool Shape on Temperature Field in Friction Stir Spot Welding," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 58, 2013, doi: 10.2478/amm-2013-0043.
- [58] U. C. Madrid, "Proyecto de innovación atlas metalográfico." <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/diagrama-al-mg-1>.

## C7: Referencias

- [59] J. L. Cavazos-García, "Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063," 1998.

## 8 Anexos

### 8.1 Anexo A Análisis microestructural

#### 8.1.1 Sentido transversal

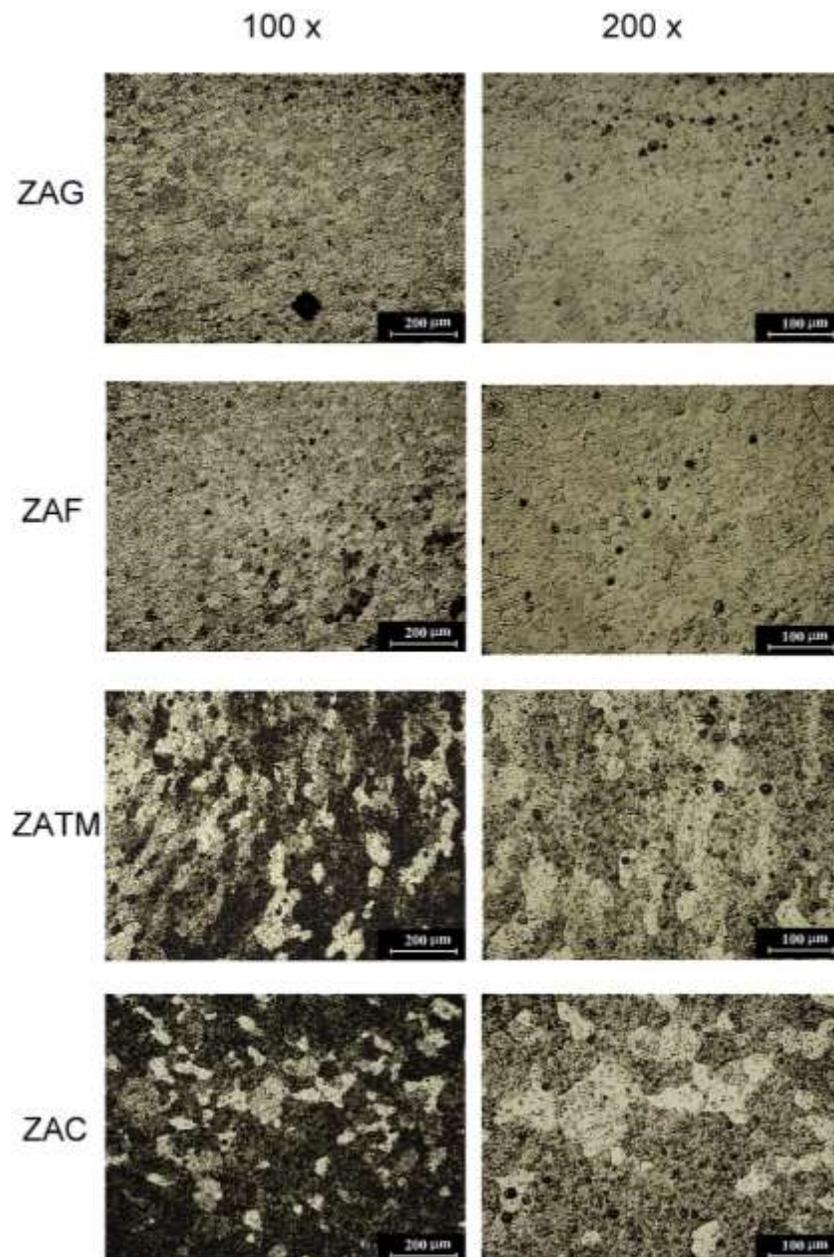


Figura 8-1 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 60 % de penetración en sentido transversal.

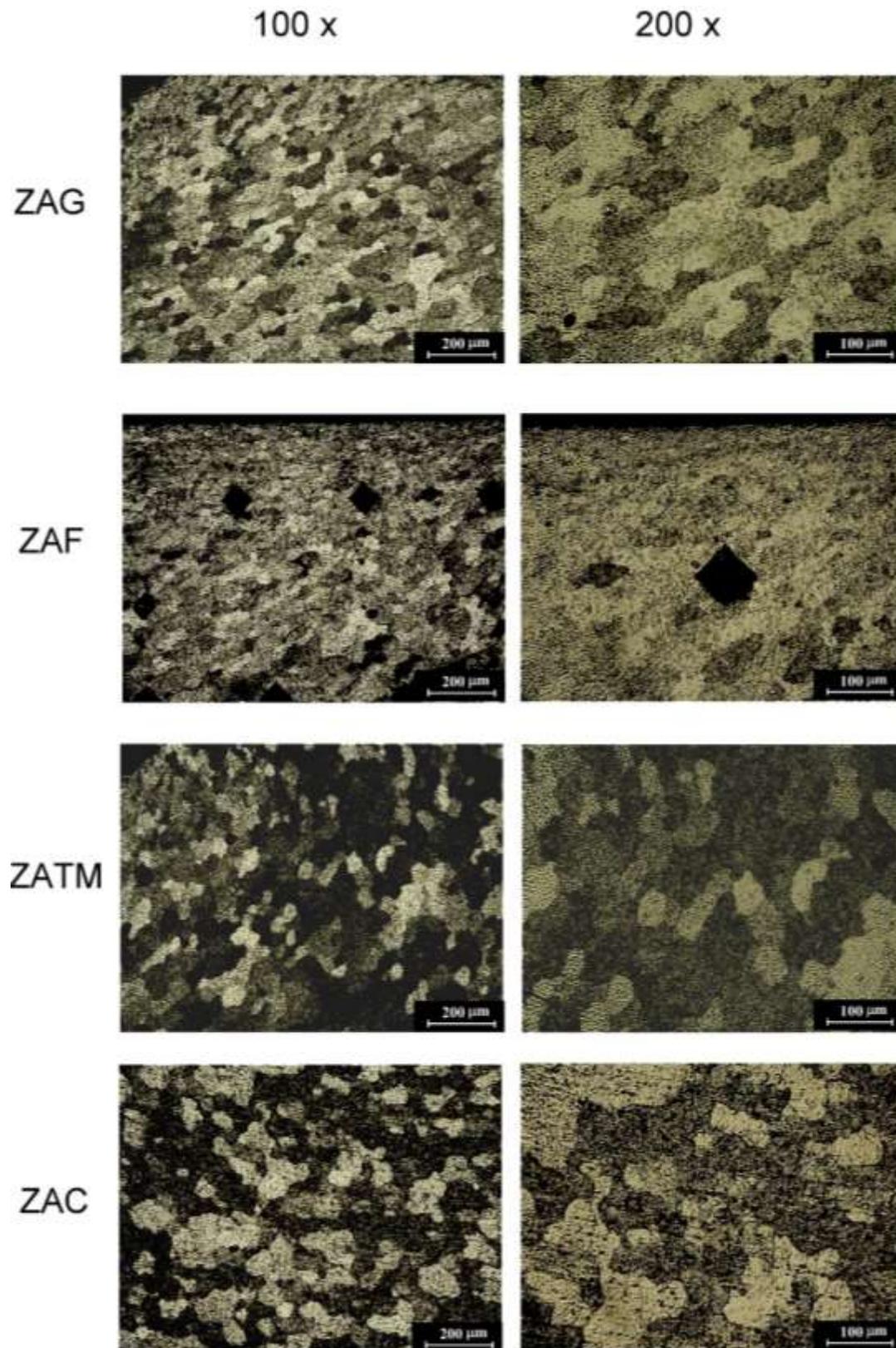


Figura 8-2 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 70 % de penetración en sentido transversal.

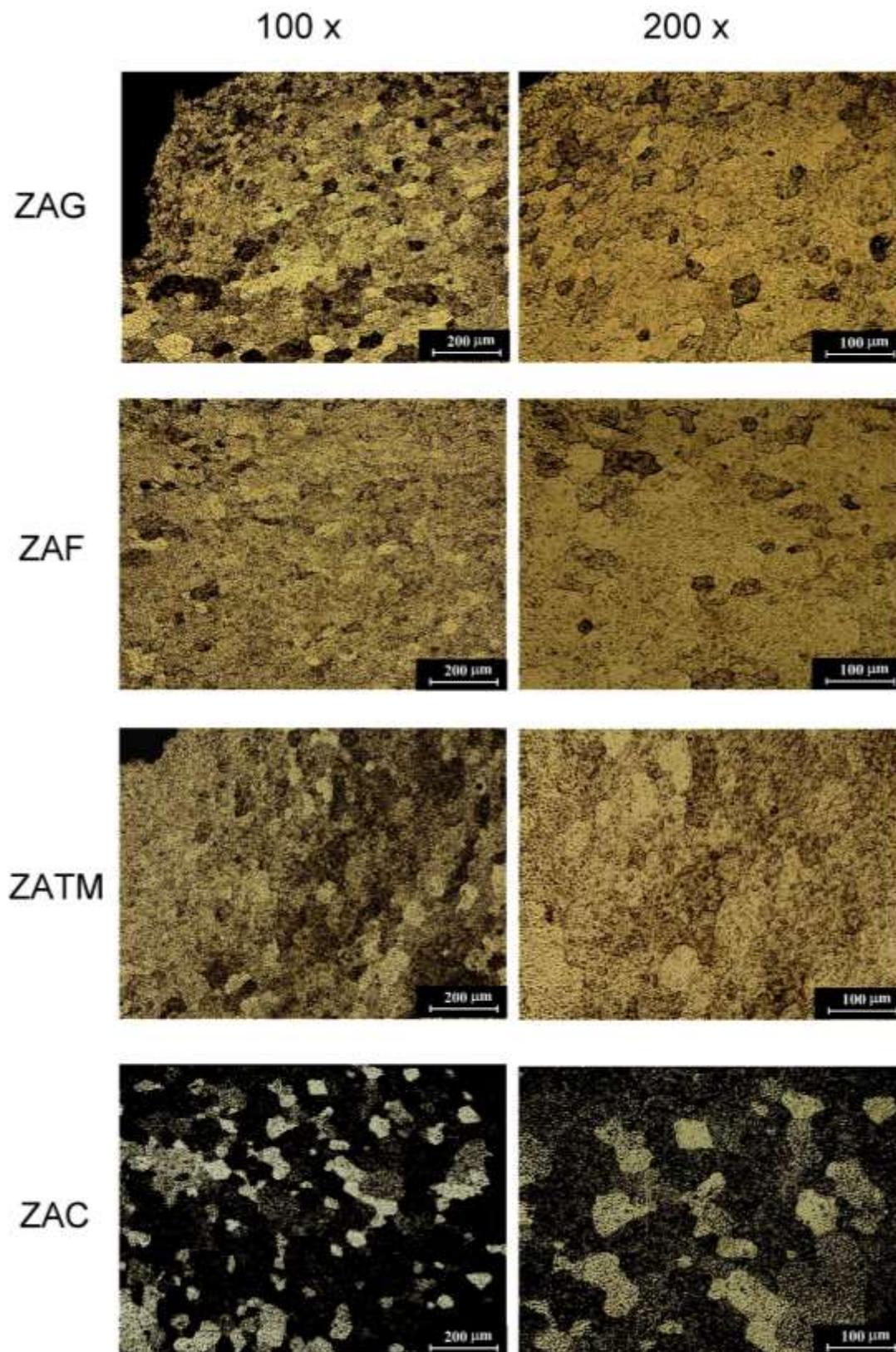


Figura 8-3 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 80 % de penetración en sentido transversal.

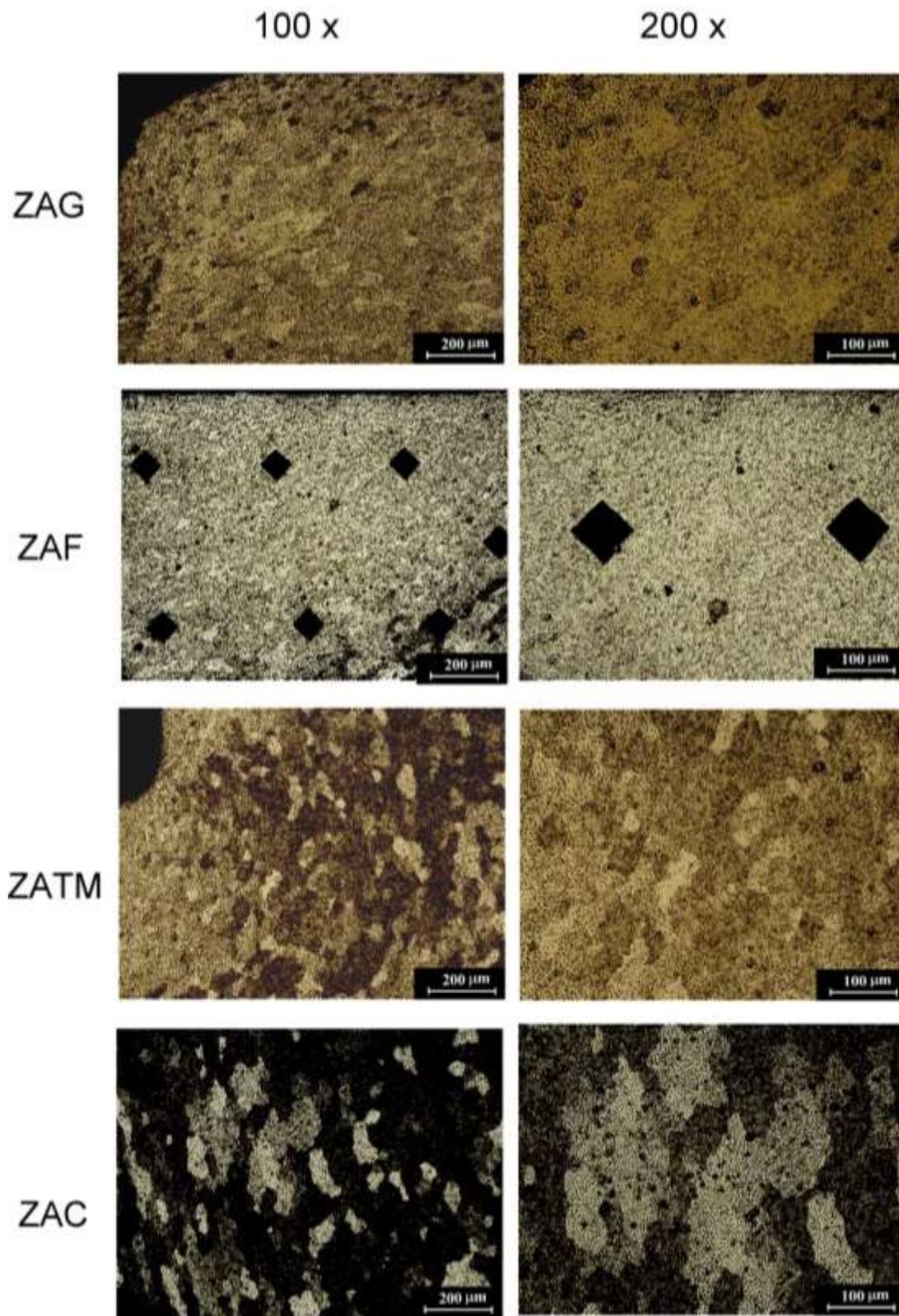


Figura 8-4 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 90 % de penetración en sentido transversal.

### 8.1.2 Sentido longitudinal

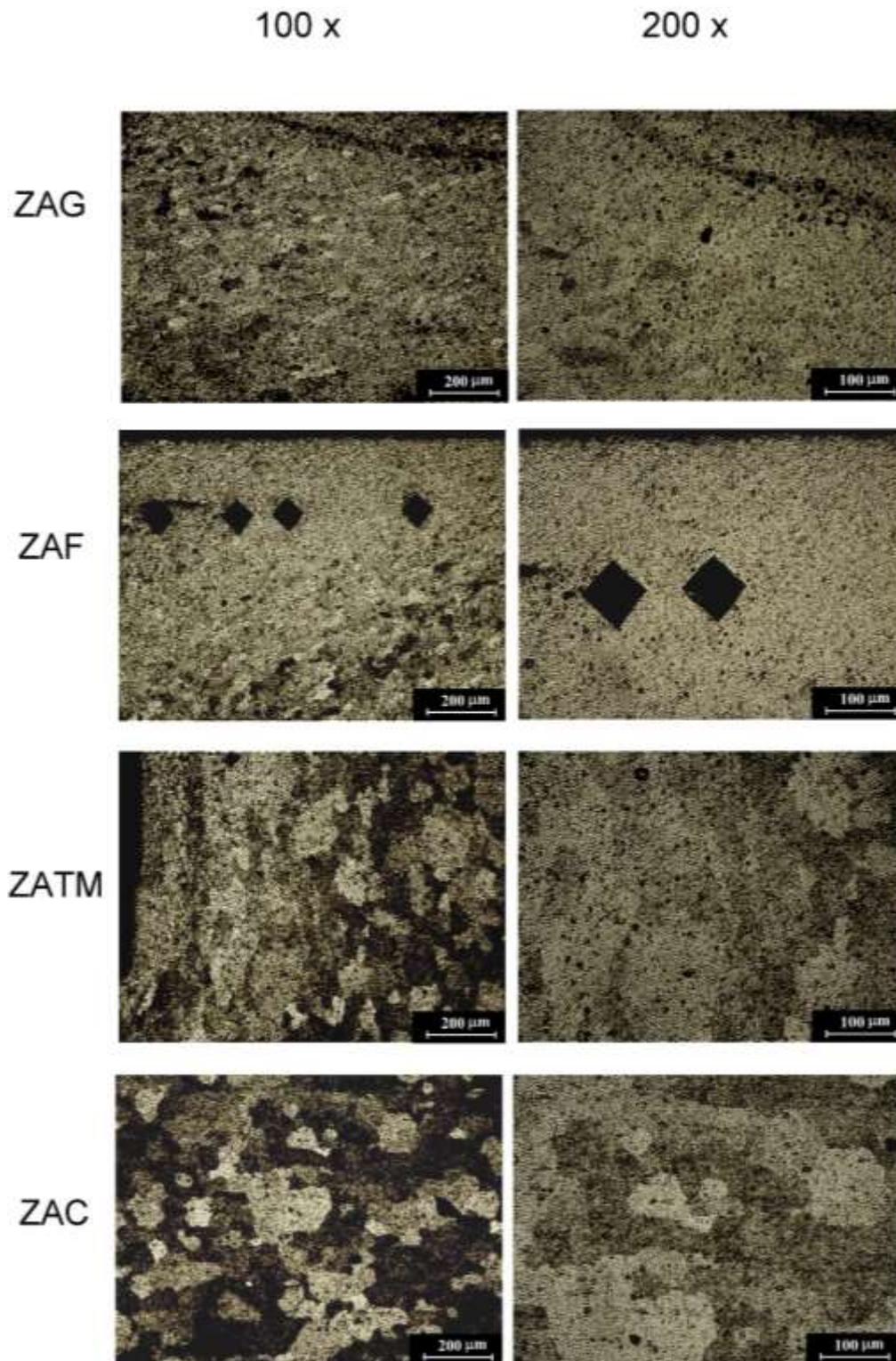


Figura 8-5 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 60 % de penetración en sentido longitudinal.

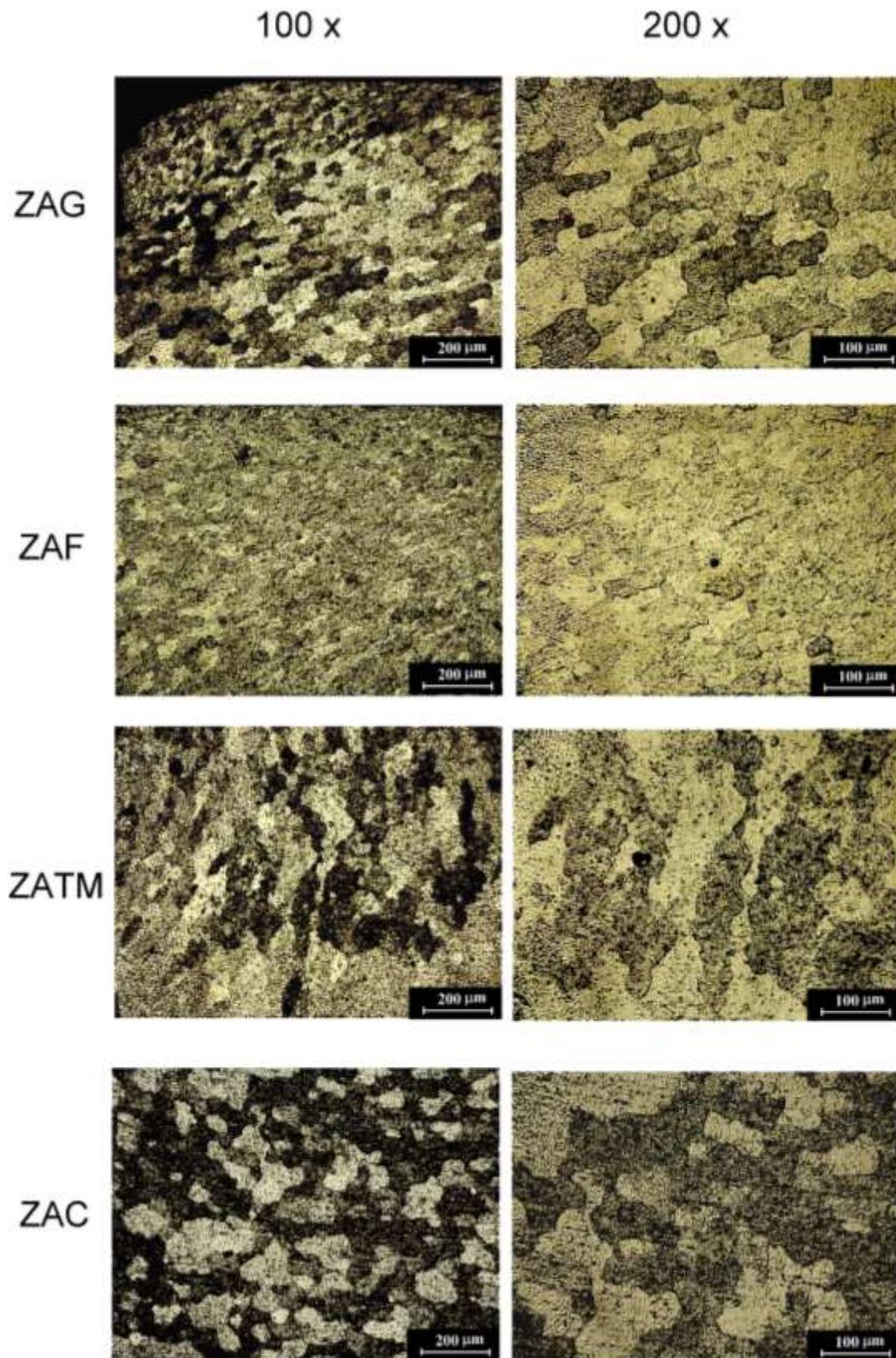


Figura 8-6 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 70 % de penetración en sentido longitudinal.

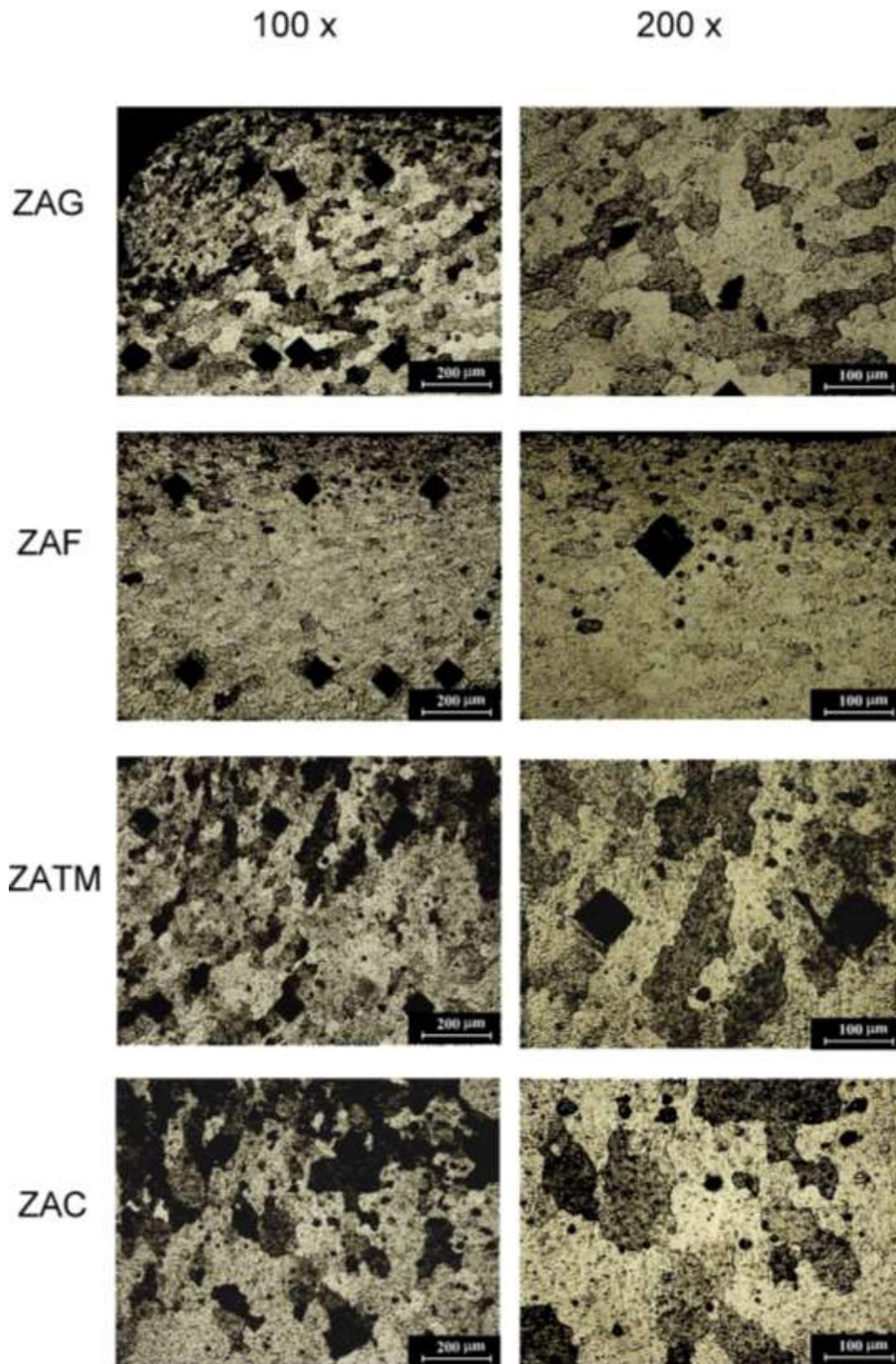


Figura 8-7 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 80 % de penetración en sentido longitudinal.

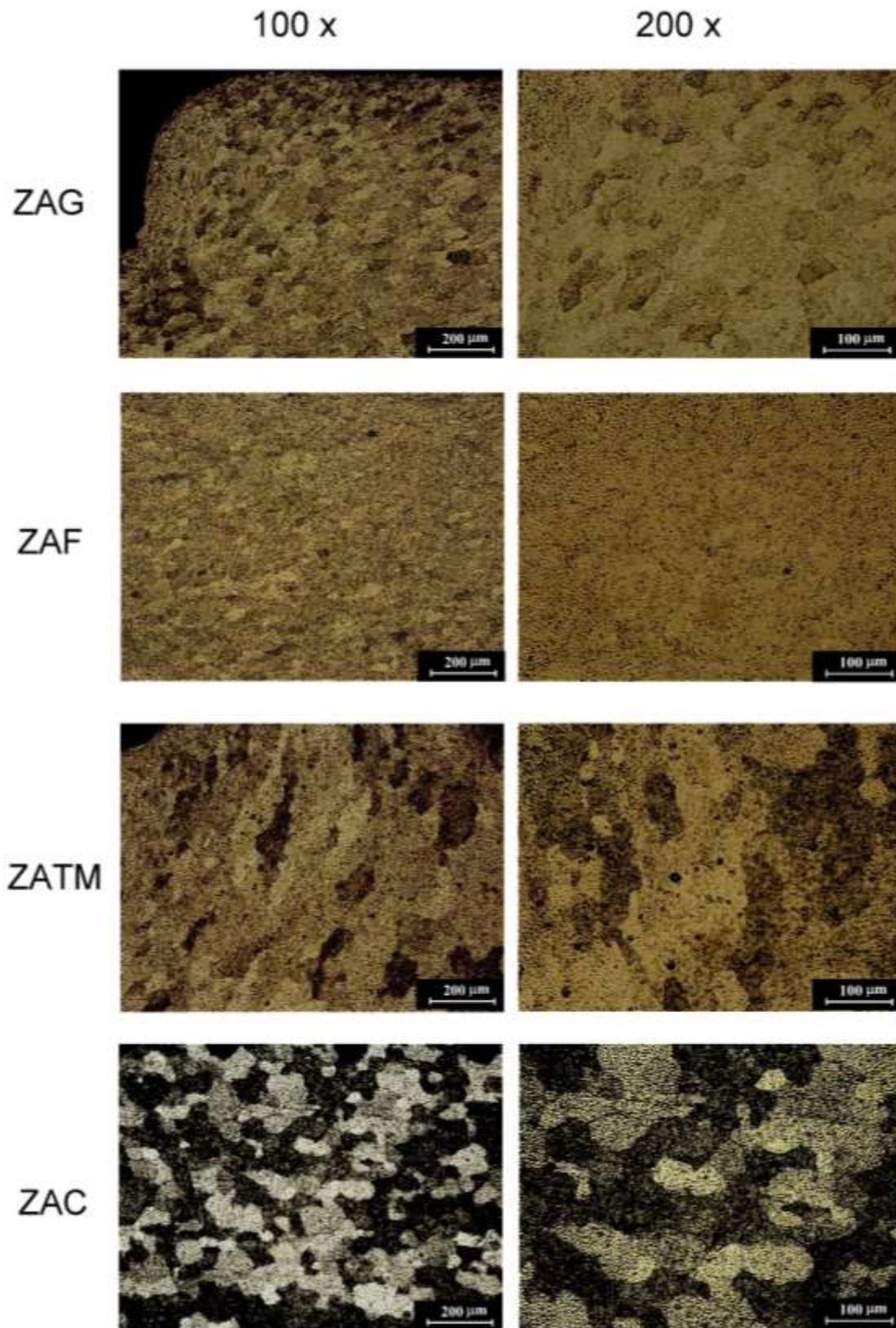


Figura 8-8 Microestructura de las diferentes zonas en la soldadura al 90 % de penetración en sentido longitudinal.

## 8.2 Anexo B Resultados de microdureza

### 8.2.1 Sentido transversal

Tabla 8-1 Resultados de microdureza al 50 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-6.8	51.6	-7.2	48.5	-7.2	49.4
-6.4	47.2	-6.8	50.9	-6.8	48.2
-6.0	46.3	-6.4	44.7	-6.4	48.2
-5.6	49.2	-6.0	49.5	-6.0	48.8
-5.2	49.5	-5.6	45.1	-5.6	47.9
-4.8	46.3	-5.2	50.9	-5.2	46.7
-4.4	49.9	-4.8	53.4	-4.8	48.3
-4.0	52.2	-4.4	49.0	-4.4	49.0
-3.6	53.3	-4.0	51.8	-4.0	46.5
-3.2	54.5	-3.6	53.5	-3.6	46.0
-2.8	51.9	-3.2	53.2	-3.2	51.6
-2.4	50.7	-2.8	53.3	-2.8	44.4
-2.0	52.7	-2.4	54.1	-2.4	48.0
-1.6	48.9	-2.0	54.9	-2.0	50.7
-1.2	54.6	-1.6	53.5	-1.6	46.7
-0.8	50.1	-1.2	57.6	-1.2	49.4
-0.4	50.9	-0.8	56.0	-0.8	51.4
0	48.8	-0.4	57.2	-0.4	58.0
0.4	48.0	0	50.0	0	52.7
0.8	47.2	0.4	54.7	0.4	52.4
1.2	50.1	0.8	57.3	0.8	50.8
1.6	52.6	1.2	57.4	1.2	50.4
2.0	53.7	1.6	62.2	1.6	48.6
2.4	50.1	2.0	52.8	2.0	50.7
2.8	50.6	2.4	52.4	2.4	49.2
3.2	49.6	2.8	53.2	2.8	46.1
3.6	51.1	3.2	54.8	3.2	52.1
4.0	50.3	3.6	54.6	3.6	46.5

## Anexos

Tabla 8-1 Resultados de microdureza al 50 % de penetración.

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
4.4	47.8	4.0	55.8	4.0	50.3
4.8	50.2	4.4	52.8	4.4	48.9
5.2	48.9	4.8	48.7	4.8	48.7
5.6	53.7	5.2	52.1	5.2	48.7
6.0	48.9	5.6	55.0	5.6	48.9
6.4	47.0	6.0	53.3	6.0	51.0
6.8	46.8	6.4	52.9	6.4	46.4
		6.8	50.3	6.8	46.5

Tabla 8-2 Resultados de microdureza al 60 % de penetración.

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-7.2	44.3	-6.8	44.5	-6.8	44.4
-6.8	44.9	-6.4	43.8	-6.4	42.3
-6.4	41.9	-6.0	48.7	-6.0	44.7
-6.0	46.6	-5.6	46.3	-5.6	48.2
-5.6	45.3	-5.2	47.6	-5.2	43.7
-5.2	47.9	-4.8	45.3	-4.8	46.4
-4.8	46.5	-4.4	50.6	-4.4	45.0
-4.4	47.2	-4.0	51.3	-4.0	45.3
-4.0	48.4	-3.6	52.6	-3.6	45.7
-3.6	46.6	-3.2	51.3	-3.2	45.2
-3.2	48.6	-2.8	50.2	-2.8	41.5
-2.8	48.0	-2.4	48.5	-2.4	48.6
-2.4	49.5	-2.0	48.3	-2.0	47.3
-2.0	51.1	-1.6	47.6	-1.6	46.0
-1.6	47.4	-1.2	51.5	-1.2	48.7
-1.2	51.2	-0.8	48.5	-0.8	46.4
-0.8	49.0	-0.4	50.3	-0.4	47.4
-0.4	49.9	0	52.4	0	50.4

Anexos

Tabla 8-2 Resultados de microdureza al 60 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
0	50.9	0.4	52.5	0.4	53.1
0.4	52.8	0.8	52.0	0.8	44.4
0.8	52.5	1.2	52.6	1.2	45.9
1.2	49.7	1.6	54.4	1.6	48.8
1.6	48.8	2.0	54.8	2.0	48.9
2.0	52.0	2.4	49.1	2.4	47.3
2.4	51.1	2.8	52.2	2.8	44.9
2.8	50.7	3.2	51.6	3.2	47.6
3.2	51.4	3.6	53.8	3.6	45.7
3.6	50.1	4.0	52.5	4.0	46.8
4.0	49.1	4.4	50.1	4.4	45.6
4.4	50.1	4.8	48.3	4.8	45.9
4.8	50.4	5.2	47.1	5.2	48.4
5.2	49.1	5.6	44.6	5.6	47.2
5.6	56.7	6.0	48.4	6.0	46.4
6.0	44.4	6.4	49.2	6.4	47.7
6.4	50.4	6.8	49.5	6.8	48.5
6.8	45.4	7.2	45.1	7.2	45.1
7.2	46.5				

Tabla 8-3 Resultados de microdureza al 70 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-6.8	46.3	-7.2	45.3	-7.2	46.7
-6.4	49.5	-6.8	54.5	-6.8	47.7
-6.0	50.3	-6.4	51.6	-6.4	47.8
-5.6	51.7	-6.0	47.8	-6.0	45.9
-5.2	50.8	-5.6	50.7	-5.6	47.7
-4.8	51.5	-5.2	50.8	-5.2	45.0
-4.4	52.7	-4.8	55.1	-4.8	47.1

## Anexos

Tabla 8-3 Resultados de microdureza al 70 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-4.0	50.0	-4.4	52.2	-4.4	49.8
-3.6	50.6	-4.0	52.9	-4.0	50.4
-3.2	50.6	-3.6	53.0	-3.6	49.1
-2.8	49.3	-3.2	52.6	-3.2	51.6
-2.4	50.2	-2.8	52.4	-2.8	53.3
-2.0	53.0	-2.4	54.4	-2.4	50.5
-1.6	52.5	-2.0	52.0	-2.0	47.2
-1.2	49.5	-1.6	52.5	-1.6	47.6
-0.8	50.4	-1.2	53.3	-1.2	49.6
-0.4	51.5	-0.8	53.7	-0.8	50.5
0	49.6	-0.4	52.8	-0.4	51.9
0.4	53.9	0	54.2	0	52.7
0.8	52.1	0.4	51.7	0.4	52.4
1.2	58.9	0.8	52.8	0.8	50.8
1.6	54.4	1.2	51.8	1.2	50.4
2.0	52.4	1.6	52.3	1.6	48.6
2.4	53.7	2.0	52.5	2.0	50.7
2.8	50.5	2.4	52.8	2.4	49.2
3.2	51.0	2.8	51.6	2.8	46.1
3.6	53.1	3.2	56.7	3.2	52.1
4.0	49.2	3.6	53.3	3.6	46.5
4.4	49.2	4.0	53.4	4.0	50.3
4.8	49.8	4.4	53.8	4.4	48.9
5.2	53.9	4.8	51.7	4.8	48.7
5.6	51.6	5.2	50.9	5.2	48.7
6.0	50.2	5.6	50.7	5.6	48.9
6.4	46.4	6.0	49.5	6.0	51.0
6.8	41.3	6.4	47.9	6.4	46.4
		6.8	42.5	6.8	46.5

Anexos

Tabla 8-4 Resultados de microdureza al 80 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-7.20	45.40	-6.80	49.10	-6.00	45.80
-6.80	50.70	-6.40	57.60	-5.60	47.30
-6.40	45.50	-6.00	49.40	-5.20	47.40
-6.00	49.00	-5.60	46.70	-4.80	51.50
-5.60	46.80	-5.20	47.20	-4.40	48.00
-5.20	48.70	-4.80	49.80	-4.00	46.30
-4.80	50.80	-4.40	53.20	-3.60	44.10
-4.40	52.10	-4.00	54.00	-3.20	56.40
-4.00	54.10	-3.60	55.30	-2.80	48.20
-3.60	52.50	-3.20	54.30	-2.40	48.20
-3.20	52.50	-2.80	52.10	-2.00	48.40
-2.80	50.90	-2.40	51.70	-1.60	44.80
-2.40	52.20	-2.00	49.60	-1.20	46.70
-2.00	50.60	-1.60	53.70	-0.80	48.10
-1.60	50.20	-1.20	55.20	-0.40	55.50
-1.20	51.20	-0.80	53.00	0	55.00
-0.80	51.70	-0.40	56.80	0.40	55.50
-0.40	53.40	0	56.00	0.80	48.10
0	53.40	0.40	56.80	1.20	46.70
0.40	53.40	0.80	53.00	1.60	44.80
0.80	51.70	1.20	55.20	2.00	48.40
1.20	51.20	1.60	53.70	2.40	47.80
1.60	50.20	2.00	49.60	2.80	48.20
2.00	50.60	2.40	51.70	3.20	48.20
2.40	52.20	2.80	52.10	3.60	56.40
2.80	50.90	3.20	54.30	4.00	44.10
3.20	52.50	3.60	55.30	4.40	46.30
3.60	52.50	4.00	54.00	4.80	48.00
4.00	54.10	4.40	53.20	5.20	51.50
4.40	52.10	4.80	49.80	5.60	47.40
4.80	50.80	5.20	47.20	6.00	47.30
5.20	48.70	5.60	46.70	6.40	45.80
5.60	46.80	6.00	49.40	6.00	47.30

Anexos

Tabla 8-4 Resultados de microdureza al 80 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
6.00	49.00	6.40	57.60	6.40	45.80
6.40	45.50	6.80	49.10		
6.80	50.70	7.20	39.70		
7.20	45.40				
6.80	50.70				
7.20	45.40				

Tabla 8-5 Resultados de microdureza al 90 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (mm)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-8.00	50.40	-6.80	41.40	-7.20	45.00
-7.60	49.00	-6.40	43.90	-6.80	45.40
-7.20	47.90	-6.00	47.90	-6.40	45.40
-6.80	47.90	-5.60	48.90	-6.00	50.40
-6.40	51.40	-5.20	48.50	-5.60	45.70
-6.00	51.50	-4.80	52.30	-5.20	46.90
-5.60	54.30	-4.40	49.80	-4.80	46.80
-5.20	52.80	-4.00	53.30	-4.40	45.40
-4.80	53.10	-3.60	55.50	-4.00	48.70
-4.40	51.70	-3.20	52.50	-3.60	47.80
-4.00	54.40	-2.80	51.40	-3.20	46.90
-3.60	53.10	-2.40	51.70	-2.80	47.80
-3.20	54.60	-2.00	53.40	-2.40	45.20
-2.80	51.90	-1.60	53.00	-2.00	46.00
-2.40	55.70	-1.20	51.20	-1.60	49.70
-2.00	54.40	-0.80	52.80	-1.20	49.50
-1.60	50.00	-0.40	53.90	-0.80	51.10
-1.20	50.90	0	54.90	-0.40	51.20
-0.80	47.80	0.40	55.60	0	50.60
-0.40	48.10	0.80	54.80	0.40	48.80
0	46.60	1.20	52.70	0.80	49.70
0.40	55.40	1.60	54.10	1.20	51.70
0.80	54.30	2.00	51.90	1.60	49.50

## Anexos

Tabla 8-5 Resultados de microdureza al 90 % de penetración.

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (mm)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
1.20	58.20	2.40	54.50	2.00	47.90
1.60	56.10	2.80	55.30	2.40	48.80
2.00	54.50	3.20	52.70	2.80	49.60
2.40	56.20	3.60	54.60	3.20	47.70
2.80	57.90	4.00	54.50	3.60	47.10
3.20	52.30	4.40	54.60	4.00	48.00
3.60	52.70	4.80	55.30	4.40	48.80
4.00	55.20	5.20	49.60	4.80	48.70
4.40	52.30	5.60	50.90	5.20	49.80
4.80	52.00	6.00	45.60	5.60	47.30
5.20	50.00	6.40	45.40	6.00	47.30
5.60	48.50	6.80	45.60		
6.00	47.30	7.20	42.30		
6.40	47.00				
6.80	45.70				
7.20	25.90				

## 8.2.2 Sentido longitudinal

Tabla 8-6 Resultados de microdureza al 50 % de penetración.

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-7.2	57.2	-7.2	50.0	-0.4	71.0
-6.8	53.8	-6.8	52.9	-0.8	75.7
-6.4	53.4	-6.4	54.2	-1.2	73.3
-6.0	54.3	-6.0	56.8	-1.6	67.8
-5.6	51.3	-5.6	58.5	-2.0	71.5
-5.2	50.8	-5.2	62.5	-2.4	55.0
-4.8	53.2	-4.8	64.4	-2.8	55.1
-4.4	49.3	-4.4	66.9	-3.2	48.1
-4.0	48.7	-4.0	62.0	-3.6	50.3
-3.6	47.6	-3.6	55.5	-4.0	49.5
-3.2	50.5	-3.2	53.9	-4.4	47.8
-2.8	50.1	-2.8	52.8	-4.8	48.8
-2.4	51.7	-2.4	51.3	-5.2	46.7
-2.0	49.0	-2.0	53.1	0	66.4
-1.6	49.3	-1.6	53.4	0.4	71.1
-1.2	52.5	-1.2	54.2	0.8	64.6
-0.8	51.5	-0.8	53.5	1.2	59.8
-0.4	55.4	-0.4	54.0	1.6	56.7
0	53.4	0	54.4	2.0	51.5
0.4	49.3	0.4	52.3	2.4	47.7
0.8	49.6	0.8	52.5	2.8	51.1
1.2	49.9	1.2	52.9	3.2	50.3
1.6	50.1	1.6	52.2	3.6	50.8
2.0	48.9	2.0	54.3	4.0	47.3
2.4	46.9	2.4	51.9	4.4	49.1
2.8	48.1	2.8	52.5	4.8	47.7
3.2	48.8	3.2	54.0	5.2	49.0
3.6	49.5	3.6	53.1	5.6	49.3
4.0	48.9	4.0	58.7	6.0	48.0
4.4	50.6	4.4	56.8	6.4	48.3
4.8	51.3	4.8	57.3	6.8	54.5
5.2	52.4	5.2	53.0		
5.6	60.8	5.6	53.1		
6.0	53.8	6.0	50.3		
6.4	53.3	6.4	51.3		
6.8	54.1	6.8	46.5		

Anexos

Tabla 8-7 Resultados de microdureza al 60 % de penetración.

SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (nm)	Microdureza (HV)
-6.4	47.8	-6.4	48.8	-6.4	50.6
-6.0	49.2	-6.0	46.7	-6.0	46.2
-5.6	48.4	-5.6	48.7	-5.6	48.1
-5.2	46.2	-5.2	45.7	-5.2	48.7
-4.8	46.0	-4.8	52.6	-4.8	47.9
-4.4	48.6	-4.4	50.6	-4.4	46.7
-4.0	46.9	-4.0	48.7	-4.0	45.3
-3.6	48.9	-3.6	52.0	-3.6	46.5
-3.2	50.4	-3.2	54.3	-3.2	46.8
-2.8	50.4	-2.8	53.3	-2.8	46.3
-2.4	50.5	-2.4	54.4	-2.4	49.3
-2.0	50.2	-2.0	55.8	-2.0	46.7
-1.6	51.6	-1.6	54.4	-1.6	46.0
-1.2	50.2	-1.2	56.7	-1.2	47.1
-0.8	50.2	-0.8	58.5	-0.8	48.5
-0.4	49.1	-0.4	55.5	-0.4	48.3
0	49.0	0	54.9	0	50.6
0.4	46.0	-6.8	49.1	1.2	53.8
0.8	50.2	0.4	63.4	1.6	47.5
1.2	49.9	0.8	52.4	2.0	46.9
1.6	51.6	1.2	56.7	2.4	47.3
2.0	50.2	1.6	53.1	2.8	46.8
2.4	50.8	2.0	54.6	3.2	45.8
2.8	50.7	2.4	59.2	3.6	44.5
3.2	49.8	2.8	52.1	4.0	45.5
3.6	49.3	3.2	55.6	4.4	45.7
4.0	48.1	3.6	55.5	4.8	46.2
4.4	50.7	4.0	66.4	5.2	45.5
4.8	48.2	4.4	61.5	5.6	46.9
5.2	47.5	4.8	56.7	6.0	47.9
5.6	47.9	5.2	50.1	6.4	44.2
6.0	58.1	5.6	47.6		
6.4	50.6	6.0	49.2		
6.8	45.5	6.4	47.7		
		6.8	58.8		
		7.2	59.9		

Anexos

Tabla 8-8 Resultados de microdureza al 70 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-7.2	48.8	-7.2	50.8	-6.8	49.1
-6.8	47.6	-6.8	47.9	-6.4	49.3
-6.4	52.9	-6.4	46.0	-6.0	49.1
-6.0	50.9	-6.0	48.9	-5.6	48.9
-5.6	51.4	-5.6	47.6	-5.2	52.3
-5.2	51.6	-5.2	50.2	-4.8	48.4
-4.8	53.8	-4.8	52.5	-4.4	51.2
-4.4	51.2	-4.4	54.1	-4.0	50.1
-4.0	55.0	-4.0	53.8	-3.6	46.4
-3.6	54.0	-3.6	53.1	-3.2	49.8
-3.2	51.8	-3.2	52.0	-2.8	46.7
-2.8	57.2	-2.8	53.5	-2.4	47.5
-2.4	52.6	-2.4	53.9	-2.0	48.3
-2.0	51.7	-2.0	52.5	-1.6	49.3
-1.6	54.3	-1.6	53.8	-1.2	49.6
-1.2	53.2	-1.2	53.0	-0.8	50.2
-0.8	52.8	-0.8	52.8	-0.4	50.8
-0.4	52.8	-0.4	54.9	0	46.6
0	54.7	0.0	56.1	0.4	47.8
0.4	50.9	0.4	51.6	0.8	47.4
0.8	54.6	0.8	52.5	1.2	50.0
1.2	51.1	1.2	53.5	1.6	48.8
1.6	51.3	1.6	52.5	2.0	49.1
2.0	51.2	2.0	54.4	2.4	48.9
2.4	54.0	2.4	52.2	2.8	48.1
2.8	51.6	2.8	54.2	3.2	52.2
3.2	52.9	3.2	52.8	3.6	45.3
3.6	50.5	3.6	55.1	4.0	48.5
4.0	51.8	4.0	54.0	4.4	44.3
4.4	52.4	4.4	50.9	4.8	50.3
4.8	50.9	4.8	48.6	5.2	46.5
5.2	50.3	5.2	48.5	5.6	47.3
5.6	50.6	5.6	47.6	6.0	46.4
6.0	49.6	6.0	48.4	6.4	48.3
6.4	47.3	6.4	49.3	6.8	54.2
6.8	49.9	6.8	47.3		

Anexos

Tabla 8-9 Resultados de microdureza al 80 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-6.8	49.9	-6.4	49.1	-6.8	51.2
-6.4	50.8	-6.0	48.8	-6.4	67.6
-6.0	49.8	-5.6	46.7	-6.0	56.3
-5.6	53.5	-5.2	48.7	-5.6	48.6
-5.2	55.5	-4.8	45.7	-5.2	50.0
-4.8	55.8	-4.4	52.6	-4.8	39.2
-4.4	54.6	-4.0	50.6	-4.4	45.1
-4.0	56.7	-3.6	48.7	-4.0	46.2
-3.6	56.5	-3.2	52.0	-3.6	41.8
-3.2	56.5	-2.8	54.3	-3.2	54.2
-2.8	52.5	-2.4	53.3	-2.8	49.4
-2.4	53.3	-2.0	55.8	-2.4	44.3
-2.0	53.6	-1.6	54.4	-2.0	48.0
-1.6	54.0	-1.2	56.7	-1.6	52.6
-1.2	57.8	-0.8	58.5	-1.2	46.0
-0.8	54.6	-0.4	55.5	-0.8	49.4
-0.4	60.0	0	54.9	-0.4	50.4
0	23.4	0.4	63.4	0	46.6
0.4	42.1	0.8	52.4	0.4	48.9
0.8	33.8	1.2	56.7	0.8	47.6
1.2	39.0	1.6	53.1	1.2	50.1
1.6	58.3	2.0	54.6	1.6	50.2
2.0	57.0	2.4	59.2	2.0	46.2
2.4	58.5	2.8	52.1	2.4	50.2
2.8	55.5	3.2	55.6	2.8	46.4
3.2	54.6	3.6	55.5	3.2	45.4
3.6	57.4	4.0	66.4	3.6	47.8
4.0	55.6	4.4	61.5	4.0	45.9
4.4	55.6	4.8	56.7	4.4	42.5
4.8	56.6	5.2	50.1	4.8	52.3
5.2	59.8	5.6	47.7	5.2	42.3
5.6	53.4	6.0	48.8		
6.0	54.9	6.4	51.9		
6.4	51.8				
6.8	47.1				
7.2	47.2				

Anexos

Tabla 8-10 Resultados de microdureza al 90 % de penetración.					
SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		SECCIÓN 3	
Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)	Distancia (mm)	Microdureza (HV)
-6.8	50.9	-6.8	43.3	-5.2	48.5
-6.4	50.5	-6.4	52.8	-4.8	48.0
-6.0	53.5	-6.0	48.7	-4.4	48.2
-5.6	52.4	-5.6	50.5	-4.0	47.1
-5.2	52.9	-5.2	52.9	-3.6	47.6
-4.8	52.4	-4.8	51.8	-3.2	47.2
-4.4	52.1	-4.4	50.2	-2.8	46.6
-4.0	53.8	-4.0	52.2	-2.4	46.9
-3.6	51.8	-3.6	54.3	-2.0	48.3
-3.2	52.6	-3.2	54.1	-1.6	49.8
-2.8	53.4	-2.8	53.9	-1.2	47.5
-2.4	55.6	-2.4	52.8	-0.8	47.1
-2.0	53.5	-2.0	53.0	-0.4	49.7
-1.6	48.2	-1.6	54.4	0	51.5
-1.2	52.1	-1.2	54.3	0.4	48.8
-0.8	51.3	-0.8	51.5	0.8	49.7
-0.4	51.9	-0.4	53.7	1.2	51.7
0	50.8	0	55.2	1.6	49.5
0.4	41.6	0.4	57.6	2.0	47.9
0.8	53.1	0.8	52.7	2.4	48.8
1.2	56.9	1.2	54.3	2.8	49.6
1.6	53.6	1.6	54.2	3.2	47.7
2.0	53.2	2.0	54.1	3.6	47.1
2.4	53.2	2.4	53.1	4.0	48.0
2.8	54.2	2.8	53.6	4.4	48.8
3.2	52.8	3.2	53.5	4.8	48.7
3.6	53.2	3.6	53.9	5.2	49.8
4.0	53.3	4.0	52.5	5.6	47.3
4.4	50.8	4.4	47.5	6.0	47.3
4.8	50.5	4.8	48.7		
5.2	50.3	5.2	48.9		
5.6	47.6	5.6	46.6		
6.0	47.4	6.0	48.3		
6.4	47.2	6.4	49.0		
6.8	48.2	6.8	46.8		
7.2	47.0	7.2	49.6		

## 8.3 Anexo C Resultados de ensayos a tensión uniaxial cortante

Tabla 8-11 Resultados de capacidad de carga		
Penetración	Probeta	Capacidad de carga (kN)
50	50-1	0.56250
	50-2	0.04375
	50-3	0.07813
	50-4	0.07187
	Promedio	<b>0.18906</b>
60	60-1	3.59063
	60-2	3.12500
	60-3	1.46563
	60-4	1.15937
	Promedio	<b>2.33516</b>
70	70-1	3.13125
	70-2	4.01563
	70-3	3.86250
	70-4	3.72813
	Promedio	<b>3.68430</b>
80	80-1	2.65313
	80-2	1.95000
	80-3	3.75625
	80-4	3.40625
	Promedio	<b>2.94141</b>
90	90-1	3.85000
	90-2	3.04688
	90-3	3.06562
	90-4	2.63125
	Promedio	<b>3.14844</b>