



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

**“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”**

MAESTRIA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

***“EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA ALEACION Zn-22Al-2Ag SOLDADA POR FSW VARIANDO LAS RPM”***

PRESENTA:

Ing. Jonathan Humberto Reveles Hernández

ASESOR:

Dr. Francisco Alvarado Hernández

COASESORES:

Dr. Simitrio Ignacio Maldonado Ruiz

Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández

Dr. Miguel Fernando Delgado Pámanes

## AGRADECIMIENTOS

Dios, tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda. Cuando caigo me pones a prueba y aprendo de mis errores para darme cuenta lo débil y vulnerable que soy como ser humano, gracias por estar presente en esta etapa de mi vida tan importante esta meta está cumplida.

Gracias a las enseñanzas de mis buenos maestros y en especial al Dr. Miguel Fernando Delgado Pamanes y al Dr. Francisco Alvarado Hernández, gracias a la confianza que siempre me brindaron a pesar que no fui el mejor alumno ellos si fueron los mejores maestros siempre encontraron las palabras adecuadas para motivarme y continuar con este trabajo, gracias infinitas por todo lo que hicieron por mí.

Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández le agradezco su digna labor y le doy mi agradecimiento por formar parte de mi formación sembrando el conocimiento e influyendo en mi persona como mejor ciudadano.

Gracias a la universidad autónoma de zacatecas en especial al área de ingeniería I, maestría en ciencia e ingeniería de los materiales por haberme permitido formarme de manera directa e indirecta, fueron ustedes los responsables de realizar su aporte que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de mi paso por aquí.

Infinito agradecimiento a todos mis amigos y familiares en especial a mis padres: Maricela Hernández Martínez y Arturo Reveles Chairez que fueron mis mayores promotores durante este proceso, con ustedes todo lo que he vivido es maravilloso, gracias por darme la fuerza y ser pacientes conmigo, es tan maravilloso haber tenido la dicha que ustedes me dieran la vida.

## RESUMEN

Los recientes desarrollos con el zinag en la industria automotriz nos permiten obtener piezas más livianas y seguras. Los últimos avances desarrollados en la tecnología de la industria automotriz se deben a la reciente incorporación de zinag en la construcción de la carrocería avanzada.

La evolución del sector automotriz y de la fabricación de carrocerías a gran escala, se puede explicar por las excelentes propiedades físicas y químicas de este material. Los nuevos vehículos se benefician de la ligereza y la gran capacidad de este material para absorber impactos, así como de su alta resistencia a la corrosión.

A partir de distintos estudios de ingenieros e investigadores especializados en el sector, buscan la manera de comenzar a utilizar este material no solo en la fabricación de coches de alta gama sino también en componentes mecánicos.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se realizó una aleación de Zn-22Al-2Ag llamadas zinag por sus elementos aleantes, la cual se está implementando en la industria automotriz en componentes automotrices, principalmente en elementos expuestos a impacto tales como salpicaderas y defensas.

La presente tesis busca evaluar las propiedades mecánicas de la aleación Zn-22Al-2Ag al ser soldada por fsw al variar las rpm siendo estas de 900 rpm, 1100 rpm, 1200 rpm, 1300 rpm, 1500 rpm y 1600 rpm, de esta manera poder entender el comportamiento de estas aleaciones bajo estas condiciones.

Las muestras se obtuvieron por fundición en un horno de piso en el cual funciona con resistencias eléctricas, se vaciaron las muestras en molde de acero, el cual fue precalentado antes de realizar el vaciado de nuestra aleación para evitar un choque térmico.

Posteriormente se procedió a realizar la soldadura a diferentes rpm, después de realizar la soldadura se tomaron muestras de estas para realizar la caracterización metalográfica y las diferentes pruebas mecánicas.

6 muestras de nuestra aleación base fueron sometidas a un tratamiento térmico (enfriamiento rápido y enfriamiento lento en el horno), la mitad de las muestras se enfriaron en agua. A estas aleaciones se les procedió a realizar la soldadura por fsw a las mismas condiciones de las anteriores, posteriormente se les realizó el análisis metalográfico y las pruebas mecánicas correspondientes.

Los resultados fueron comparados con los de las muestras ensayadas sin tratamiento térmico.

## Contenido

1.....	¡Error! Marcador no definido.
INTRODUCCIÓN.....	8
ANTECEDENTES.....	10
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2.1 Objetivos específicos.....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4 HIPÓTESIS.....	16
MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 ZINC.....	17
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL ALUMINIO.....	17
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PLATA.....	18
2.2 ALEACIONES DE ZINC.....	18
2.2.1 Zinag.....	18
2.3.1 Tipos de herramientas.....	20
2.3.2 Características del equipo.....	22
2.3.3 Procedimiento.....	22
2.4 Soldadura por fricción lineal.....	22
2.4.1 Secuencia del proceso.....	23
2.4.2 Influencia de la velocidad rotacional (rpm).....	24
2.5 características microestructurales.....	25
Ensayos mecánicos utilizados para evaluar las uniones soldadas.....	27
2.6.1 Ensayo de microdureza.....	27
2. 7 Ensayos de tensión.....	28
2. 8 Análisis metalográfico.....	30
METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	31
3.1 Peso y corte del metal.....	33
3.2 Obtención de la aleación Zn-22Al- 2Ag.....	34
3.3 Aplicación de la soldadura FSW.....	35
3.4 Caracterización.....	36
3.5 Ensayos de tensión.....	36
IV RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	38

RESULTADOS .....	38
Referencias bibliográficas .....	67

## Induce de figuras

Figura 2. 1 Pin. Herramienta para realizar la soldadura por FSW. ....	21
Figure 2.2.- Esquema de las diferentes zonas generadas al realizar FSW.....	26
Figura 2. 3 Microestructura de la soldadura por fricción – agitación.....	27
Figura 2. 4 Barrido de 10 indentaciones realizadas después de la FSW. ....	28
Figura 2. 5 Corte y diseño de las probetas para ensayos de tensión. ....	30

Figura 3. 1 Elemento utilizado en la aleación plata. ....	34
Figura 3. 2 Fundición de la aleación base.....	34
Figura 3. 3 Vaciado de la aleación fundido en lingotera. ....	35
Figura 3. 4 Aplicación de la soldadura FSW.....	36
Figura 3. 5 Ensayos de tensión.....	37

Figura 4. 1 Microestructura de una aleación de Zn-22Al-2Ag en condiciones de fundición atacada con Kellers durante 10 segundos: <b>(A)</b> 50x y <b>(B)</b> 200x. ....	39
Figura 4. 2 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 900 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x.....	40
Figura 4. 3 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1100 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x.....	41
Figura 4. 4 . Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1200 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x. ....	42
Figura 4. 5 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1300 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x. ....	43
Figura 4. 6 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1500 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x. ....	44
Figura 4. 7 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1600 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: <b>(A)</b> 50x, <b>(B)</b> 50x, <b>(C)</b> 200x y <b>(D)</b> 200x. ....	45
Figura 4. 8 Resultado de las pruebas de microdureza realizadas al metal base.....	46
Figura 4. 9 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 900 Rpm. ....	47
Figura 4. 10 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1100 Rpm.....	47
Figura 4. 11 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1200 Rpm.....	48
Figura 4. 12 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1300 Rpm.....	49
Figura 4. 13 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1500 Rpm.....	49
Figura 4. 14 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1600 Rpm.....	50
Figura 4. 15 Esfuerzo vs Deformación metal base. ....	51
Figura 4. 16 Rpm/% de deformación después de realizar la soldadura a diferentes Rpm. ....	52

Figura 4. 17 Rpm/Max. Esfuerzo soportado después de realizar la soldadura a diferentes Rpm. ....	53
Figura 4. 18 resultado de los ensayos de tensión.....	54
Figura 4. 19 (a), (b), (c), (d), (e) y (f) nos muestran la unión realizada a 900rpm,1100rpm,1200rpm,1300rpm, 1500rpm y 1600 rpm a la placa con historial térmico la cual tuvo un enfriamiento rápido.....	56
Figura 4. 25 (a) a 900rpm, (b) a 1100rpm, (c) a 1200rpm, (d) a 1300rpm, (e) a 1500rpm y (f) a 1600rpm, unión realizada a las placas después del historial térmico enfriada lentamente.....	57
Figura 4. 31 Defecto túnel encontrado en las uniones realizadas a 900 rpm, 1500 rpm y 1600 rpm después del historial térmico con enfriamiento lento.....	58
Figura 4. 34 soldadura a 1100 Rpm. ....	59
Figura 4. 35 soldadura a 1200 Rpm. ....	60
Figura 4. 36 soldadura a 1300 Rpm. ....	61
Figura 4. 37 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1100 Rpm con TT.....	62
Figura 4. 38 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1200 Rpm con TT.....	63
Figura 4. 39 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1300 Rpm con TT.....	63
Figura 4. 40 deformación máxima después del TT.....	64
Figura 4. 41 máximo esfuerzo después del TT .....	65

## Índice de tablas

Tabla 3. 1 Elementos aleantes y cantidades de estos. ....	33
Tabla 4. 1 Resultados del análisis químico.....	38

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran cantidad de materiales aplicables a los requerimientos del diseño, en el caso de las industrias, la mayor parte de los componentes diseñados se utilizan para mejorar o construir dispositivos mecánicos que sean más eficientes en los procesos de fabricación.

La familia de aleaciones rica en zinc y aluminio ha sido particularmente popular durante los últimos años. Ofrecen varias ventajas, son aleaciones baratas, de alta resistencia mecánica, tienen buena resistencia a la corrosión y son materiales de bajo punto de fusión.

El desarrollo y aplicación de la aleación Zinag llamada así por sus materiales aleantes como lo es el zinc, aluminio y la plata. Podría ser el material del futuro en la industria automotriz y muchas otras. El Zinag es capaz de absorber impactos y estirarse hasta 1,000 veces su tamaño. Las piezas fabricadas con zinag pueden ser remplazadas y reciclarse hasta en 10 ocasiones nuevamente. El desarrollo posee la característica de ser duro, ligero y con propiedades térmicas y mecánicas. A diferencia del acero, no sufre corrosión, y puede sustituir materiales escasos y de mayor costo como el titanio. Es una aleación donde la transformación tecnológica permite producir un lingote que se convierte en un material de baja densidad que absorbe el impacto y la energía. Esto hace que tenga más aplicaciones en el sector automotriz.

La soldadura juega un papel vital en la producción de productos complejos que son difíciles de fabricar como un solo componente. En general, los procesos de unión por soldadura por arco eléctrico son los más utilizados en las industrias. Estos procesos requieren varios consumibles, incluidos el metal de aporte y gases protectores. Además que generan humos, gases y radiaciones que afectan negativamente al medio ambiente. Aparte de, la zona y el material soldados por arco eléctrico en su entorno sufren el deterioro de los efectos del procesamiento previo sobre los materiales base. La soldadura por fricción por agitación (FSW) es un proceso de unión de estado sólido el cual fue inventado en Inglaterra y



patentado en 1991 por W. M. Thomas, es relativamente nuevo, simple, respetuoso con el medio ambiente, eficiente en energía y tiene aplicaciones amplias en diversas áreas industriales, tales como; automotrices, aeronáuticas y aeroespaciales, ya que pueden soldar materiales como aleaciones aluminio y en menor medida una variedad de otros materiales, incluyendo aleaciones de magnesio, aleaciones de titanio, aceros inoxidables y compuestos de matriz metálica de manera eficiente.

La optimización de los parámetros de proceso tales como la geometría de la herramienta rotativa, velocidad de avance, velocidad angular (en rpm) y presión juegan un papel importante en el grado de unión. El control de estos parámetros es de vital importancia debido a que durante el proceso de soldadura se debe evitar el sobrecalentamiento y/o la fusión de los materiales.

## ANTECEDENTES

El zinc es un metal, a veces clasificado como metal de transición aunque estrictamente no lo sea, ya que tanto el metal como su ion positivo presentan el conjunto orbital completo. Este elemento presenta cierto parecido con el magnesio, y con el cadmio de su grupo, pero del mercurio se aparta mucho por las singulares propiedades físicas y químicas de este (contracción lantánida y potentes efectos relativistas sobre orbitales de enlace). Es el 23 Elemento más abundante en la Tierra y una de sus aplicaciones más importantes es el galvanizado del acero. Es un metal de color blanco azulado que arde en el aire con llama verde azulada. El aire seco no le ataca pero en presencia de humedad se forma una capa superficial de óxido o carbonato básico que aísla al metal y lo protege de la corrosión. Prácticamente el único estado de oxidación que presenta es el +2. El metal presenta una gran resistencia a la deformación plástica en frío que disminuye en caliente, lo que obliga a laminarlo por encima de los 100 °C. No se puede endurecer por acritud y presenta el fenómeno de fluencia a temperatura ambiente al contrario que la mayoría de los metales y aleaciones y pequeñas cargas el más importante. Las aleaciones de zinc se han utilizado durante siglos piezas de latón datadas en 1000-1500 a. C. se han encontrado en Canaán y otros objetos con contenidos de hasta el 87% de zinc han aparecido en la antigua región de Transilvania sin embargo, por su bajo punto de fusión y reactividad química el metal tiende a evaporarse por lo que la verdadera naturaleza del metal no fue comprendida por los antiguos. La fundición y extracción de zinc impuro se llevó a cabo hacia el año 1000 en la India en la obra Rasarnava (c. 1200) de autor desconocido se describe el procedimiento y posteriormente en China y a finales del siglo XIV los indios conocían ya la existencia del zinc como metal distinto de los siete conocidos en la Antigüedad. La principal aplicación del zinc cerca del 50 % del consumo anual es el galvanizado del acero para protegerlo de la corrosión, protección efectiva incluso cuando se agrieta el recubrimiento ya que el zinc actúa como ánodo de sacrificio [1].

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8 % de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Este metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis. Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería de materiales, tales como su baja densidad ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) y su alta resistencia a la corrosión. La extracción del aluminio a partir de las rocas que lo contenían se reveló como una tarea ardua [2].

A mediados de siglo, podían producirse pequeñas cantidades, reduciendo con sodio un cloruro mixto de aluminio y sodio, gracias a que el sodio era más electropositivo. Durante el siglo XIX, la producción era tan costosa que el aluminio llegó a considerarse un material exótico, de precio exorbitante, y tanpreciado o más que la plata o el oro. Diversas circunstancias condujeron a un perfeccionamiento de las técnicas de extracción y un consiguiente aumento de la producción. La primera de todas fue la invención de la dinamo en 1866, que permitía generar la cantidad de electricidad necesaria para realizar el proceso.

En el año 1889, Karl Bayer patentó un procedimiento para extraer la alúmina u óxido de aluminio a partir de la bauxita, la roca natural. Poco antes, en 1886, el francés Paul Héroult y el norteamericano Charles Martin Hall habían patentado de forma independiente y con poca diferencia de fechas un proceso de extracción, conocido hoy como proceso Hall-Héroult. Con estas nuevas técnicas se incrementó vertiginosamente la producción de aluminio. Si en 1882, la producción anual alcanzaba apenas las 2 toneladas, en 1900 alcanzó las 6,700 toneladas, en 1939 las 700,000 toneladas, 2,000 000 en 1943, y en aumento desde entonces, llegando a convertirse en el metal no férreo más producido en la actualidad [3].

La abundancia conseguida produjo una caída del precio y que perdiese la vitola de metal preciado para convertirse en metal común. El aluminio es un elemento muy abundante en la naturaleza, solo aventajado por el oxígeno y el silicio. Se trata de un metal ligero, con una densidad de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , y con un bajo punto de fusión ( $660^\circ\text{C}$ ). Su color es grisáceo y refleja bien la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico (entre 35 y 38  $\text{m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ ) y térmico (80 a  $230 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). La utilización industrial del aluminio ha hecho de este metal uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos, siendo hoy un material polivalente que se aplica en ámbitos económicos muy diversos y que resulta estratégico en situaciones de conflicto. Hoy en día, tan solo superado por el hierro/acero. El aluminio se usa en forma pura, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos. En estado puro se aprovechan sus propiedades ópticas para fabricar espejos domésticos e industriales, como pueden ser los de los telescopios reflectores.

Por sus propiedades eléctricas es un buen conductor, capaz de competir en coste y prestaciones con el cobre tradicional. Dado que, a igual longitud y masa, el conductor de aluminio tiene poco menos conductividad, resulta un componente útil para utilidades donde el exceso de peso es importante. Es el caso de la aeronáutica y de los tendidos eléctricos donde el menor peso implica en un caso menos gasto de combustible y mayor autonomía, y en el otro la posibilidad de separar las torres de alta tensión.

El uso del aluminio también se realiza a través de compuestos que forma. La misma alúmina, el óxido de aluminio que se obtiene de la bauxita, se usa tanto en forma cristalina como amorfa. En el primer caso forma el corindón, una gema utilizada en joyería que puede adquirir coloración roja o azul, llamándose entonces rubí o zafiro, respectivamente. Ambas formas se pueden fabricar artificialmente [4].

La plata es un elemento químico de número atómico 47 situado en el grupo 11 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Ag.

La plata es un metal muy dúctil y maleable, algo más duro que el oro, y presenta un brillo blanco metálico susceptible al pulimento. Se mantiene en agua y aire, si bien su superficie se empaña en presencia de ozono, sulfuro de hidrógeno o aire con azufre.

Posee la más alta conductividad eléctrica y conductividad térmica de todos los metales, pero su mayor precio ha impedido que se utilice de forma masiva en aplicaciones eléctricas. La plata pura también presenta el color más blanco y el mayor índice de reflexión.

Aproximadamente el 70% de la producción mundial de plata se utiliza con fines industriales, y el 30%, con fines monetarios; buena parte de este metal se emplea en orfebrería. La plata se alea fácilmente con casi todos los metales, aunque con el níquel lo hace con dificultad. Con el hierro y el cobalto no puede alearse. Incluso a temperatura ordinaria, la plata forma amalgamas con mercurio.

El metal de aleación por excelencia es el cobre, que endurece la plata si se añade a ésta hasta contenidos del 5% (lo que se conoce como plata de ley), aunque se han utilizado platas con contenidos mayores de cobre. Las adiciones de cobre no alteran el color de la plata incluso aunque se llegue hasta contenidos del 50%, aunque en este caso el color se conserva en una capa superficial que al desgastarse mostrará una aleación de color rojizo, tanto más acusado cuanto mayor sea la cantidad de cobre. También se han usado aleaciones con cadmio en joyería, ya que este elemento le confiere a la aleación una ductilidad y maleabilidad adecuadas para el trabajo del metal.

El desarrollo del zinag posee la característica de ser duro, ligero y con propiedades térmicas y mecánicas. A diferencia del acero, no sufre corrosión, y puede sustituir materiales escasos y de mayor costo como el titanio. El material se convierte en un elemento poroso, es decir, es una aleación donde la transformación tecnológica permite producir un lingote que se convierte en un

material de baja densidad que absorbe el impacto y la energía. Esto hace que tenga más aplicaciones en el sector automotriz. Además, el zinag ofrece reducción en tiempo y costo de fabricación de insumos en comparación con los materiales utilizados hoy en la manufactura automotriz como la lámina de aluminio y la fibra de vidrio.

El costo de producción del zinag puede ser hasta 60% más barato y puede variar de los 250 a 1,250 pesos por kilo según la porosidad y resistencia.

Normalmente, en el uso de la lámina de aluminio las automotrices necesitan de una prensa hidráulica para darle forma a la carrocería, más el gasto de luz y el tiempo para que quede moldeado bajo los controles de calidad que tenga cada empresa. En el caso del metal foam (espumas metálicas) los tiempos y costos se reducen al uso de menos equipo.

La aleación se utiliza de dos diferentes formas en un auto. La primera consiste en moldear el material en forma de una lámina súper plástica destinada a integrar la carrocería del vehículo.

En la segunda, la aleación es transformada en metal foam, la cual se aplica en las zonas más expuestas a colisión como las salpicaderas, defensas o laterales. Para producir el material, la aleación se somete a altas temperaturas y presión de aire, lo que al término le permite conservar sus propiedades [5].

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Producir la aleación Zn-22Al-2Ag, para posteriormente lograr soldar la aleación por el proceso FSW y evaluar el comportamiento mecánico de la unión soldada.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- ▣ Estudiar la respuesta de la soldadura FSW en la aleación (con diferente historial térmico) al variarle las revoluciones por minuto (Rpm).
- ▣ Determinar el parámetro de soldadura FSW que generó mayor refinamiento de grano.
- ▣ Se busca generar información de utilidad para aplicaciones y procesos posteriores de estas aleaciones.
- ▣ Obtener una mejor comprensión de los mecanismos que explican las relaciones proceso-evolución microestructural-propiedades mecánicas resultantes de las uniones soldadas.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en nuestro país existe una gran demanda de aluminio debido a todos los sectores industriales que lo necesitan, pero en México la producción de aluminio es aún modesta apenas del 0.04%, Una de las causas principales de esto es que la bauxita, el mineral del que se extrae el aluminio, es escasa en México. Por ello se propone comenzar a sustituir en algunos procesos el aluminio por el zinc. Por esto se propone el estudio del efecto de la soldadura FSW en la aleación Zn-22Al-2Ag para nuevas aplicaciones.

### 1.4 HIPÓTESIS

Una de las mayores ventajas de la técnica FSW es su potencial para refinar el grano a tamaños menores de una micra de las aleaciones metálicas en la zona de agitación. La reducción de grano en los materiales metálicos tiene dos ventajas significativas, la primera es un aumento de la resistencia mecánica sin pérdida de ductilidad y la segunda, si el grano alcanza un tamaño ultra fino, existe la posibilidad de lograr súper plasticidad en la zona de agitación. **Con el uso del historial térmico se busca optimizar o mejorar la unión de la soldadura así como modificar sus fases y obtener un cambio significativo en sus propiedades mecánicas.**



# MARCO TEÓRICO

## 2.1 ZINC

El zinc es un metal blanco y azulado que conduce la electricidad. Si bien puede ser un metal frágil, a una temperatura aproximada de entre 100 y 150° C se vuelve maleable, a unos 238° C logra propiedades ferromagnéticas. No obstante, en estado natural, el zinc no es un elemento ferromagnético. Sí presenta propiedades eléctricas, térmicas y ópticas que pueden resultar interesantes.

El zinc se encuentra en la naturaleza en forma de minerales, habiendo por ejemplo sulfuros de zinc (blenda), carbonatos (smithsonita) y silicatos (calamina). La extracción de zinc más frecuente se realiza cocinando sus minerales para formar óxido y luego reducir ese óxido con carbón, logrando destilar el metal [6].

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc.

El zinc puro es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, pero cantidades pequeñas de otros metales como contaminantes pueden volverlo quebradizo. Se funde a 420°C y su punto de ebullición es a 907°C [7].

### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL ALUMINIO

El aluminio es un metal ligero, con un densidad 2.7 veces mayor que la del agua. Su punto de fusión es más bien bajo, en torno a los 660°C. Su color es blanco y brillante, con propiedades óptimas para la óptica. Posee una buena conductividad eléctrica. Es resistente a la corrosión, gracias a la capa protectora característica de óxido de aluminio, resiste a los productos químicos. Es el tercer elemento en cuanto a abundancia en la corteza terrestre [8].

### 2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PLATA

Es un metal lustroso de color blanco-grisáceo. Desde el punto de vista químico. En la mayor parte de sus aplicaciones, la plata se alea con uno o más metales. Tiene un punto de fusión de 962 °C. Entre las aleaciones como componente están las amalgamas dentales y metales para cojinetes y pistones de motores [9].

## 2.2 ALEACIONES DE ZINC

Los usos más importantes del zinc los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El hierro o el acero recubiertos con zinc se denominan galvanizados, y esto puede hacerse por inmersión del artículo en zinc fundido (proceso de hot-dip), depositando zinc electrolíticamente sobre el artículo como un baño chapeado (electro galvanizado), exponiendo el artículo a zinc en polvo cerca de su punto de fusión (sherardizing) o rociándolo con zinc fundido (metalizado)[10].

Las aleaciones de zinc son las que poseen mejor área de aplicación, debido a sus particulares propiedades físicas, mecánicas y de fundido, además tienen una gran capacidad para ser revestidas mediante electrodeposición o con pintura.

Su bajo punto de fusión confiere al molde larga vida, permitiendo la producción de grandes series de piezas fundidas. La gran fluidez de esas aleaciones facilita la obtención de piezas de compleja forma y paredes finas [11].

### 2.2.1 Zinag

La Zinag es una aleación Metálica, La nueva aleación une tres metales abundantes zinc, plata y aluminio que puede ser usada para autopartes que absorban mejor los golpes pues puede estirarse o comprimirse hasta 100 veces. Puede ser usada en tres formas: espuma metálica o Metal foam, láminas

metálicas y también materiales biomédicos como los famosos clavos inoxidables para reparar fracturas de huesos.

La Zinag tiene un alto nivel de superplasticidad, que es una característica mecánica que permite que los materiales metálicos puedan deformarse hasta mil por ciento de su estado original. “Se comporta como plástico, pero es una lámina metálica” [6] [12].

Una de las grandes ventajas de la aleación Zinag, es el hecho de que no sufre corrosión como el acero, es la razón por la que este material tiene tal diversidad. Además hay varias áreas donde podría ser usado, por ejemplo sustituyendo algunos materiales escasos y muy caros en México, como el titanio.

El zinag cumple con las necesidades actuales de la industria automotriz, pues a partir de técnicas de termoformado se obtienen las estructuras que actualmente exigen los diseños de los autos.

#### a) súper plasticidad

La súper plasticidad es la propiedad que tienen algunos materiales de deformarse plásticamente en porcentajes mayores del 1000%, utilizando los mecanismos de deformación basados en el deslizamiento de la frontera de grano. Algunas de las características importantes en estos materiales súper plásticos son: el tamaño de grano menor a  $10\ \mu\text{m}$  y la ductilidad del material, así como la temperatura de trabajo de deformación a  $0.5\ T_m$ . Algunos de los principales sistemas estudiados están basados en las aleaciones de dos componentes Zn-Al, Ti-Al y Al-Mg, estos sistemas actualmente tienen aplicaciones en el área de la industria automotriz y aeronáutica, debido a su fácil conformado de piezas complejas. México es un gran productor de metales como el zinc, cobre y plata que pueden transformarse en aleaciones súper plásticas como el zinalco y el zinag. El zinalco es una aleación de composición eutectoide del sistema Zn-Al modificada con 2%Cu. Esta aleación

es sencilla de fabricar con bajos costos de producción y con propiedades mecánicas semejantes al acero estructural. El zinag otra aleación súper plástica, también inventada en México, la cual está constituida por Zn-Al con contenidos de plata de 0.5 a 4 %, de baja densidad que puede ser utilizada para diversos procesos en el área automotriz, médica, aeroespacial, industria de la construcción. El contenido de plata le otorga a esta aleación una propiedad de súper plasticidad, que la hace capaz de deformarse sin perder sus propiedades mecánicas. Al aumentar la cantidad de plata en la aleación el tamaño de grano disminuye formando una estructura homogénea y de granos equiaxiales. Con base a lo antes mencionado las características microestructurales juegan un papel importante en la deformación súper plástica de cada composición ya que al tener un mayor refinamiento de grano las condiciones de deslizamiento en la frontera de grano serán favorecidas[13,14].

### 2.3 Soldadura por fricción - agitación.

La soldadura por fricción - agitación (FSW por su acrónimo en inglés Friction Stir Welding) es una técnica para unir dos láminas o placas por medios mecánicos. Este proceso tiene grandes ventajas en la soldadura de aleaciones de aluminio que son difíciles de soldar por los procesos que involucran la fusión del material base. Mediante este proceso se pueden soldar secciones gruesas en una sola pasada, obteniéndose uniones con excelentes propiedades mecánicas. El proceso FSW no requiere fusión de los materiales a soldar para crear uniones con continuidad metalúrgica [15].

#### 2.3.1 Tipos de herramientas.

La soldadura FSW es un proceso de unión que utiliza una herramienta cilíndrica rotatoria no consumible, conformada por un pin y un hombro especialmente diseñados. Una vez que la herramienta ha adquirido las revoluciones por minuto

adecuadas, penetra lentamente los bordes continuos de las piezas a unir, generando calor debido a la fricción entre sí, después la herramienta se mueve longitudinalmente para desplazar plásticamente el material de la superficie de contacto de las piezas. Las altas energías de tensión y calor experimentadas por el metal base durante la agitación provocan la recristalización dinámica, que es la formación de nuevos granos en la zona de soldadura

El éxito del proceso FSW depende del diseño de la herramienta de soldadura. La herramienta cumple dos funciones principales: (a) calentar la pieza de trabajo y (b) producir el flujo de material. El pin debe ser de una longitud específica, varios investigadores consideran que la longitud del pin debe de ser de 3 a 2 mm menor que el espesor de las placas a soldar y la relación entre el diámetro del hombro y del pin debe estar entre 3 y 5 veces mayor. El hombro aplica una presión al material produciendo una deformación plástica en una capa relativamente delgada debajo de la superficie del hombro. Además, la geometría del hombro tiene influencia en los ciclos térmicos, las temperaturas máximas, los requisitos de potencia y el par motor. El parámetro geométrico del diámetro del hombro, que actualmente está diseñado por métodos de prueba y error [16].

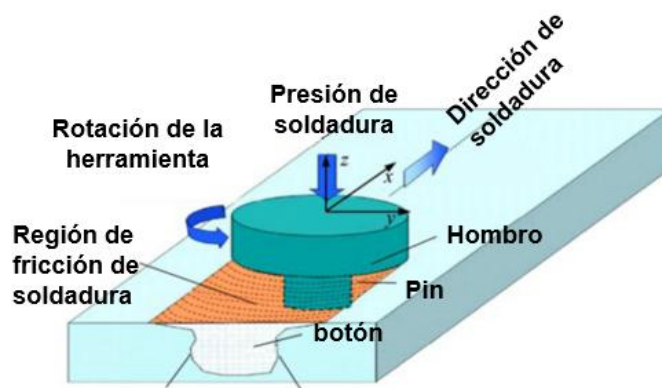


Figura 2. 1 Pin. Herramienta para realizar la soldadura por FSW.

### 2.3.2 Características del equipo.

En principio el equipo debe ser capaz de ejecutar cuatro operaciones básicas: avance longitudinal de la pieza y/o de la herramienta, ajuste vertical del husillo porta herramienta, giro del husillo sobre su eje e inclinación de éste respecto a la pieza. En particular, cuando se emplea para la puesta a punto de procedimientos, debe además permitir operar dentro de rangos suficientemente amplios de velocidades de giro y translación. Debido a los grandes esfuerzos que se producen durante la soldadura la rigidez estructural es otro requerimiento fundamental. En general para muchas aplicaciones dichas características se pueden encontrar en máquinas herramientas convencionales o ligeramente modificadas [17].

### 2.3.3 Procedimiento.

Se procede a la inserción de la herramienta hasta que el hombro de la misma hace contacto con las superficies a soldar, aplicando para el caso una fuerza axial controlada por el desplazamiento vertical de la mesa de sujeción del material a unir o del cabezal porta herramienta. El contacto provocado, genera calor debido a la fricción elevando la temperatura del sistema. La rotación y el avance de la herramienta a la temperatura de trabajo, dan como resultado la conformación de un flujo plástico de material que, favorecido por la geometría de dicha herramienta, es agitado y mezclado hasta resultar en una unión metalúrgica en fase sólida [18].

## 2.4 Soldadura por fricción lineal.

La soldadura por fricción lineal es un proceso de unión en estado sólido y sin aporte de material, que consiste en rozar un componente sobre la superficie del otro al utilizar un movimiento lineal oscilatorio. Este movimiento se produce normalmente utilizando pequeñas distancias de recorrido del orden de 1-3mm y a alta frecuencia (25-100Hz). Ello genera un calor por fricción en el plano de

contacto, y por consiguiente se genera un estado plástico en un cierto volumen de material. Durante el proceso, una parte del material viscoelástico que se formó se desplaza hasta la periferia de la interfaz de contacto, lo que se suele llamar "flash" de material expulsado [19].

#### 2.4.1 Secuencia del proceso.

**Fase inicial:** Los dos materiales se ponen en contacto bajo presión, las dos superficies a unir son ásperas y el calor se genera de la fricción. El área de contacto verdadero aumenta perceptiblemente a través de esta fase debido al desgaste de la parte áspera. Si la velocidad de frotamiento es demasiado baja para una fuerza axial dada, el calor de la fricción no será lo bastante elevado y se perderá a través de la conducción y de la radiación. Esto conducirá a un insuficiente ablandamiento térmico.

**Fase de transición:** Si se ha producido el calor necesario durante la fase anterior para ablandar la interfaz del material, las partículas grandes del desgaste comienzan a ser expelidas de la interfaz y la zona afectada por el calor se amplía para seguir en la fase III. El área de contacto alcanza el 100% del área seccionada transversalmente. La capa plastificada (blanda) formada entre los dos materiales no puede soportar la carga axial.

**Fase de equilibrio:** Después de la etapa II, las piezas comienzan a disminuir de tamaño como resultado del material expelido. El calor generado por los enlaces rotos y sus cambios se transfiere lejos de la interfaz y una zona plástica aparece. En la capa plastificada formada en la interfaz, el sistema local de tensiones con la ayuda del movimiento oscilatorio saca el material de la interfaz en el flash o rebaba.

Las inestabilidades pueden aparecer en esta etapa, debido a la distribución desigual de la temperatura. Si la temperatura aumenta excesivamente en una sección de la interfaz lejos de la línea central de la oscilación, la capa plastificada crece en esa sección generando una mayor cantidad material plástico extruido.

**Fase de desaceleración:** El movimiento de traslación cesa y las dos piezas a unir se someten a un esfuerzo de forja mientras se enfría la unión, en esta fase se consolida la soldadura [20].

#### 2.4.2 Influencia de la velocidad rotacional (rpm).

Se ha establecido que una soldadura satisfactoria puede ser realizada para una amplia gama de materiales y tamaños, con velocidades periféricas en el intervalo de alta y baja. Las velocidades más bajas no son recomendables debido a los altos pares desarrollados, mientras que una velocidad más alta produce una amplia zona afectada por el calor. La velocidad de rotación tiene una influencia importante en la temperatura del estado estacionario alcanzado en el proceso. La tasa de generación de calor y la disipación de calor se equilibran entre sí en un valor constante que depende de la configuración del proceso, particularmente la velocidad de rotación. Este factor importante en la soldadura de metales diferentes, donde es posible formarse compuestos inter-metálicos. El mejor procedimiento para bajar la temperatura pico sería adoptar velocidades más bajas de rotación [21].

##### 2.4.2.1 Influencia de la presión axial.

La presión es un parámetro importante en la soldadura por fricción, influye en el gradiente de temperatura, así como el par motor y la potencia. La presión de calentamiento elegida debe ser la suficiente para mantener las superficies en contacto íntimo y evitar la contaminación atmosférica, dependiendo también la presión de los materiales que se están soldando y su tamaño. Una baja presión aumenta la zona afectada por el calor debido a la entrada de una insuficiente potencia, mientras que una alta presión haría extruir los materiales plásticos prematuramente, forzando al material frío a entrar en contacto, obteniendo eventualmente defectos en la unión. La presión de forja depende de la resistencia en caliente de las aleaciones a unir. La presión elegida para esta operación debe ser suficiente para consolidar la unión.



#### 2.4.2.2 Influencia del tiempo de calentamiento.

La duración del calentamiento se considera como el tercer parámetro básico del proceso, aunque depende de la velocidad de rotación y presión. La duración del calentamiento determina la entrada de energía en la unión y se rige por la deformación plástica de los materiales [22].

### 2.5 Características microestructurales

El proceso FSW produce una unión con diferentes zonas bien definidas conocidas como: A) material base “BM” por su acrónimo del inglés Base-Metal B) zona afectada por el calor “HAZ ” (por su acrónimo del inglés Heat-Affected-Zone), C) zona afectada termomecánicamente “TMAZ” (por su acrónimo del inglés Thermos-Mechanically-Affected-Zone) y D) zona dinámica recristalizada “DXZ” (por su acrónimo del inglés Dynamic-Recrystallized-Zone) o zona de agitación “SZ” (por su acrónimo del inglés stirred zone). En la “SZ” consiste en granos equiaxiales finos, debido a la recristalización producida por la extrusión y forja del material a altas velocidades de deformación. Adyacente a esta zona se encuentran TMAZ y HAZ. En la TMAZ se distingue por una estructura por grano alargado, plásticamente deformado a altas temperatura causadas en la SZ. La HAZ es la región fuera de la soldadura que ha sufrido un ciclo térmico desde el proceso de soldadura. También hay un lado de avance y retroceso de la soldadura asociado con FSW. El lado de la soldadura en el cual la rotación de la herramienta y dirección de avance es el mismo se considera el lado de avance. El lado de la soldadura en el cual la rotación de la herramienta y la dirección de avance son opuestas se le considera el lado de retroceso.

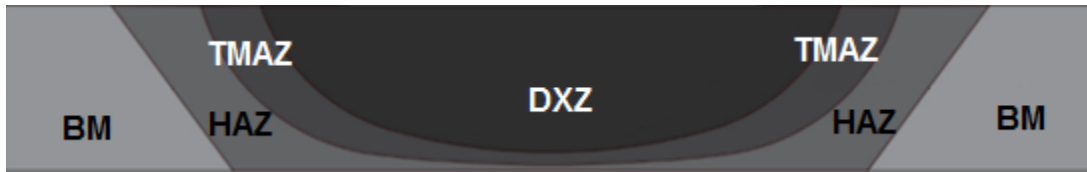


Figure 2.2.- Esquema de las diferentes zonas generadas al realizar FSW.

La microestructura de la soldadura por fricción - agitación depende de algunos aspectos como la velocidad de rotación y avance, la presión, el material y el diseño de la herramienta, pero uno de los factores clave que controla la microestructura de la unión es la temperatura generada durante la soldadura.

Esto hace que sea difícil describir la microestructura en general. Sin embargo, se desarrolló un esquema donde esta divide la sección transversal en 4 partes.

#### A. Metal base (material no modificado)

Esta región se encuentra a una distancia del centro de la soldadura y no se ve afectada por el calor generado. Aunque el metal puede haber sufrido un ciclo térmico, no se ve afectada por dicho ciclo. Esto significa que las propiedades mecánicas y la microestructura no cambian.

#### B. Zona afectada por el calor (HAZ)

Se trata de una región un poco más cerca del centro de la soldadura y sin duda ha experimentado un ciclo térmico, por lo que las propiedades mecánicas y la microestructura se ven afectados por ella, pero no muestran ninguna deformación plástica. Los cambios en las propiedades en esta zona, son comparados a los cambios de esa misma zona para otros procesos químicos, y su forma es típicamente trapezoidal.

#### C. Zona afectada termomecánicamente (TMAZ)/ zona no recristalizada

Esta región tiene un cambio en las propiedades mecánicas y/o en la microestructura, pero en contraste con la HAZ, la TMAZ si tiene una deformación plástica. El tamaño de grano es similar al tamaño de grano en metal base.

#### D. Zona de la soldadura (DXZ)/zona recristalizada

Esta es la parte de la TMAZ que se ha recristalizado. El tamaño de grano en esta zona es más pequeño que el tamaño de grano en el metal base. El tamaño de grano en esta zona es diez veces más pequeño que en el material base, lo que tiene un efecto beneficioso sobre las propiedades mecánicas [23].

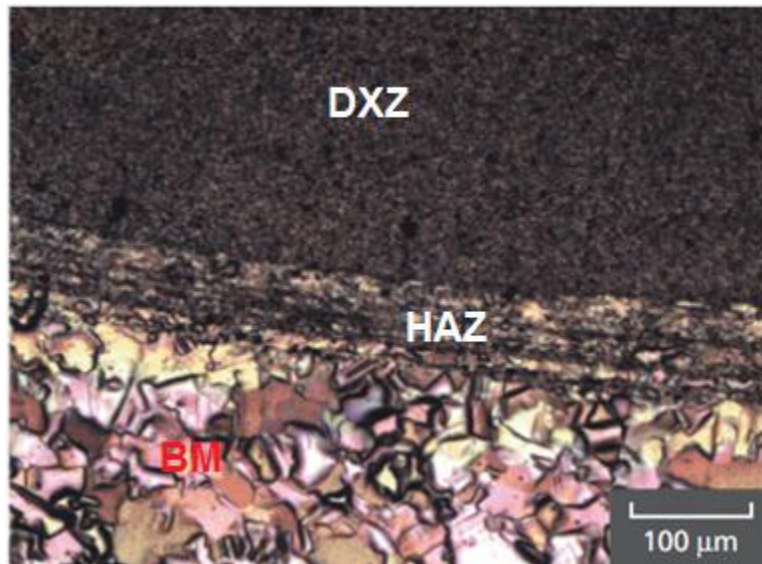


Figura 2. 3 Microestructura de la soldadura por fricción – agitación.

## Ensayos mecánicos utilizados para evaluar las uniones soldadas

### 2.6.1 Ensayo de microdureza

Es un método que mide la resistencia de un material a la deformación plástica o a la penetración de un indentador. La indentación producida por este método es tan pequeña que se observa con ayuda de un microscopio óptico para ser medida y

cuantificada. Es un método que se utiliza para medir la resistencia de un material al ser penetrado.

Este ensayo consiste en generar una indentación muy pequeña para medir la dureza de muestras de pequeño tamaño. Esto se hace aplicando cargas muy pequeñas. Los ensayos de microdureza son ensayos de precisión. Para este tipo de ensayos, la carga aplicada varía entre 1 y 1,000 grf. El principal inconveniente es que necesitan una gran preparación superficial del material a probar, llegando al pulido metalográfico, también denominado “acabado espejo”.

Existen tres tipos de ensayo de microdureza: Knoop, Vickers y Ultrasonido. En los ensayos Knoop y Vickers se relaciona la carga aplicada y el área dejada en la indentación. En el de ultrasonido se mide el cambio en frecuencia debido a la profundidad de la indentación. La profundidad máxima obtenida en estos ensayos es menor a  $19\mu\text{m}$ . (0.019 mm) [24].

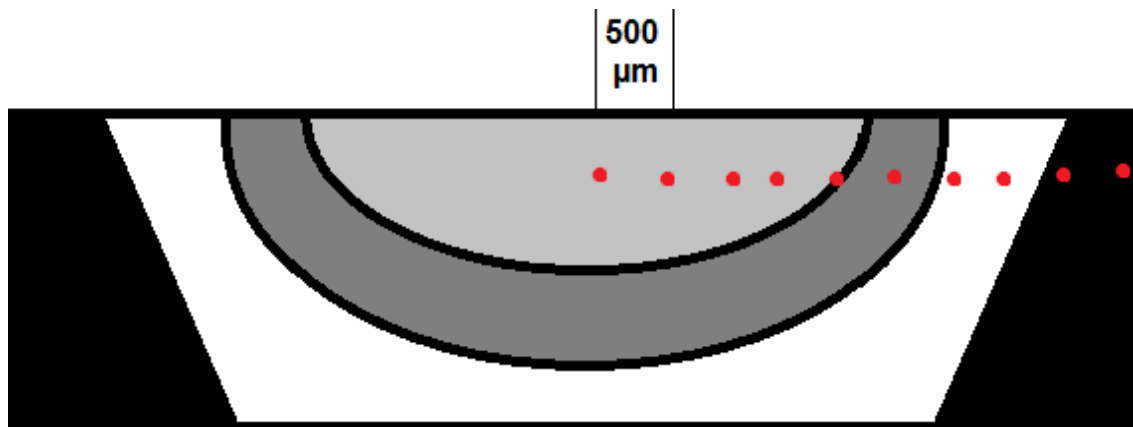


Figura 2. 4 Barrido de 10 indentaciones realizadas después de la FSW.

## 2.7 Ensayos de tensión

Este ensayo es uno de los ensayos mecánicos más comunes de esfuerzo-deformación. En este, se mide la resistencia que tiene un material a una fuerza estática o que es gradualmente aplicada, esto se hace con la finalidad de

determinar propiedades mecánicas de los materiales tales como la resistencia, ductilidad, tenacidad, módulo elástico y endurecimiento por deformación.

Dicho ensayo se basa en la deformación de un espécimen de prueba típica normalizado, en E.U., el espécimen se prepara de acuerdo con las especificaciones de la ASTM (por sus siglas en inglés), en otros países se prepara según las especificaciones apropiadas de las organizaciones correspondientes.

Aunque la mayor parte de los especímenes de prueba a la tensión son sólidos y redondos, algunos pueden ser de hoja plana o tubular; esta prueba realmente se puede aplicar a cualquier tipo y tamaño de muestra, únicamente se necesita convertir la fuerza en esfuerzo y la distancia (entre marcas calibradas) en deformación.

Normalmente, el espécimen cuenta con una longitud calibrada original  $L_0$  y un área transversal  $A_0$ . Durante el ensayo, en la región más estrecha del centro, se confina la deformación o fractura, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud. El maquinado de las proveas a utilizar para los ensayos de tensión, se realizó en base a datos obtenidos del artículo Superplasticity of Friction-stir-welded Al-Mg-Sc Alloy with Ultrafine-Grained Microstructure Obtained by Warm Severe Plastic Deformation, ver figura 2.5.

#### Procedimiento de ensayo

La probeta se sujeta de sus extremos en las mordazas de la máquina de ensayo; esta se diseña para alargar la probeta con velocidad constante, y para medir continuamente y simultáneamente la carga instantánea aplicada (celda de carga) y el alargamiento resultante (extensómetro). El ensayo dura varios minutos y es destructivo, es decir, la probeta del ensayo es deformada de forma permanente y a menudo rota.

Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina de tensión universal Shimadzu, así como los parámetros utilizados en el ensayo fueron un avance de 0.002 mm/min, Los resultados del ensayo se registran mediante un software como

carga en función del alargamiento. Dichas características de carga-deformación dependen del tamaño de la probeta [25].

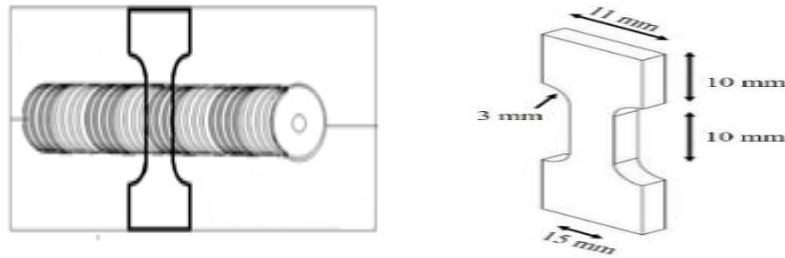


Figura 2. 5 Corte y diseño de las probetas para ensayos de tensión.

## 2. 8 Análisis metalográfico

La metalografía es la parte de la metalurgia que se encarga de estudiar las características estructurales o de constitución de los metales y aleaciones, para relacionarlos con las propiedades físicas, mecánicas y químicas de estos; puede ser utilizada tanto en investigación científica como para el control de la calidad [26].

A través de este estudio se puede determinar diversas características que pueden modificar las propiedades mecánicas del metal o aleación, tales como: el tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas, micro cavidades de contracción y escorias. Es posible obtener un diagnóstico y/o pronóstico a partir de un análisis metalográfico.

Cabe mencionar, que dicho análisis puede realizarse antes de que la pieza sea destinada a un propósito, con la finalidad de prevenir inconvenientes durante su funcionamiento, o bien puede realizarse sobre piezas que han presentado una falla durante su servicio (piezas deformadas, rotas o gastadas), en este caso, la finalidad del estudio es determinar la causa que produjo la anomalía [27].

La importancia de observar micrográficamente un metal, se debe a la influencia con que actúan los componentes químicos de la aleación, estos pueden

encontrarse en forma de una solución sólida homogénea, en forma de un compuesto intermetálico de composición química definida, dispersa en el seno de una solución sólida, en forma de una mezcla eutéctica.

Dicho componente recibe el nombre de constituyente metalográfico y las propiedades físicas de una aleación dependen de sus proporciones, formas y estados. Es por esto que el desarrollo de la técnica que nos permite observar dichos constituyentes deberá ser objeto de un trabajo consciente y minucioso.

El primer paso dentro de esta técnica metalográfica es determinar la zona micrográfica a estudiar y la cual deberá ser representativa del fenómeno a observar, teniendo en cuenta la forma, función y origen del material. A su vez hay que considerar que para una adecuada observación e interpretación del problema, es necesario elegir más adecuados reactivos de ataque y aumentos que nos permitan realizar dicha tarea y esta decisión puede ser tomada en base a la experiencia que se tenga [28].

Se puede decir que el objetivo de la preparación de una muestra metalográfica revela la estructura real, llamando teóricamente estructura real a aquella muestra que no posee deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, aplastamientos, relieves, bordes redondeados y daños térmicos, pues la obtención de una superficie perfectamente plana y con pulido espejo, nos permitirá llegar a una examinación más precisa, aunque esto depende exclusivamente de la prolijidad y esmero con que se realice esa tarea, siguiendo un método sistemático de preparación y haciendo uso de las técnicas habituales.

En resumen, el análisis metalográfico incluye cinco etapas que incluyen: selección, montaje, preparación, ataque y observación [29,30].

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Con el propósito de obtener una aleación de composición súper plástica se procedió a fundir dos kg de aleación base con la siguiente composición química 76% en peso de Zinc, 22% en peso de Aluminio y 2 % de Plata. Para posteriormente ser tratadas térmicamente y soldada por el método de FSW, para

la caracterización de las uniones soldadas se realizaron metalografías, barrido lineal de microdureza, ensayos de tensión y etc... Caracterizada para verificar que propiedades mecánicas se obtuvieron después de la soldadura.

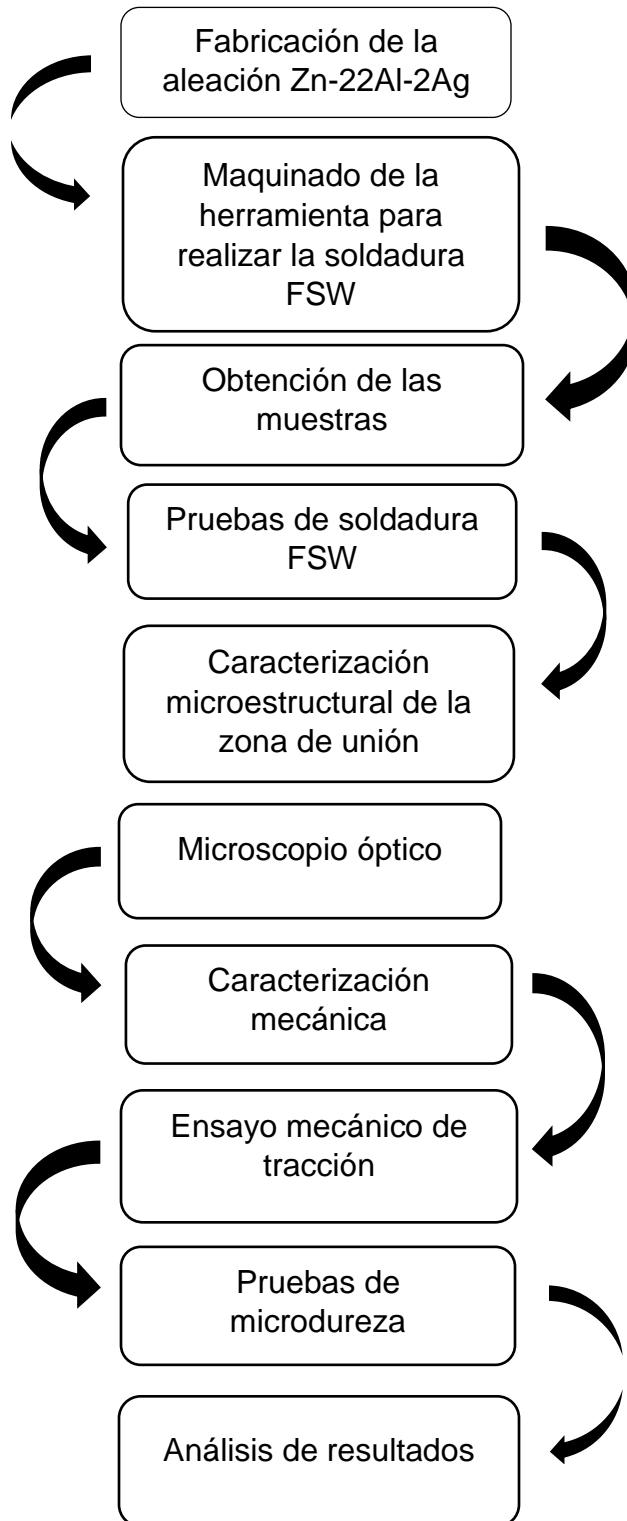




Figura 5. Diagrama experimental.

### 3.1 Peso y corte del metal

Los metales a pesar son zinc, aluminio y plata con un peso de 2 Kg en total. Con los siguientes %: Zn=1520 gr, Al=440gr, Ag=40 gr.

Elemento	% en peso
Zn	1520 gr
Al	440 gr
Ag	40 gr

Tabla 3. 1 Elementos aleantes y cantidades de estos.

Cada pieza de metal fue cortada a longitudes equivalentes a los pesos requeridos para la fabricación de nuestra aleación base. Se pesó la masa correcta de cada metal hasta una exactitud de 0.0001 gr, para obtener 2 kg de aleación para trabajo a escala de laboratorio. El proceso se hizo pesando primero los aleantes. Es importante aclarar que para obtener una aleación con una composición determinada, se necesita ser muy exacto con las masas, ya que las características de la aleación se pueden ver seriamente afectadas.



Figura 3. 1 Elemento utilizado en la aleación plata.

### 3.2 Obtención de la aleación Zn-22Al- 2Ag

La fundición de nuestra aleación base, se realizó en un horno de piso el cual funciona con resistencias eléctricas, el cual llega a una temperatura de hasta 1,300 °C, pero en esta ocasión solo fue necesario elevar la temperatura a 850 °C, esta temperatura se mantuvo por un tiempo de 30 minutos hasta que nuestro metal estuviera completamente fundido.



Figura 3. 2 Fundición de la aleación base.

Simultáneamente que se estaba llevando acabo la fundición de nuestra aleación se metió a otro horno de piso de resistencias eléctricas nuestra lingotera de acero a precalentar a una temperatura de 400 ° C esto con el fin, de al momento que

vaciamos la aleación evitar el choque térmico con la lingotera y nuestro metal fluya mejor y llene en su totalidad la lingotera.



Figura 3. 3 Vaciado de la aleación fundido en lingotera.

### 3.3 Aplicación de la soldadura FSW

El proceso de soldadura FSW se realizó para una aleación de Zn-22Al-2Ag, para la cual se utilizó una herramienta que fue diseñada para acoplarse a la fresadora, dicha herramienta fue hecha de acero 1045, esta herramienta presenta una configuración de pin cónico y hombro las cuales tienen los siguientes parámetros: hombro 16 mm, pin mayor 7.14 mm, pin menor 5.08 mm.

La soldadura por fricción FSW se aplicó sobre el material Zn-22Al-2Ag con 6 combinaciones diferentes de velocidades de rotación y avance, de esto se obtuvieron 8 probetas, las velocidades de rotación fueron 900 rpm 1100 rpm, 1200 rpm y 1300 rpm, 1500 rpm, 1600 rpm con avance .6 mm/min.

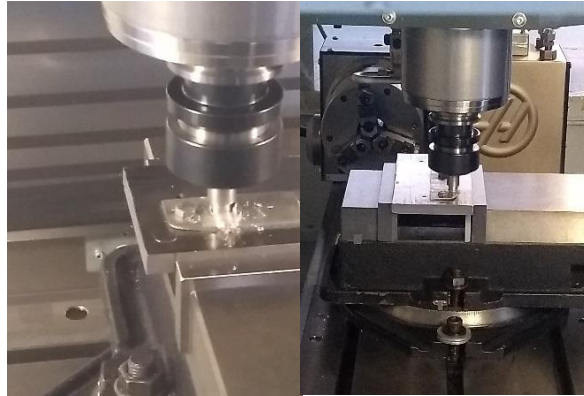


Figura 3. 4 Aplicación de la soldadura FSW.

### 3.4 Caracterización

Se cortaron 8 probetas de la sección transversal de la soldadura para la examinación metalográfica las cuales fueron desbastadas con lijas para agua, iniciando con la de 100 hasta terminar con la 1200, después fueron pulidas en paño iniciando con alúmina de  $0.5 \mu\text{m}$ . una vez terminado el proceso de pulido, las muestras fueron atacadas químicamente utilizando oxido crómico, sulfato de sodio y agua destilada, se sumergieron las probetas en el reactivo por un tiempo de entre 10 y 20 segundos. La observación de la caracterización metalográfica en las probetas fue observada en un microscopio óptico.

### 3.5 Ensayos de tensión

A partir de las muestras soldadas por FSW, se fabricaron las probetas de tensión con las dimensiones reportadas en el artículo Superplasticity of Friction-stir Welded Al-Mg-Sc sheets with ultrafine-grained microstructure, para los efectos prácticos de este trabajo se decidió utilizarlas ya que han demostrado dar resultados confiables en estudios anteriores.

Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina de tensión Shimadzu MWG con una capacidad de 100 KN, esta cuenta con un tipo de mordazas especiales en las que se embonan perfectamente las probetas para asegurar la correcta sujeción de las mismas. Se utilizó una velocidad de deformación de  $.002 \text{ mm/min}$ .



Figura 3. 5 Ensayos de tensión.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

### RESULTADOS

En este capítulo se presentan para su posterior discusión los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y análisis de la caracterización de la aleación Zn-22Al-2Ag después de ser soldada por el proceso FSW, así como los resultados de la variación de las Rpm realizadas en los ensayos de soldabilidad.

#### **Análisis químico mediante espectrometría de chispa**

La tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a cinco muestras diferentes de la misma aleación mediante espectrometría de chispa.

Tabla 4. 1 Resultados del análisis químico.

Zn %	Al %	Ag %	Ni %	Ti %
75.82	21.72	1.91	0.057	0.052

### Evaluación microestructural de la aleación Zn-22Al-2Ag.

La figura (A) nos muestra la estructura dendrítica propia de las aleaciones Zn-Al. (B) brazos de dendritas equiaxados y plata interdendrítica ver figura 4.1.

Una razón para explicar esto es la siguiente: durante la solidificación el primer sólido en formarse es la fase  $\alpha$ ; el zinc es muy soluble en la fase  $\alpha$  mientras que la solubilidad de la plata en esta fase es muy pequeña. Este efecto produce una saturación de la fase  $\alpha$  por el zinc, creando un potencial químico que sirve como barrera a la entrada de la plata, al disminuir más la temperatura de solubilidad de la Ag en  $\alpha$  es mucho menor, resultando que casi toda la Ag se queda en el líquido que al solidificar forma la región interdendrítica. Entonces, la fase rica en Al se endurece principalmente por precipitados de Zn y no de Ag. Esto repercute en la deformabilidad de esta aleación, pues la alta dureza de esta fase (dendritas) hace que esta se comporte rígidamente durante la deformación deslizándose entre las fases blandas interdendríticas ricas en plata.

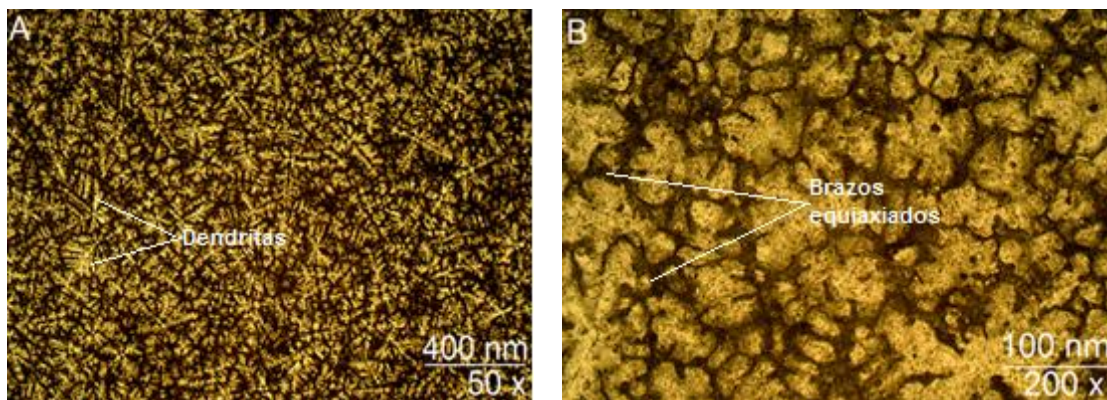


Figura 4. 1 Microestructura de una aleación de Zn-22Al-2Ag en condiciones de fundición atacada con Kellers durante 10 segundos: (A) 50x y (B) 200x.

## Evaluación microestructural de la aleación Zn-22Al-2Ag al ser soldada por FSW.

900 Rpm.

0.6 avance.

La figura (A) nos muestra la zona de soldadura o la zona de recristalizada (DXZ) donde podemos observar dos defectos en la unión, los cuales pueden ser generados por una falta de temperatura en el proceso o generada por la herramienta (pin). (B) observamos perfectamente el cambio microestructural en las dos zonas diferentes presentes la TMAZ y la zona HAZ esto debido al proceso de soldadura. (C) y (D) nos muestran las siguientes zonas presentes en nuestra unión soldada la zona HAZ y BM ver figura 4.2.

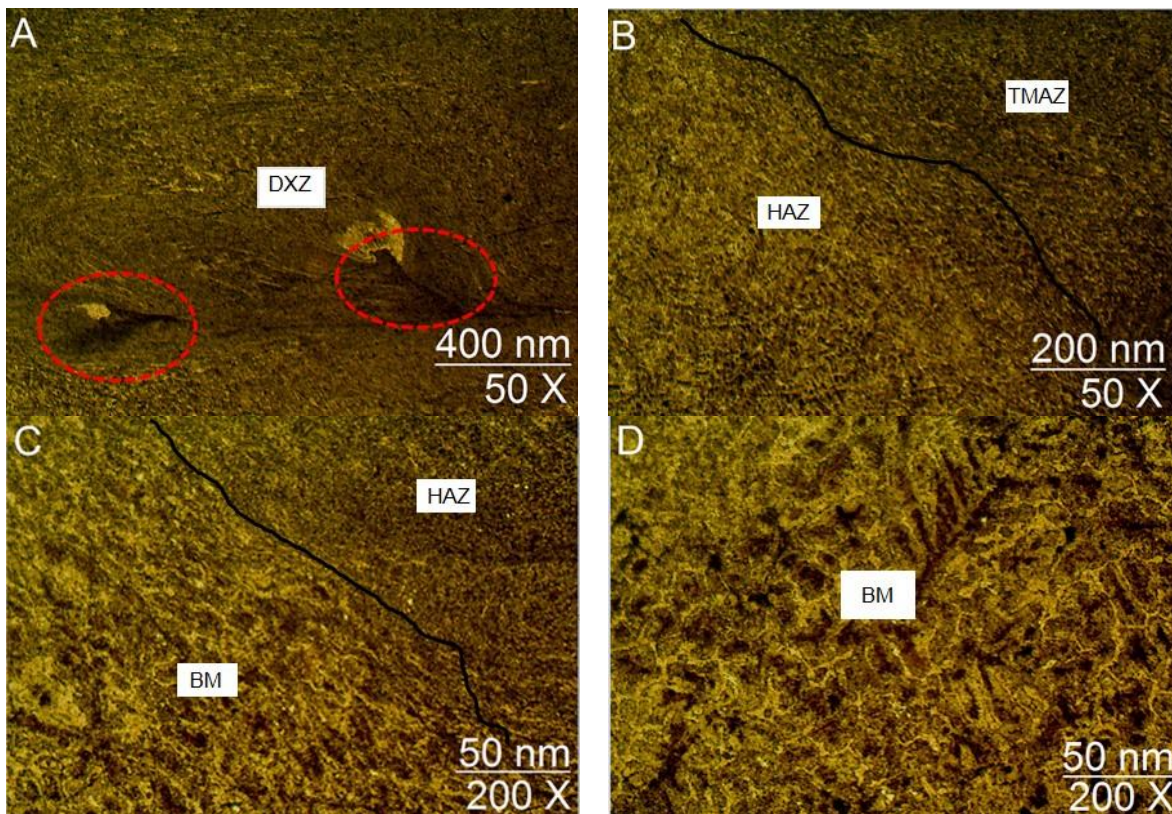


Figura 4. 2 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 900 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: (A) 50x, (B) 50x, (C) 200x y (D) 200x.



1100 Rpm.

0.6 avance.

La figura (A) nos muestra el centro de la unión soldado, donde podemos observar que se presenta una unión más homogénea en comparación de la figura 4.2, ya que solo presenta un defecto en la unión. (B) nos muestra una zona más lejana de la unión donde podemos observar cambios microestructurales debido al proceso de soldadura, se ven definidas las zonas TMAZ y la zona HAZ. (C) y (D) fue tomada en la zona del metal base donde podemos observar que ya no hay cambios microestructurales ni afectaciones por el proceso de soldadura.

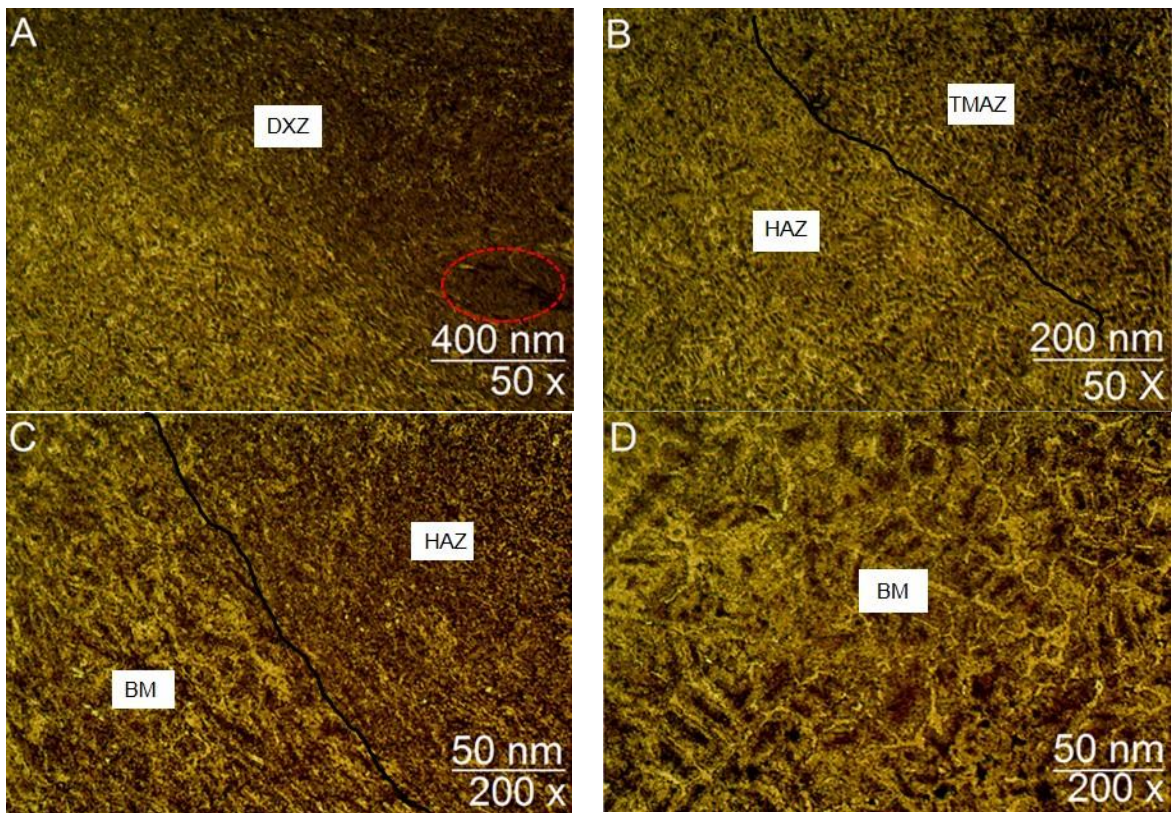


Figura 4. 3 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1100 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: (A) 50x, (B) 50x, (C) 200x y (D) 200x.

**1200 Rpm.**

**0.6 avance.**

La figura (A) nos muestra la zona DXZ de la unión soldado, donde podemos observar que en esta zona no tenemos ningún defecto, se presenta una unión homogénea y no presenta discontinuidades en la unión. (B) nos muestra los cambios microestructurales (tamaño de grano) presentes en las zonas TMAZ y HAZ. (C) y (D) fue tomada en la zona del metal base donde podemos observar que ya no hay cambios microestructurales ni afectaciones por el proceso de soldadura.

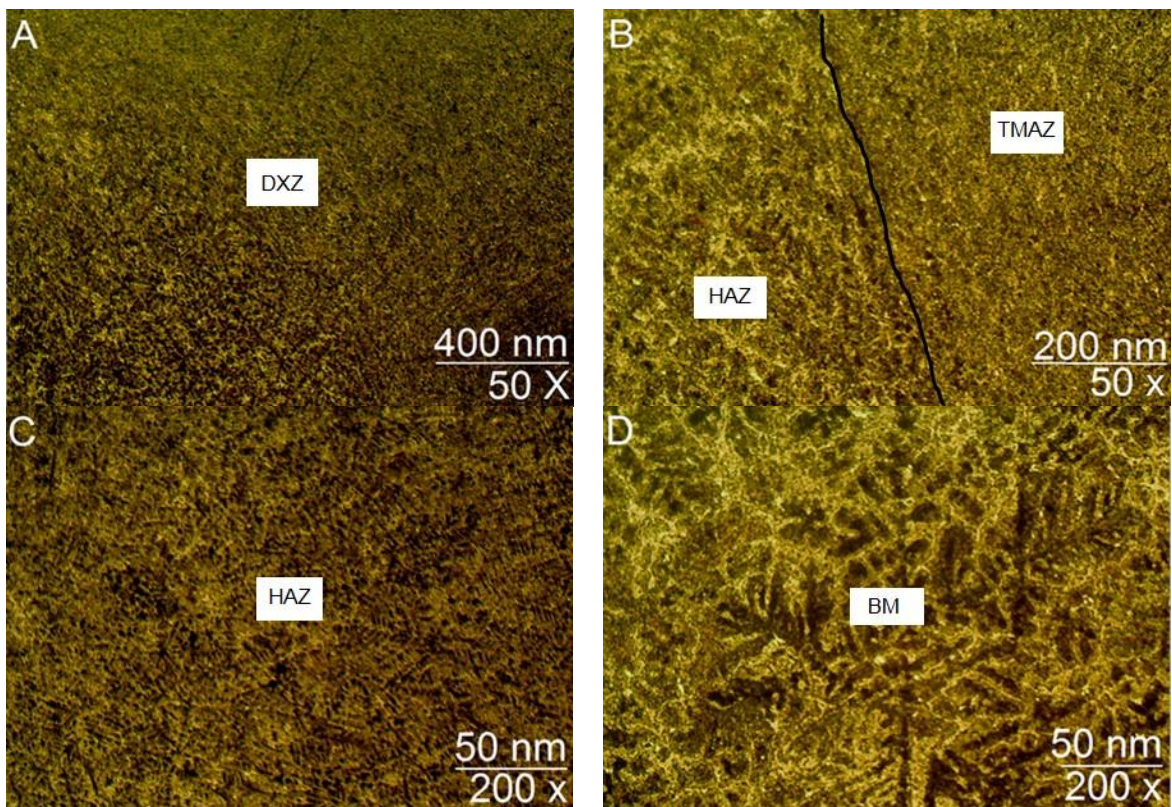


Figura 4. 4 . Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1200 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: **(A)** 50x, **(B)** 50x, **(C)** 200x y **(D)** 200x.

**1300 Rpm.**

**0.6 avance.**

La figura (A) nos muestra el centro de la unión soldada perteneciente a la zona DXZ, donde podemos observar que se presenta una unión homogénea y no presenta discontinuidades en la unión. (B) nos muestra la zona TMAZ. (C) zona HAZ y (D) la zona de MB.

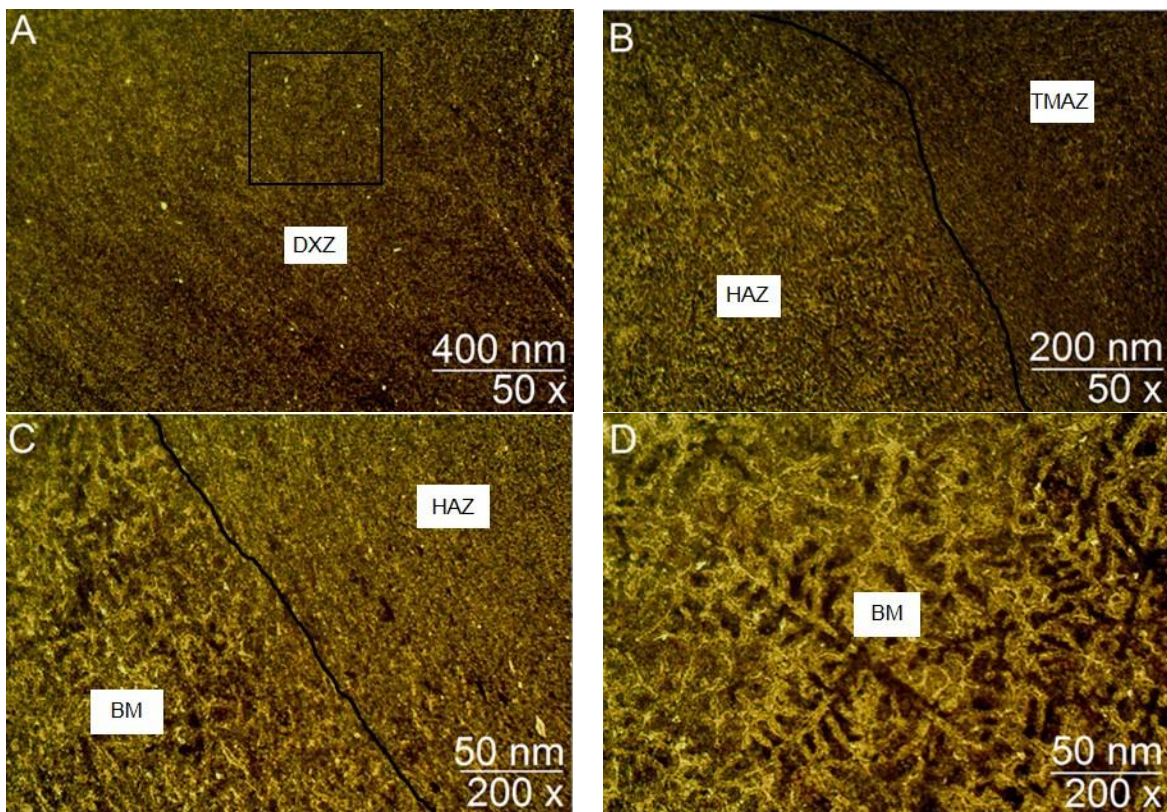


Figura 4. 5 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1300 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: (A) 50x, (B) 50x, (C) 200x y (D) 200x.

**1500 Rpm.**

**0.6 avance.**

La figura (A) perteneciente a la zona DXZ se observa que aparecen dos discontinuidades en la unión esto llamado defecto de túnel. (B) TMAZ nos muestra una zona más lejana de la unión donde podemos observar cambios microestructurales como el tamaño de grano, también esto debido al proceso utilizado para realizar la unión. (C) la zona del HAZ y (D) nuestro metal base.

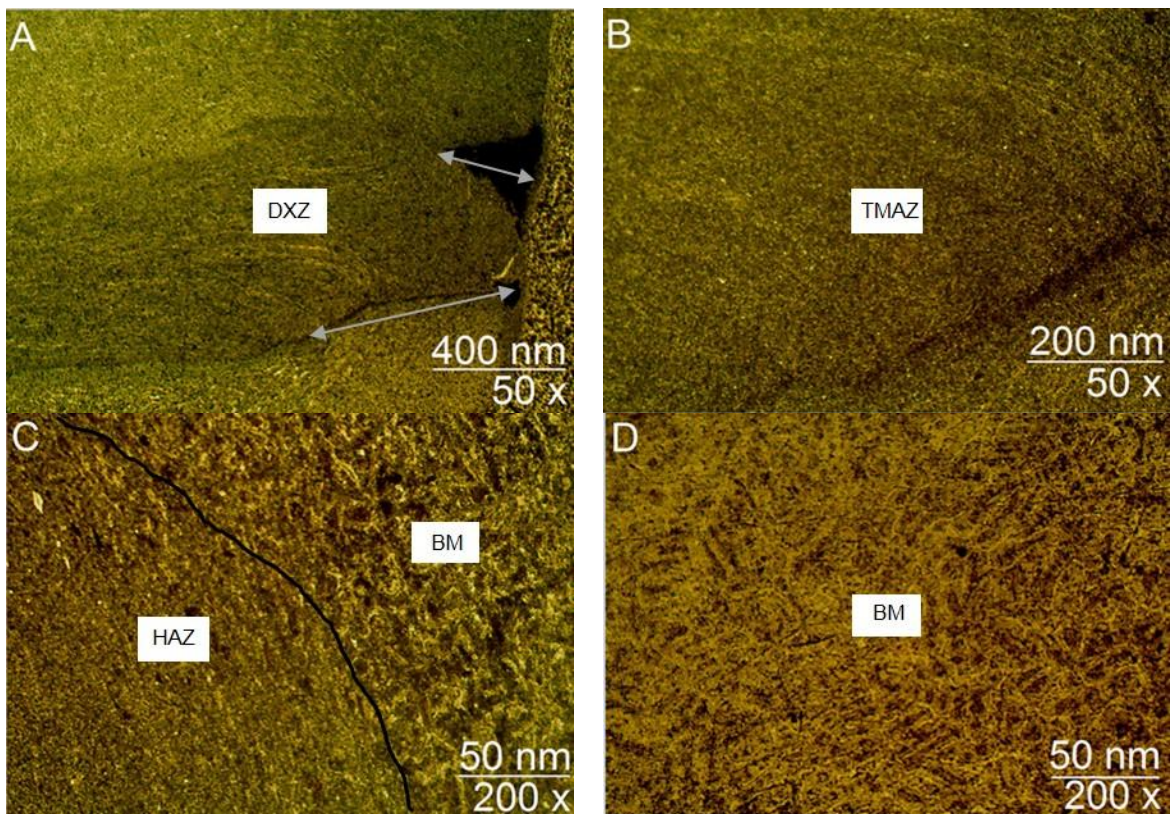


Figura 4. 6 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1500 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: **(A)** 50x, **(B)** 50x, **(C)** 200x y **(D)** 200x.

1600 Rpm.

0.6 avance.

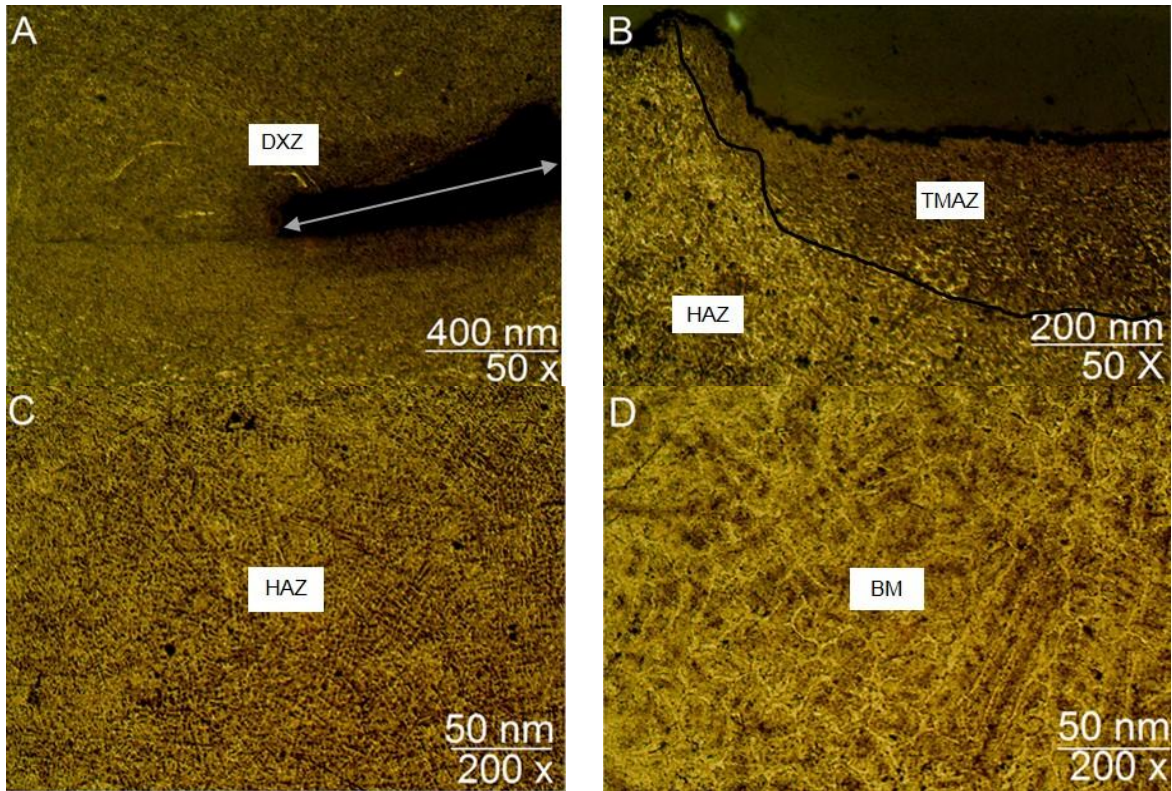


Figura 4. 7 Microestructuras tomadas a la unión soldada de la aleación Zn-22Al-2Ag a 1600 Rpm y un avance de 0.6 pulgadas/minutos: (A) 50x, (B) 50x, (C) 200x y (D) 200x.

## Microdureza

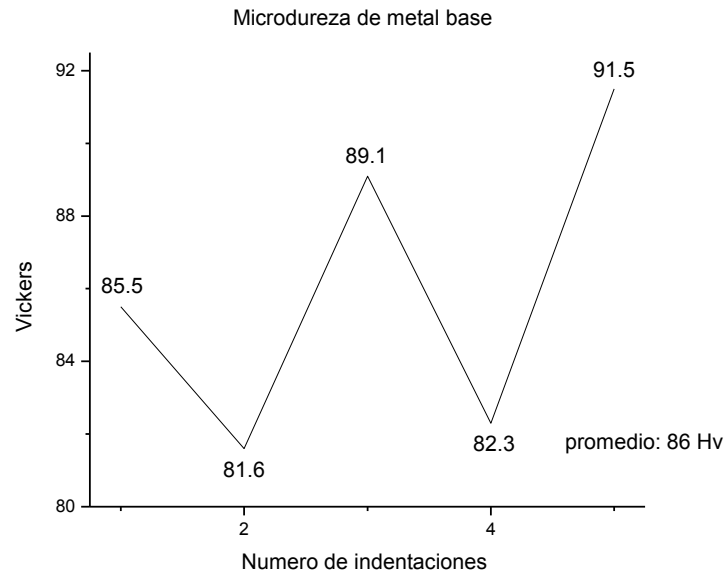


Figura 4. 8 Resultado de las pruebas de microdureza realizadas al metal base.

La grafica anterior nos muestra el resultado de las pruebas de microdureza que se le realizaron al metal base en esta caso fueron cinco indentaciones con una separación entre cada indentación de 500  $\mu\text{m}$  de lo cual tenemos un promedio de 86 Hv.

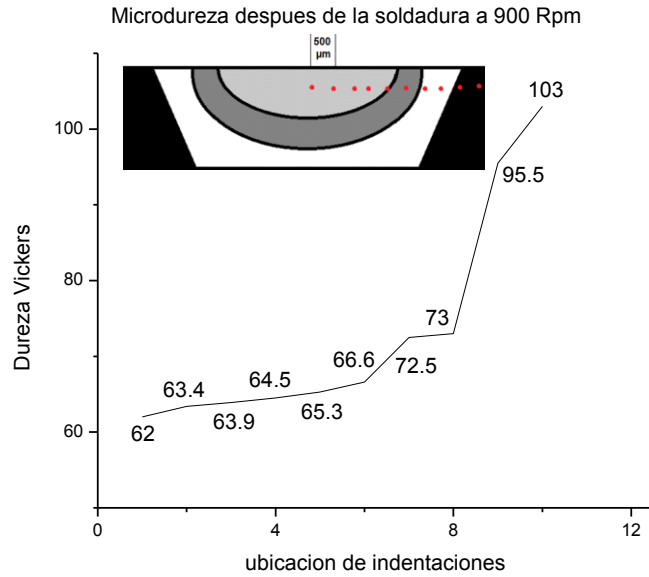


Figura 4. 9 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 900 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 900 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.

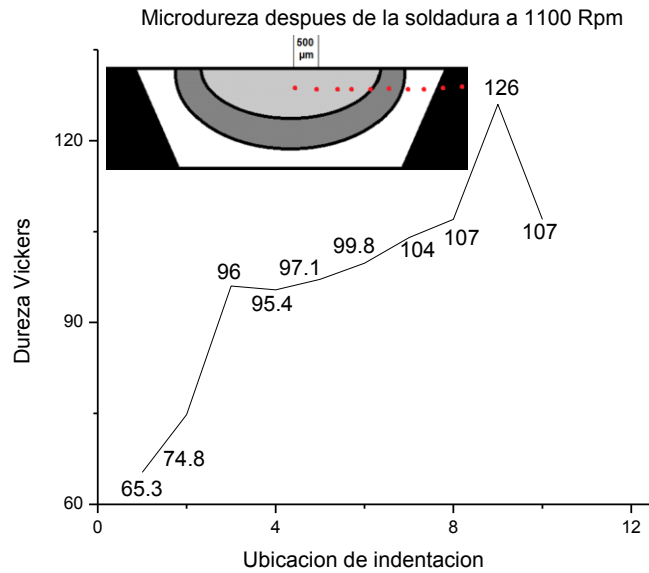


Figura 4. 10 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1100 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 1100 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.

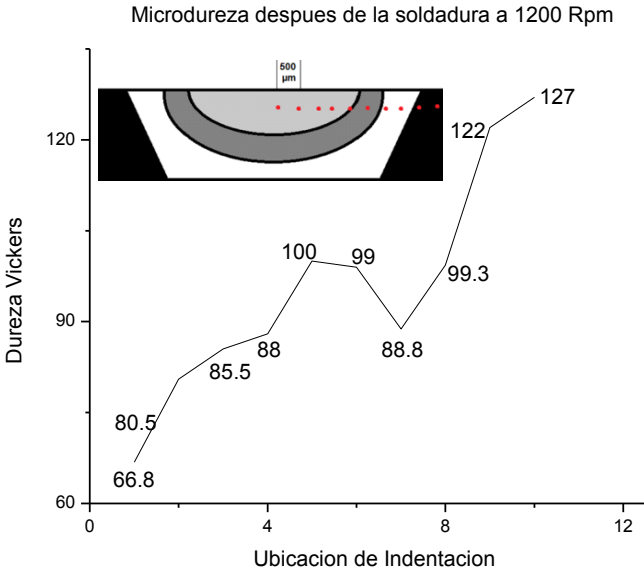


Figura 4. 11 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1200 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 1200 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.



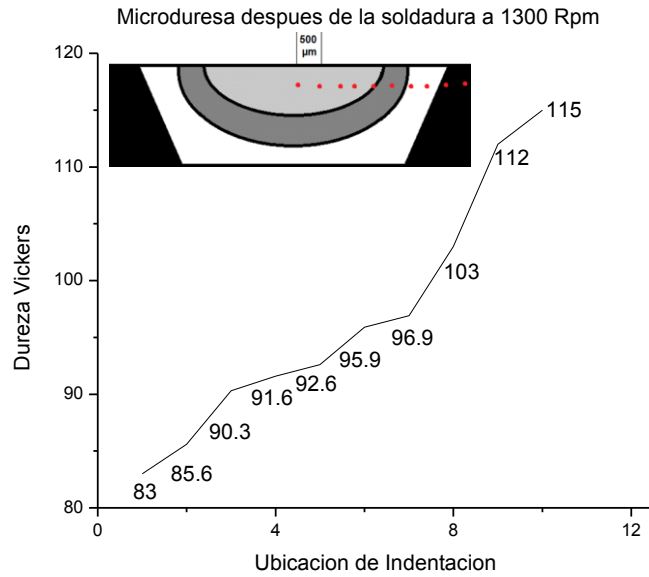


Figura 4. 12 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1300 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 1300 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.

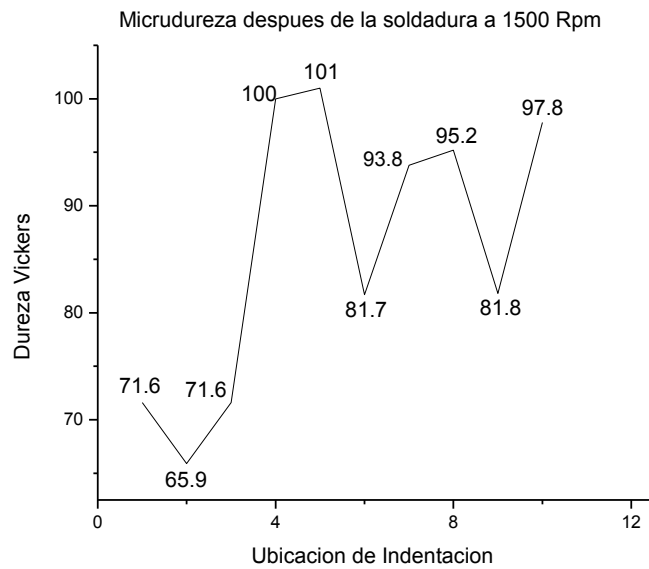


Figura 4. 13 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1500 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 1500 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.

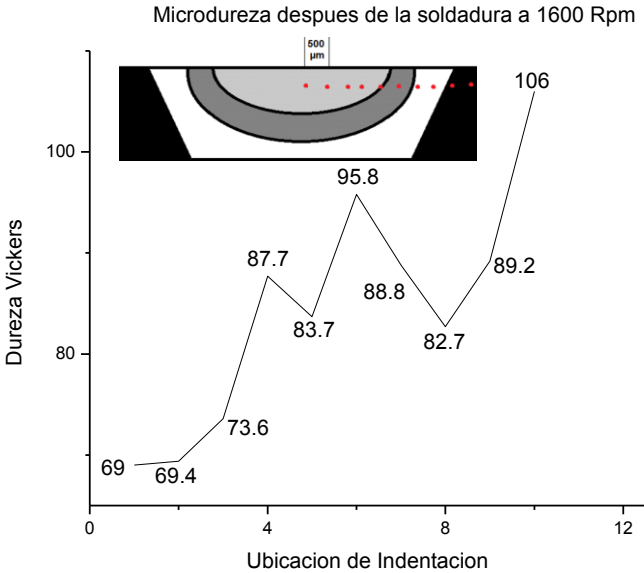


Figura 4. 14 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1600 Rpm.

La grafica anterior nos muestra los resultados de los ensayos de microdureza realizados a la unión soldada a 1600 Rpm, se realizó un barrido de diez indentaciones del centro de la unión hasta el metal base.

## Pruebas de tensión

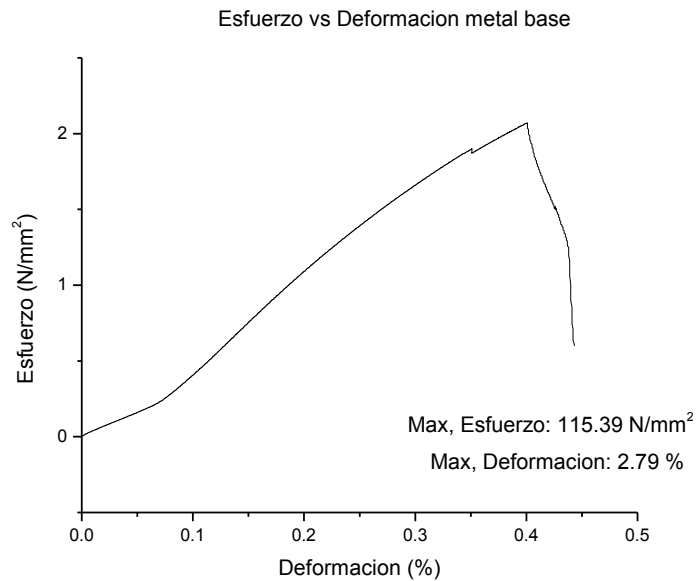


Figura 4. 15 Esfuerzo vs Deformación metal base.

Al analizar la gráfica anterior se puede determinar que la aleación Zn-22Al-2Ag en condiciones de vaciado tiene en sus propiedades mecánicas un máximo esfuerzo de 115.39 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 2.79 %.

### Resultados de los ensayos de tensión

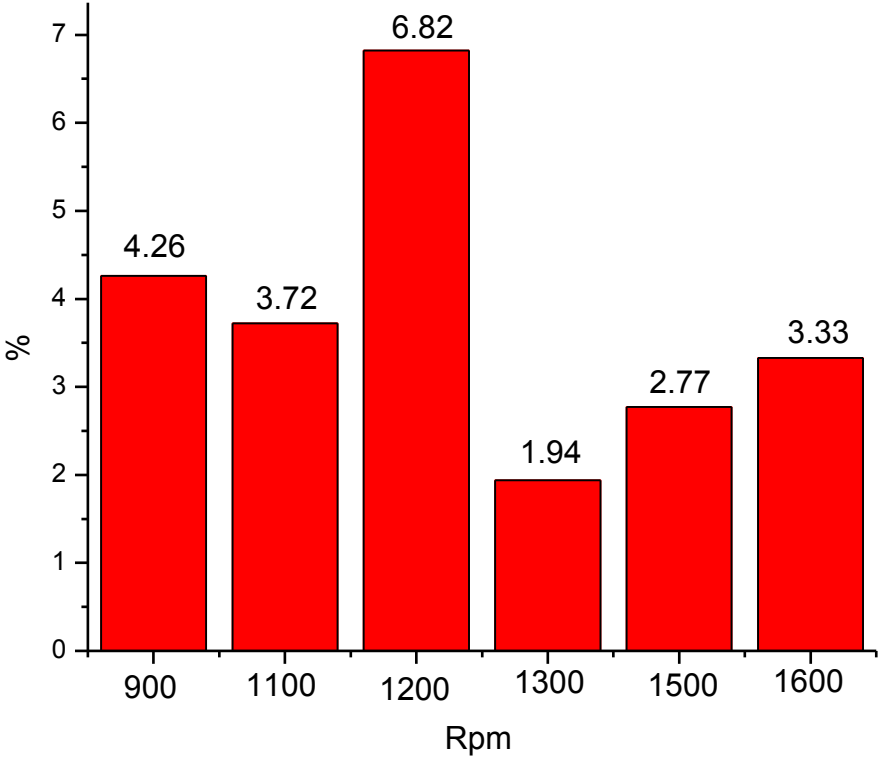


Figura 4. 16 Rpm/% de deformación después de realizar la soldadura a diferentes Rpm.

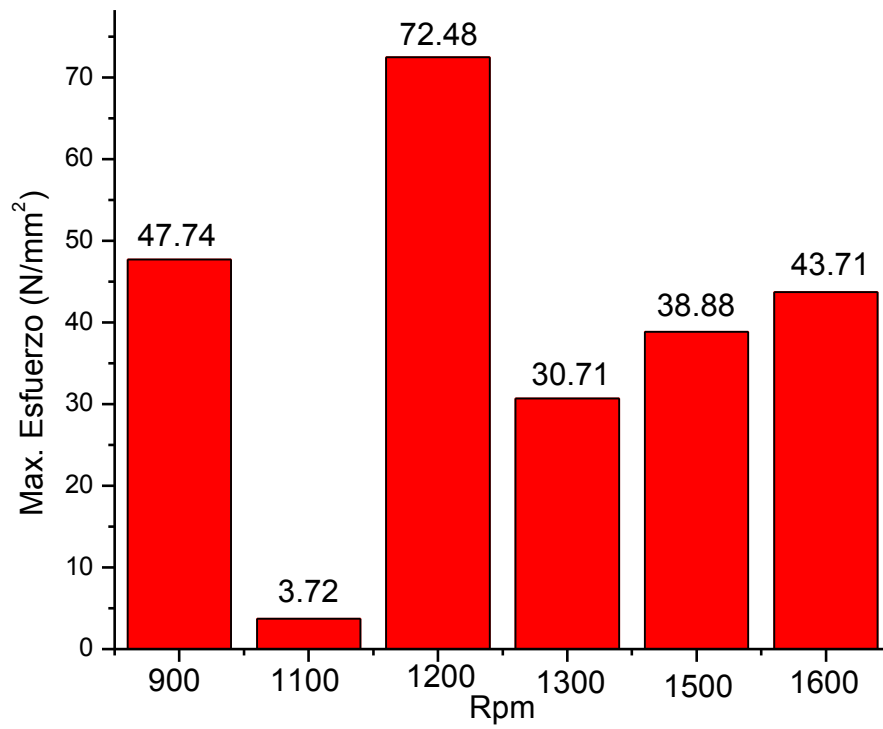


Figura 4. 17 Rpm/Max. Esfuerzo soportado después de realizar la soldadura a diferentes Rpm.

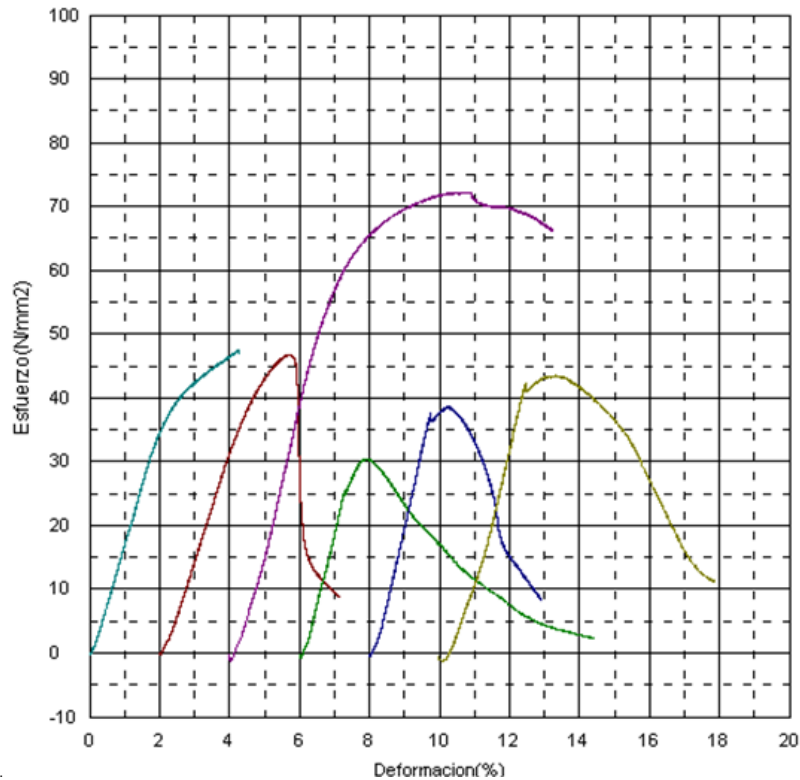


Figura 4. 18 resultado de los ensayos de tensión.

La grafica anterior nos muestra los resultados obtenidos de las pruebas de tensión realizadas a las soldaduras con diferentes Rpm.

Azul: a 900 Rpm presento como esfuerzo máxima 47.74 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 4.26%.

Rojo: a 1100 Rpm presento como esfuerzo máximo 37.2 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 3.72%.

Morado: a 1200 Rpm presento un esfuerzo máximo 72.48 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 6.82%.

Verde: a 1300 Rpm presento un esfuerzo máximo 30.71 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 1.94%.

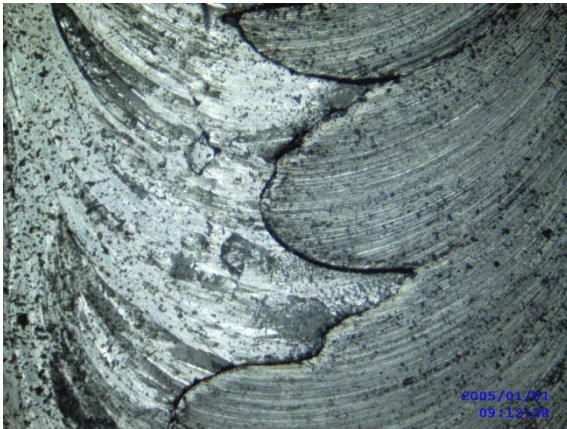
Azul marino: a 1500 Rpm presento un esfuerzo máximo 38.88 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 2.27 %.

Amarillo: a 1600 Rpm presento un esfuerzo máximo de 43.71 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 3.33%.

## HISTORIAL TÉRMICO

Evaluación de soldabilidad de la aleación Zn-22Al-2Ag después del historial térmico.

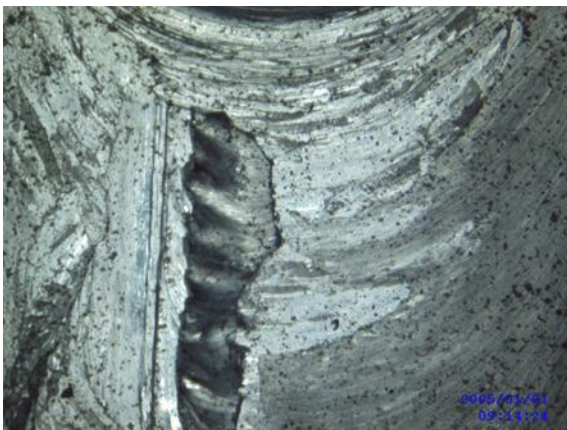
Enfriado en agua



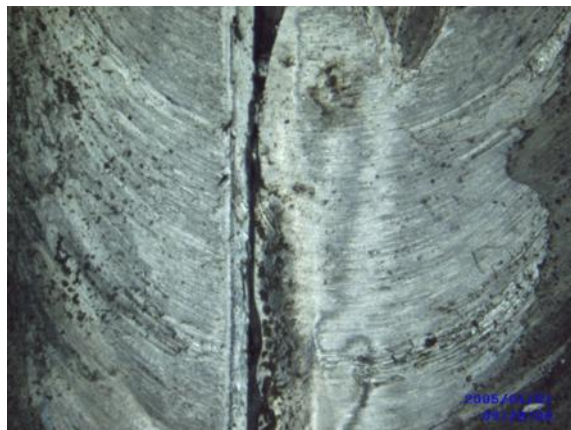
(a)



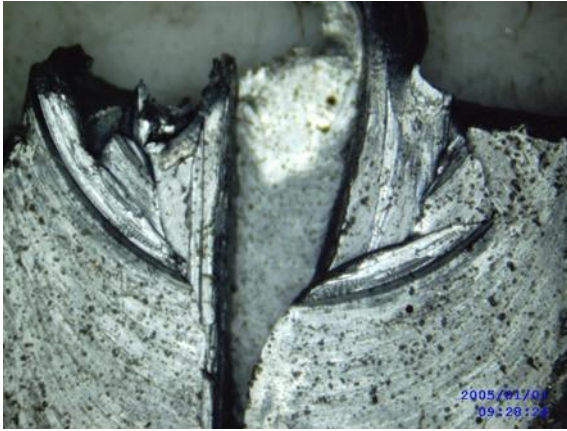
(b)



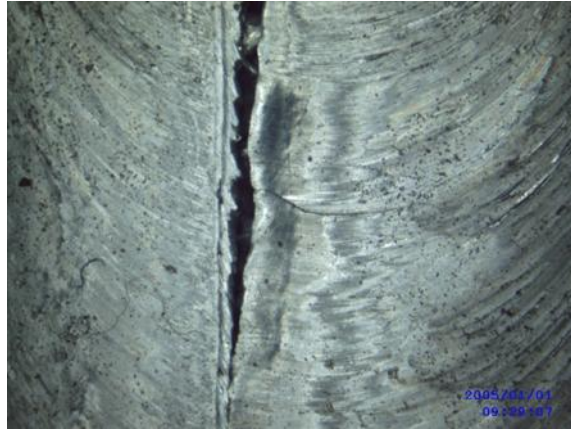
(c)



(d)



(e)

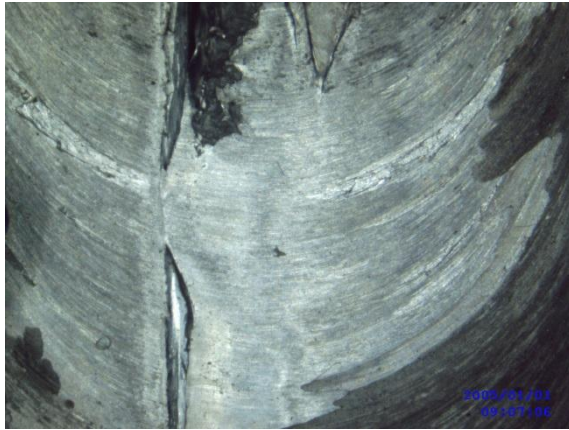


(f)

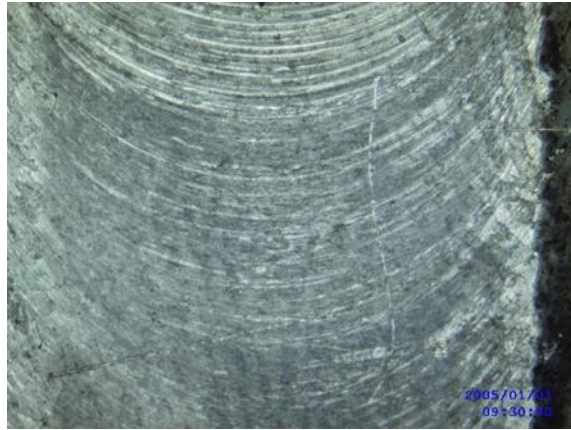
Figura 4. 19 (a), (b), (c), (d), (e) y (f) nos muestran la unión realizada a 900rpm, 1100rpm, 1200rpm, 1300rpm, 1500rpm y 1600 rpm a la placa con historial térmico la cual tuvo un enfriamiento rápido.



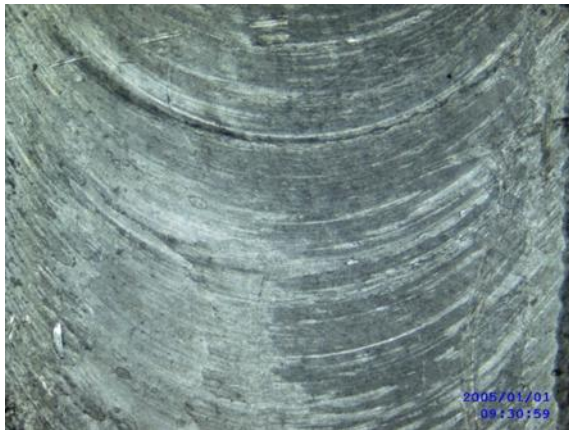
## Enfriado en el horno



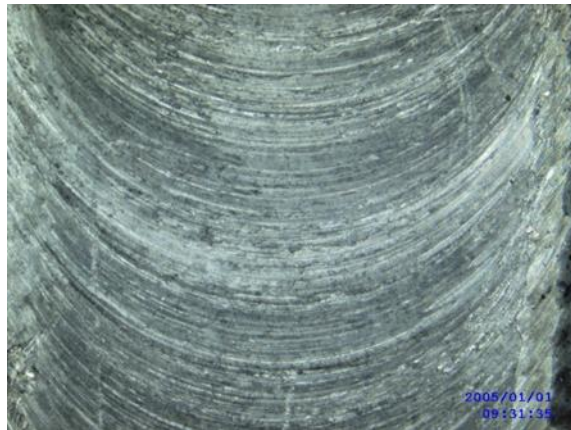
(a)



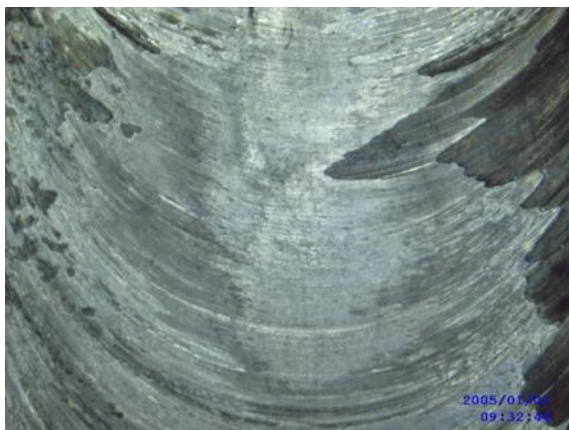
(b)



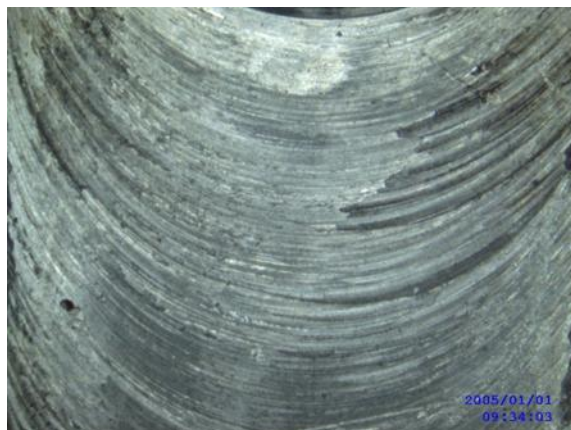
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4. 20 (a) a 900rpm, (b) a 1100rpm, (c) a 1200rpm, (d) a 1300rpm, (e) a 1500rpm y (f) a 1600rpm, unión realizada a las placas después del historial térmico enfriada lentamente.

## Defecto de túnel

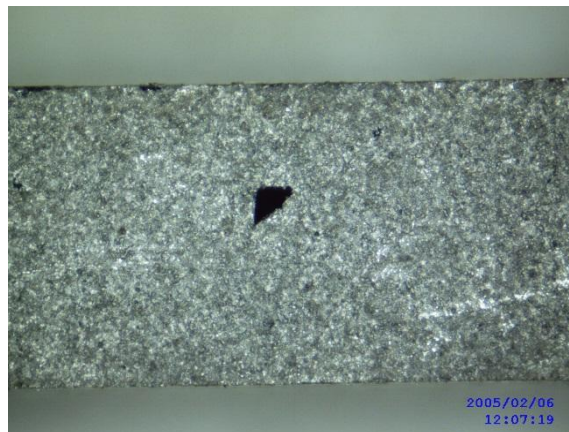
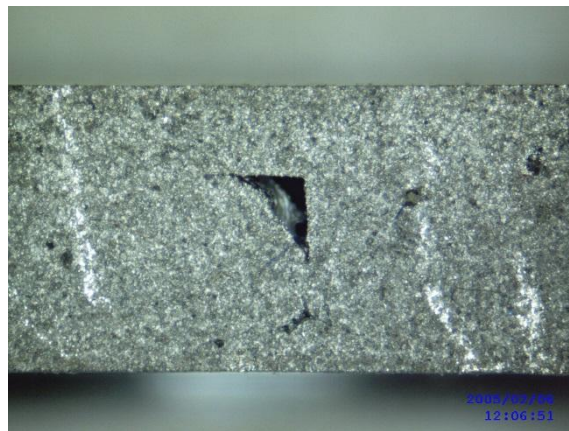
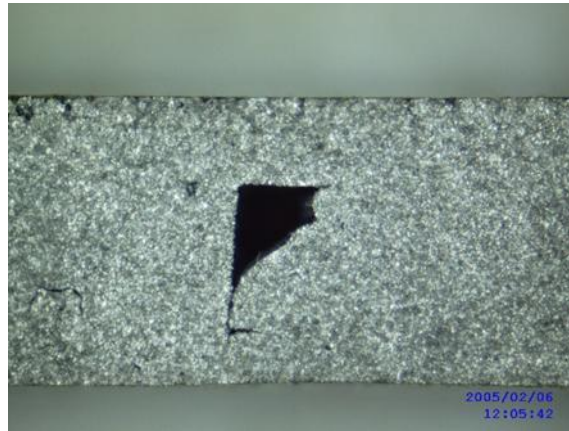


Figura 4. 21 Defecto túnel encontrado en las uniones realizadas a 900 rpm, 1500 rpm y 1600 rpm después del historial térmico con enfriamiento lento.

**Evaluación microestructural de la aleación Zn-22Al-2Ag al soldar por fsw (enfriamiento lento).**

1100 Rpm

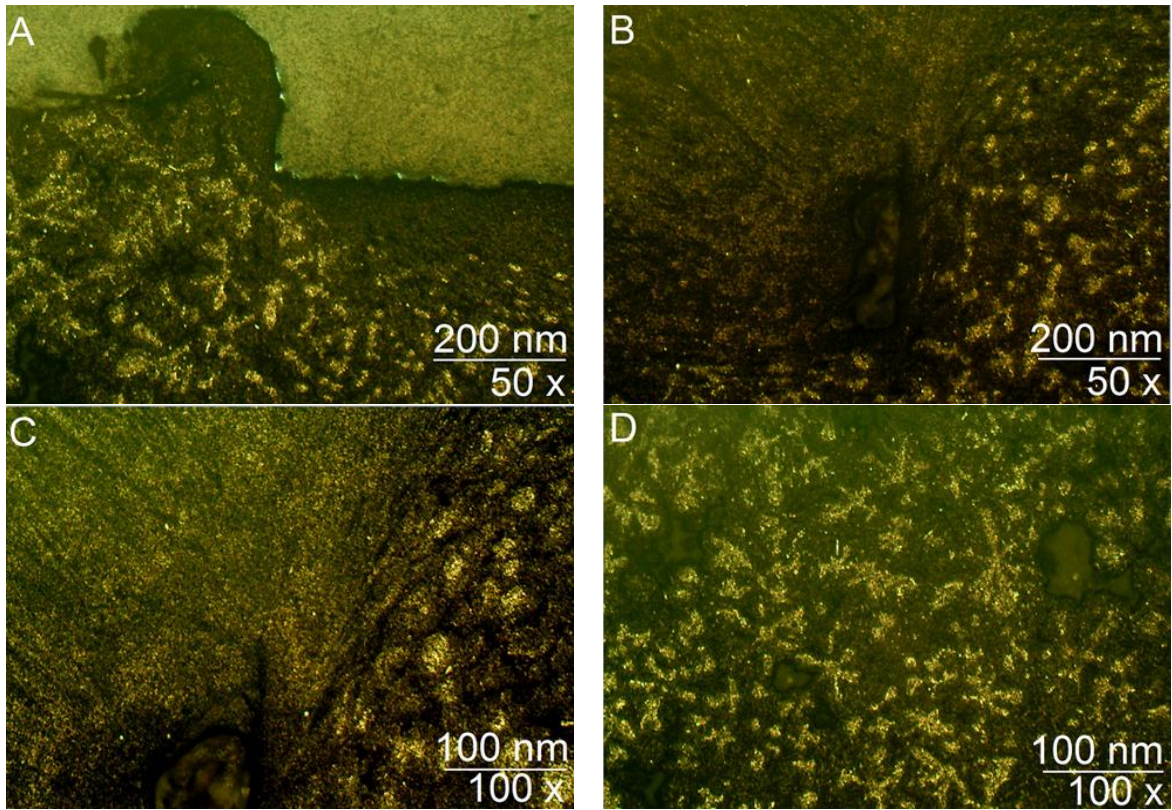


Figura 4. 22 soldadura a 1100 Rpm.

1200 Rpm

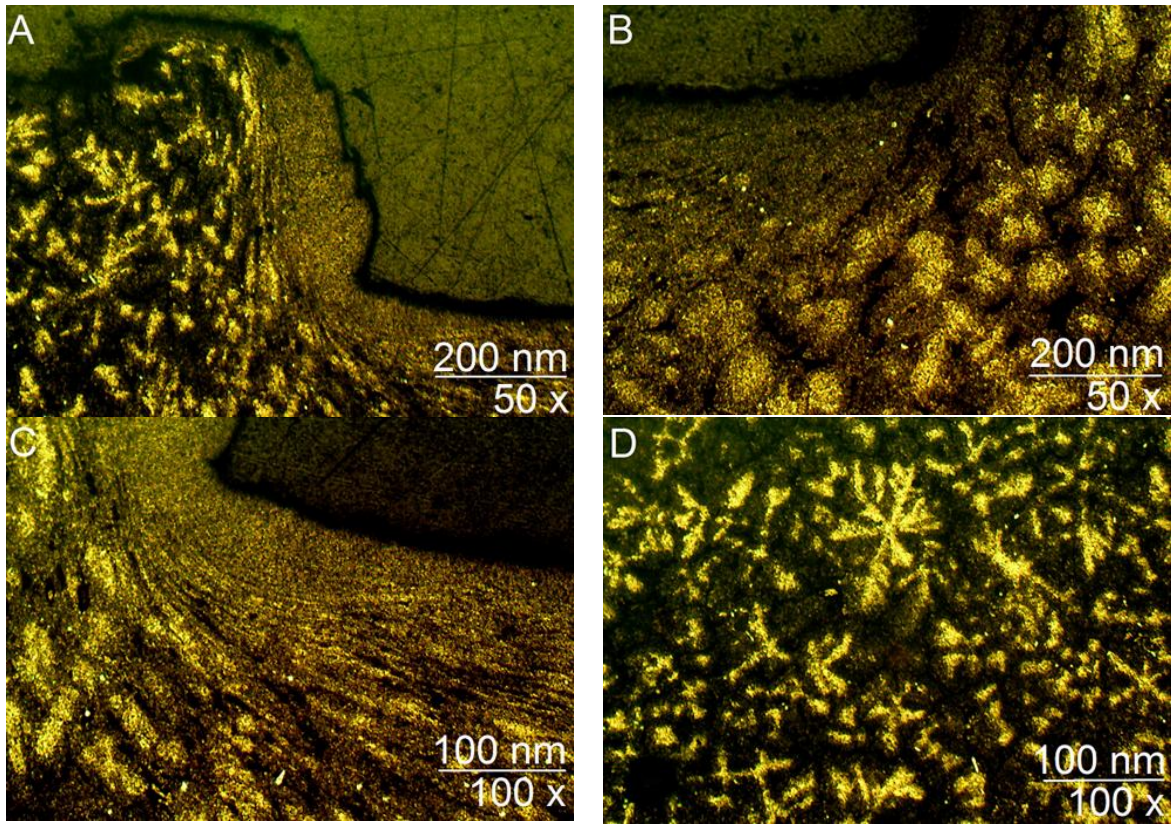


Figura 4. 23 soldadura a 1200 Rpm.

1300 Rpm

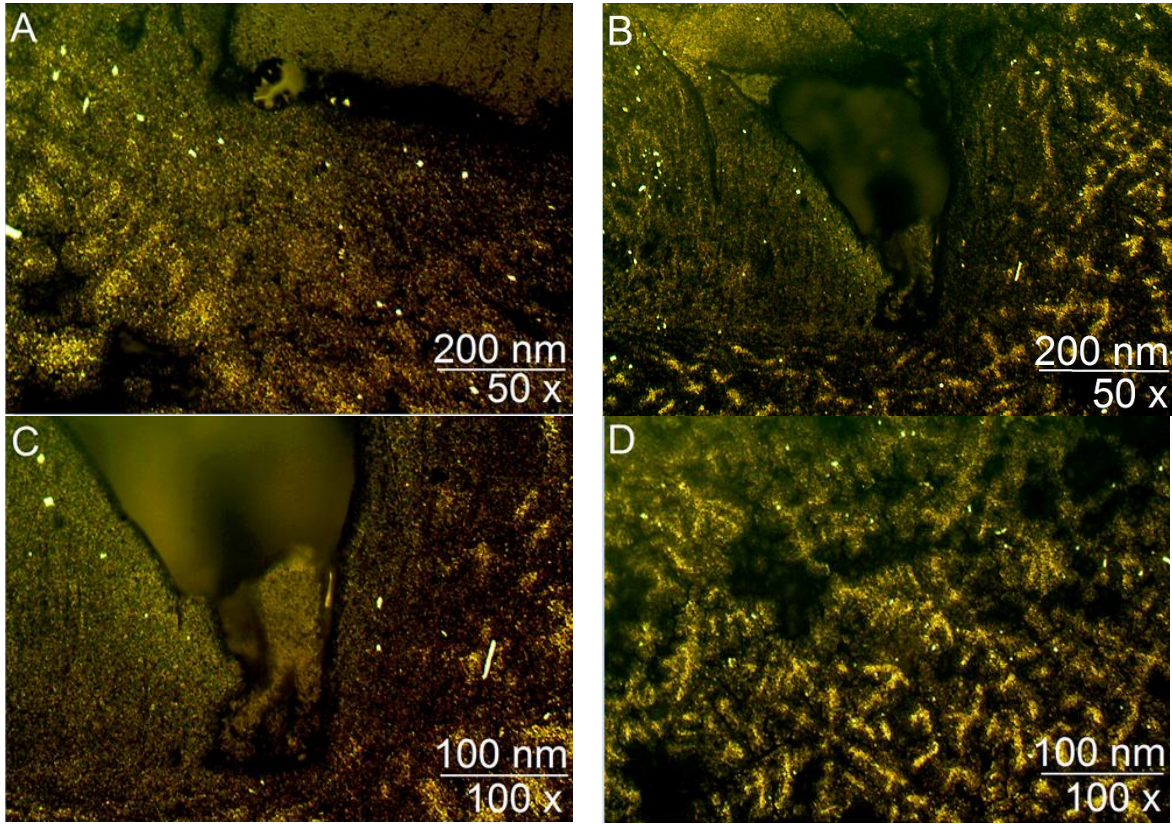


Figura 4. 24 soldadura a 1300 Rpm.

**Microdureza**

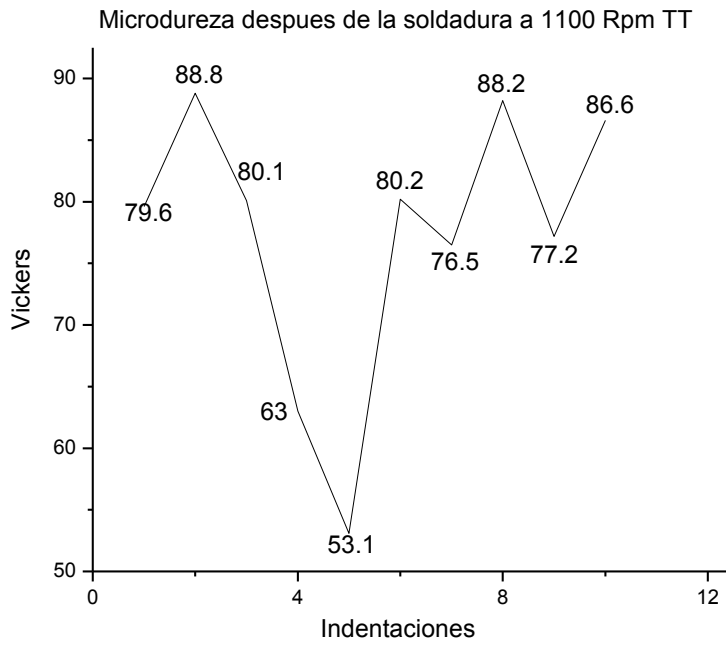


Figura 4. 25 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1100 Rpm con TT.

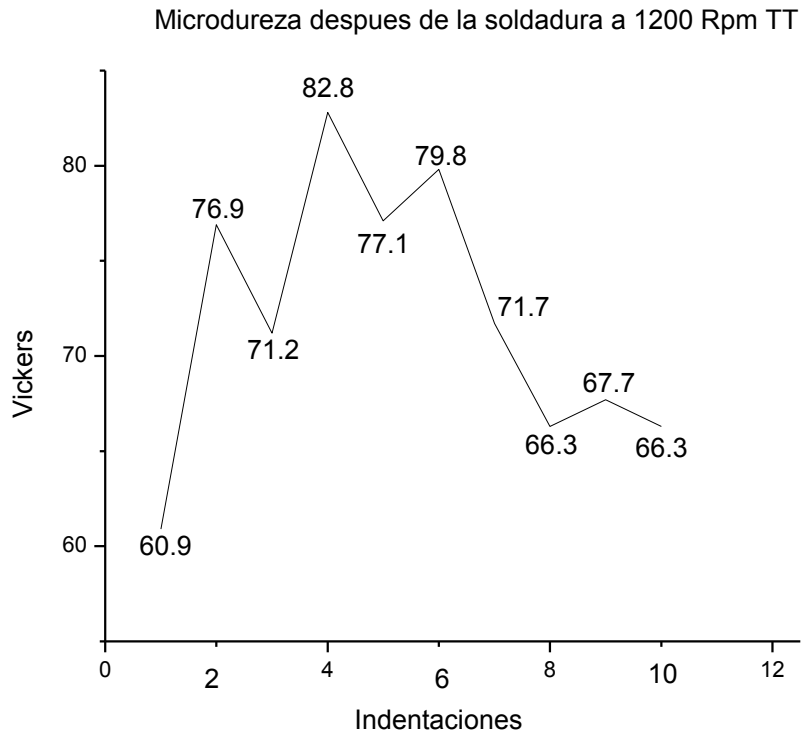


Figura 4. 26 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1200 Rpm con TT.

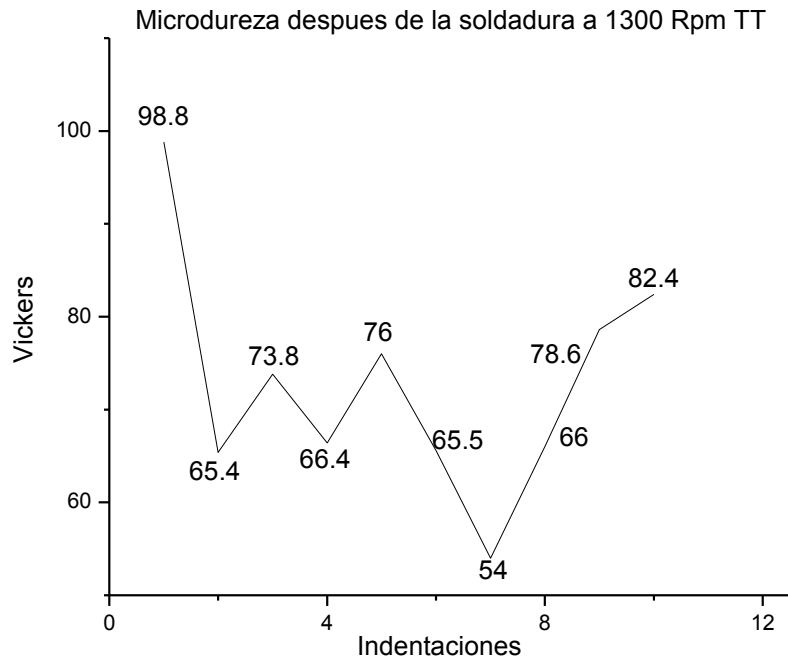


Figura 4. 27 resultado de microdureza después de realizar la soldadura a 1300 Rpm con TT.

# Resultados ensayos de tensión

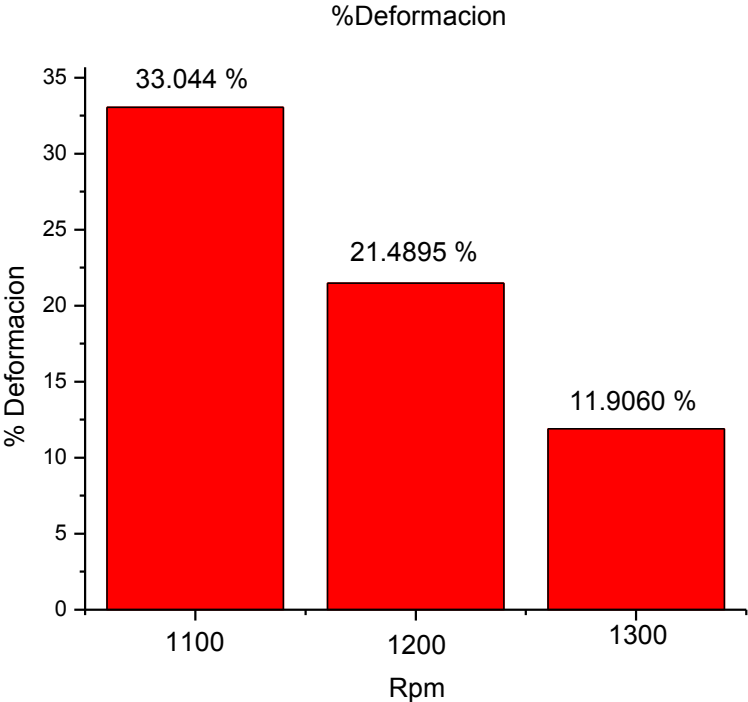


Figura 4. 28 deformación máxima después del TT.



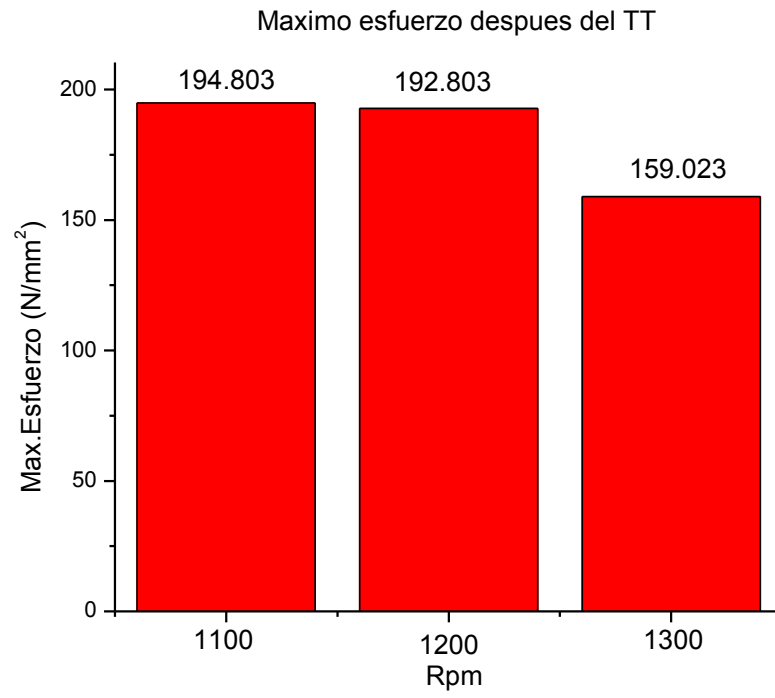


Figura 4. 29 máximo esfuerzo después del TT

## Conclusiones

De acuerdo al diseño experimental se realizaron en total 18 condiciones distintas, en las cuales resaltan las siguientes tomando en cuenta los ensayos de tensión; unión de aleación de zinag sin tratamiento térmico soldada a 1200 rpm alcanzó una resistencia a la tensión de 72.48 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 6.82 %, se observó que la aleación de zinag al calentarlo a una temperatura de 220 °C manteniéndolo con un tiempo de 150 minutos y un enfriamiento lento (dentro del horno) mejoró bastante alcanzando una resistencia a la tensión de 194.803 N/mm<sup>2</sup> y una deformación de 33.044 %; mientras que la aleación que fue calentada a las mismas condiciones pero con un enfriamiento rápido (agua) no se logró tener una unión sana presentando fisuras a lo largo de la unión.

De acuerdo a los análisis de dureza en la zona de recristalización dinámica se aprecia que la dureza de las muestras con la condición dos presentan los valores de dureza 60 Hv que son los más bajos mientras que la condición 1 presenta los valores de 62 Hv (defectos). Relacionando la dureza y la deformación se cree que la condición 1 soldada a 1100 rpm alcanzó un mayor refinamiento de grano.

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica no se encontró registro de información para soldar aleaciones de zinag, en este trabajo se proporciona la información necesaria para lograr uniones sanas para aplicaciones ingenieriles.

Se logró obtener una aleación de zinag de composición superplástica, en la cual se generaron uniones sanas con el proceso fsw de acuerdo a los ensayos de tensión, dureza y análisis metalográfico.

## TRABAJOS FUTUROS

Hacer un trabajo de investigación de soldadura fsw en aleación de zinag con la condición de superplasticidad.

Hacer trabajos de investigación de soldadura en estructuras tipo sándwich donde el centro sea un material esponja y en los extremos soleras de aleaciones de zinag para aplicaciones en estructuras ligeras.

Estudiar uniones disímiles de las aleaciones zinag y zinalco con el proceso fsw.

Referencias bibliográficas

- 1) <http://elementos.org.es/zinc>.
- 2) L.F. Mondolfo, Structure of the aluminum: magnesium: zinc alloys, Metall. Rev., 95 (153) (1971) 94-124.
- 3) H. Schmalzried and V. Gerold, Z. Metallkd., 49 (1954) 291.
- 4) M.F. Ibrahim, A.M. Samuel, F.H. Samuel, A preliminary study on optimizing the heat 3 treatment of high strength Al-Cu-Mg-Zn alloys, Mater Des. 57 (2014) 342-350.
- 5) L.L. Rokhlin, T.V. Dobatkina, N.R. Bochvar, E.V. Lysova, Investigation of phase equilibria in alloys of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc system, J Alloys Comp. 367 (2004) 10-16.
- 6) F.A. Mohamed, T.G. Langdon, Acta Met. 23 (1975) 117.
- 7) F.A. Mohamed, S.-A. Shei, T.G. Langdon, Acta Met. 23 (1975) 1443.
- 8) T.G. Nieh, J. Wadsworth, Scripta Metall. Mater. 28 (1993) 1993. [4] T.G. Nieh, C.A. Henshall, J. Wadsworth, Scripta Metall. 18 (1984)
- 9) F R. Morral, Emilio Jimeno, P. Molera. Metalurgia General Vol. 2
- 10) Kalpakjian, S: Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4 Edición, México (2001).
- 11) Hernandez, G: Manual del soldador, 22 Edicion, España (2001).
- 12) Hirsch, J: Acta Metall. 36, 2863, (1998)
- 13) Doherty. R,D: Mater.sci. Eng. A 238, 219, (1997)
- 14) Mishra, R: Friction Stir Welding and Processing, 1 Printing, (2007).
- 15) Deqing, W: Study of friction stir welding of aluminum, journal of materials science 39, 1689-1693, (2004)

- 16) Prater, T: Friction Stir Welding of aluminum, titanium, and aluminum metal matrix composites using a diamond coated molybdenum tool, 18<sup>th</sup> Aeromat conference and exposition, Baltimore USA, (2007)
- 17) De Backer, J: Robotic Friction Stir Welding for automotive and aviation Applications, University West, (2009).
- 18) Reynolds, A.P: Sci, Technol. Weld. Joining 5, 120, (2000)
- 19) Mather, G: The welding of aluminum and its alloys, (2002).
- 20) Bowen, A.W: Mater. Sci. Technol. 6. 1058, (1990).
- 21) Hirsch, J: Acta Metall, 38, 2863, (1998).
- 22) Doherty, R.D: Mater. Sci. Eng. A 238, 219, (1997).
- 23) Gourder, S: Mater Sci. Forum 217-222, 441, (1996).
- 24) McQueen, H.J: Metallkd. 82, 336, (1991).
- 25) Ameyama, K, Inst: Met. 53, 991, (1989).
- 26) Tsuzaki, K: Acta Mater. 44, 4491, (1996).
- 27) Talwar, R: Friction Stir Welding of airframe structures, 2<sup>nd</sup> int. FSW.
- 28) Carrasco, J: Posibilidades de los servicios ferroviarios nocturnos en la futura red europea de alta velocidad.
- 29) Buehler Summent: the science behind material preparation and analysis, USA 2004.
- 30) Garcia Bernal, Marco Antonio: Efecto del Cu y Zn en las propiedades superplásticas de la aleación Al-Mg.
- 31) Escuela superior de ingeniería química e industrial extractivas de México.
- 32) Sherby O. D. y Taleff E. M: influence of grain size, solute atoms and second-phase particles on creep behavior of polycrystalline solids. Mater. Sci. Eng. A322. 89-99, (2002).

33)E. Martínez-Flores et al, Structure and properties of Zn–Al–Cu alloy reinforced with alumina particles, *Materials and Design* 24 (2003) 281–286.