



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”



UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

“EFECTO DE LA ADICIÓN DE MAGNESIO Y LITIO EN LA MICROESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURA AMBIENTE, MEDIA (0.5 Tf) Y ALTA (0.6-0.7 Tf) DE ALEACIONES AL-Si A380, ASÍ COMO SU SOLDABILIDAD POR FSW”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

PRESENTA:

ING. ADÁN CARRILLO SALAS

ASESOR DE TESIS:

DR. SIMITRIO IGNACIO MALDONADO RUÍZ

COASESOR EXTERNO:

DR. MOHAMAD EL MEHTEDI

COASESROES:

DR. SERGIO HARO RODRÍGUEZ

DR. PILAR OROZCO GONZÁLEZ

M. EN C. ENRIQUE ALEJANDRO LÓPEZ BALTAZAR

ZACATECAS, ZACATECAS 13 DE DICIEMBRE 2019

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	ix
RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Hipótesis	4
CAPÍTULO II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Propiedades del aluminio puro	5
2.1.1 Propiedades físicas del aluminio	5
2.1.2 Propiedades mecánicas del aluminio.....	6
2.1.3 Estructura cristalina y radio atómico del aluminio.....	6
2.2 Propiedades del magnesio.....	7
2.2.1 Propiedades físicas del magnesio	7
2.2.2 Propiedades mecánicas del magnesio.....	7
2.2.3 Estructura cristalina y radio atómico del magnesio.....	8

2.3	Propiedades del litio.....	8
2.3.1	Propiedades físicas del litio	9
2.3.2	Propiedades mecánicas del litio.....	9
2.3.3	Estructura cristalina y radio atómico del litio.....	10
2.4	Clasificación de las aleaciones de aluminios	10
2.4.1	Aleaciones de forja	10
2.4.2	Aleaciones de fundición	11
2.5	Aleaciones Aluminio-Litio	12
2.6	Aleaciones Aluminio-Magnesio	13
2.7	Aleaciones Aluminio-Silicio.....	14
2.8	Aleaciones A380.....	16
2.8.1	Composición química.....	16
2.8.2	Microestructura.....	16
2.8.3	Propiedades mecánicas	17
2.9	Soldadura de Aluminio	17
2.10	Proceso de Soldadura FSW (Friction Stir Welding)	18
2.10.1	Equipo del proceso FSW	19
2.10.2	Parámetros operativos.....	19
2.10.3	Zonas de soldadura FSW	20
2.10.3.1	Metal base (MB).....	20
2.10.3.2	Zona Afectada térmicamente (HAZ - Heat affected zone)	20
2.10.3.3	Zona Afectada Termo-mecánicamente (TMAZ - Thermo-mechanical affected zone)	20
2.10.3.4	Zona de Agitación (NZ - Nugget Zone) o Stir Zone.....	21
2.11	Medición de temperatura.....	21

2.11.1	Termopar	21
2.11.2	Calibración de termopares por comparación	25
CAPÍTULO III MATERIALES, EQUIPOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		26
3.1	Descripción preliminar	26
3.1	Materiales.....	28
3.2	Equipos	29
3.2.1	Fundición	29
3.2.2	Propiedades mecánicas.....	30
3.2.3	Soldadura por fricción y agitación	33
3.2.4	Metalografía.....	34
3.3	Metodología	35
3.3.1	Tensión y dureza.....	35
3.3.1.1	Fundición.....	35
3.3.1.2	Diseño, construcción y operación de la máquina de dureza	38
3.1.1.1	Propiedades mecánicas.....	46
3.1.1.2	Metalografías.....	47
3.1.2	Soldadura por fricción	48
3.1.2.1	Fundición.....	48
3.1.2.2	Proceso de soldadura por fricción FSW	50
3.1.2.3	Propiedades mecánicas.....	54
3.1.2.4	Metalografías.....	57
CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		58
4.1	Composición química	58
4.2	Densidad	58
4.3	Tensión y dureza, Aleaciones A380 2.5%Mg 0.25%Li y A380 5%Mg 0.25%Li. 60	

4.3.1	Metalografías	60
4.3.1.1	Micrografías	60
4.3.2	Propiedades mecánicas	65
4.3.2.1	Ensayos de tensión	65
4.3.2.2	Ensayos de dureza	66
4.4	Soldadura por fricción, Aleaciones A380 5%Mg y A380 5%Mg 1%Li	67
4.4.1	Metalografías	67
4.4.1.1	Macrografías.....	67
4.4.1.2	Micrografías	70
4.4.2	Temperatura durante el proceso FSW	74
4.4.3	Propiedades mecánicas	75
4.4.3.1	Ensayos de tensión	75
4.4.3.2	Ensayos de microdureza.....	77
CAPÍTULO V CONCLUSIONES		80
Trabajos futuros.....		81
BIBLIOGRAFÍA		82
ANEXOS		86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1	Estructura cristalina del aluminio.	6
Figura 2. 2	Estructura cristalina del magnesio.	8
Figura 2. 3	Estructura cristalina del litio.	10
Figura 2. 4	Diagrama de fases Aluminio – Litio.	13
Figura 2. 5	Diagrama de fases Aluminio – Magnesio.	14
Figura 2. 6	Diagrama de fases Aluminio – Silicio.	15

Figura 2. 7 Micrografías de la aleación A380.	17
Figura 2. 8 Soldadura por fricción.....	18
Figura 2. 9 Zonas características del proceso de soldadura por fricción.....	21
Figura 2. 10 Termopares; fuerza electromotriz contra temperatura.	24
Figura 2. 11 Código de colores en los termopares.	24
Figura 3. 1 Diagrama de flujo.....	27
Figura 3. 2 Materiales utilizados para la fundición.	28
Figura 3. 3 a) Horno de resistencia; b) Crisol; c) Tanque de gas argón.	29
Figura 3. 4 Báscula digital.....	29
Figura 3. 5 Equipo de espectrometría de chispa.	30
Figura 3. 6 a) Torno convencional; b) Fresadora CNC.	30
Figura 3. 7 Equipo de ensayos de tensión uniaxial.	31
Figura 3. 8 Máquina de dureza a temperatura.	31
Figura 3. 9 a) Termómetro portable con termopar tipo E; b) Comparador óptico.	32
Figura 3. 10 Mico-durómetro.	32
Figura 3. 11 a) Fresadora CNC; b) Aditamentos para la sujeción de placas para soldadura FSW.....	33
Figura 3. 12 Tarjeta de adquisición de datos Omega.	33
Figura 3. 13 a) Pulidora Metkon; b) Microscopio óptico metalográfico.....	34
Figura 3. 14 Microscopio electrónico de barrido.	34
Figura 3. 15 Corte en fragmentos de lingotes y obtención de peso.....	36
Figura 3. 16 a) Desgasificado con argón; b) Remoción de escoria.	37
Figura 3. 17 a) Vaciado en moldes de grafito; b) Probetas cilíndricas; c) Muestras de ensayo para espectrometría.....	37
Figura 3. 18 a) Aditamentos a la máquina de fluencia; b) Vista seccionada del injerto de carburo de tungsteno.....	38
Figura 3. 19 Máquina de dureza en CAD.....	38
Figura 3. 20 Diagrama de cuerpo libre.	40
Figura 3. 21 Ilustración de los pesos usados para aplicar 250 Kg fuerza en el indentador.	41
Figura 3. 22 a) Diseño de la probeta en CAD; b) Probeta de dureza.	42

Figura 3. 23 Elevación del indentador.....	42
Figura 3. 24 Colocación de las probetas de dureza.	43
Figura 3. 25 Control y verificación de la temperatura en la máquina de dureza.....	43
Figura 3. 26 Nivel para el correcto posicionamiento del brazo.....	44
Figura 3. 27 Probeta ensayada 3 veces.	45
Figura 3. 28 Dimensiones para las probetas cilíndricas de ensayos de tensión de acuerdo a la norma ASTM E8.	46
Figura 3. 29 a) Maquinado de la probeta en torno convencional; b) Probeta de tensión.	46
Figura 3. 30 a) Corte de la probeta de dureza; b) Probeta seccionada.	47
Figura 3. 31 Muestra pulida con acabado espejo para el microscopio.	48
Figura 3. 32 a) Construcción del molde a partir de placas de acero; b) Molde permanente con el embudo colocado, nótese que el material ya ha sido vaciado; c) Placas obtenidas a partir del molde.....	49
Figura 3. 33 Identificación de las secciones en las placas obtenidas.	50
Figura 3. 34 Rectificado de las placas.	50
Figura 3. 35 Diseño del pin.	51
Figura 3. 36 Comprobación de paralelismo de la placa por medio de un comprador de carátula.....	51
Figura 3. 37 Vista inferior de la unión soldada.	53
Figura 3. 38 Vista superior de la unión soldada.	54
Figura 3. 39 Dimensiones para las probetas planas de acuerdo a la norma ASTM E8.....	55
Figura 3. 40 a) Dibujo esquemático de corte para la obtención de probetas de la unión soldada; b) Corte de probetas de tensión por medio de la fresadora CNC.....	55
Figura 3. 41 a) Probeta pulida; b) Ensayo de tensión.	56
Figura 3. 42 Muestras encapsuladas y pulidas de la sección transversal de la unión soldada.	56
Figura 3. 43 Representación de barrido de indentaciones en la probeta encapsulada.....	57
Figura 3. 44 Porta muestras. a) Maquinado en torno; b) Maquinado en fresadora; c) Colocación en el microscopio.	57
Figura 4. 1 Densidad respecto al porcentaje de elementos de aleación.....	59

Figura 4. 2 Micrografías electrónicas, aleación A380 2.5Mg 0.25Li a varias magnificaciones. a) 6X; b) 100X; c) 650X; d) 1000X.	60
Figura 4. 3 EDS de la aleación A380 2.5Mg 0.25Li.	61
Figura 4. 4 Análisis puntual por EDS de las fases presentes en la aleación A380 2.5Mg 0.25Li.....	61
Figura 4. 5 Micrografías electrónicas, aleación A380 5Mg 0.25Li a varias magnificaciones. a) 6X; b) 100X; c) 650X; d) 1000X.	63
Figura 4. 6 EDS de la aleación A380 5Mg 0.25Li.	63
Figura 4. 7 Análisis puntual por EDS de las fases presentes en la aleación A380 5Mg 0.25Li.....	64
Figura 4. 8 UTS y deformación de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.....	65
Figura 4. 9 Variación de la dureza con la temperatura de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.....	66
Figura 4. 10 Vista superior de las uniones soldadas por pin cuadrado. a) A380 (b); b) A380 5Mg (3); c) A380 5Mg 1Li (4).	67
Figura 4. 11 Macrografías de la sección transversal de la unión soldada. a) A380 CU; b) A380 CO; c) A380 5Mg CU; d) A380 5Mg CO; e) A380 5Mg 1Li CU; f) A380 5Mg 1Li CO.....	68
Figura 4. 12 Diagrama de Ellingham para óxidos.	69
Figura 4. 13 Microestructura del metal base de las aleaciones. a) A380; b) A380 5Mg; c) A380 5Mg 1Li.	70
Figura 4. 14 Zona de agitación (NG) y Zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) de las uniones soldadas. a) A380; b) A380 5Mg; c) A380 5Mg 1Li.....	71
Figura 4. 15 Micrografías electrónicas de la unión soldada A380. a) Zona de agitación y Termo-mecánicamente afectada a 250X; b) Zona de agitación a 1000X; c) Metal base a 1000X con ataque químico.	72
Figura 4. 16 Micrografías electrónicas de las aleaciones. a) Zona de agitación y termo-mecánicamente afectada la unión de soldadura aleación A380 5Mg a 250X; b) Zona de agitación aleación A380 5Mg 1Li a 350X; c) Metal base aleación A380 5Mg a 200X; d) Metal base aleación A380 5Mg.....	73

Figura 4. 17 Temperatura dentro de la zona de agitación pin cónico.....	74
Figura 4. 18 Temperatura dentro de la zona de agitación pin cuadrado.....	75
Figura 4. 19 Zona de fractura de las probetas. a) Dentro de la zona de agitación; b) Metal base.	76
Figura 4. 20 Último esfuerzo de las uniones soldadas.	76
Figura 4. 21 Deformación de las uniones soldadas.	77
Figura 4. 22 Perfil de microdureza pin cónico.	78
Figura 4. 23 Perfil de microdureza pin cuadrado.	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Propiedades físicas del aluminio.	5
Tabla 2. 2 Propiedades mecánicas del aluminio.....	6
Tabla 2. 3 Propiedades físicas del magnesio.	7
Tabla 2. 4 Propiedades mecánicas del magnesio.....	8
Tabla 2. 5 Propiedades físicas del litio.	9
Tabla 2. 6 Propiedades mecánicas del litio.....	9
Tabla 2. 7 Composición química de la aleación 380.....	16
Tabla 2. 8 Propiedades mecánicas de la aleación A380.....	17
Tabla 2. 9 Termopares y sus características.	23
Tabla 3. 1 Temperaturas de pruebas para dureza.	47
Tabla 3. 2 Geometría y dimensiones del pin.	52
Tabla 3. 3 Parámetros primarios del proceso de soldadura y su designación.	53
Tabla 4. 1 Composición química de las fundiciones utilizadas.....	58
Tabla 4. 2 Resultados de EDS puntual aleación A380 2.5Mg 0.25Li.....	62
Tabla 4. 3 Resultados de EDS puntual aleación A380 5Mg 0.25Li.....	64
Tabla 4. 4 Dureza a temperatura de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.....	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula para calcular pesos necesarios de adición.	35
Ecuación 2. Calculo de adición de litio al 0.25%, fundición 1.....	35
Ecuación 3. Calculo de adición de magnesio al 2.5%, fundición 1.....	35
Ecuación 4. Calculo de la adición de litio al 0.25%, fundición 2.....	36
Ecuación 5. Calculo de la adición de magnesio al 5%, fundición 2.....	36
Ecuación 6. Momento.....	39
Ecuación 7. Sumatoria de momentos.	40
Ecuación 8. Despeje de W.....	40
Ecuación 9. Sustitución de valores en la ecuación 8.	41
Ecuación 10. Ecuación para el cálculo de dureza Brinell.....	45
Ecuación 11. Calculo de la adición de 5% magnesio, fundición 3.....	48
Ecuación 12. Calculo para la adición de 1% litio, fundición 4.	49
Ecuación 13. Calculo para la adición de 5% magnesio, fundición 4.....	49

RESUMEN

En este proyecto se investigó el efecto de la adición de magnesio y litio en la aleación de aluminio para fundición A380, donde se analizó las propiedades mecánicas y el proceso de soldadura por fricción y agitación (FSW – Friction Stir Welding) en las aleaciones.

Se generaron un total de 5 aleaciones: 1) aleación base (A380), 2) aleación 2.5% Mg 0.25% Li, 3) aleación 5% Mg 0.25% Li, 4) aleación 5% Mg, y finalmente 5) aleación 5% Mg 1% Li. La fundición se realizó a 720 °C vaciando en moldes de grafito y en moldes permanentes de acero para la obtención de placas.

Una vez obtenidas las aleaciones se maquinaron para obtener probetas de tensión y dureza, y las placas se soldaron mediante el proceso FSW con un pin de acero AISI 1045 tratado térmicamente variando solamente su geometría. Para el análisis de la microestructura se utilizó microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, el análisis de la composición química se realizó por medio de espectrometría de chispa y se observaron los intermetálicos formados por medio de EDS.

Los resultados muestran una reducción en la densidad de hasta el 11.35% en comparación a la aleación A380 pero de igual manera una reducción de sus propiedades mecánicas pasando de 192.60 a 186.65 MPa con la adición de 2.5% magnesio y 176.77 MPa con adición de 5% magnesio.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las aleaciones Al-Li han experimentado un gran desarrollo en los últimos 10 años para la industria aeroespacial, nuevas composiciones químicas especialmente la reducción de contenido de litio han sido investigadas, sin embargo el rango de interés de composiciones químicas aún es muy variada con adiciones de cobre hasta de un 3% en peso, un rango de 0.7 a 1.5% de peso de litio y un rango extendido de adiciones de magnesio [1].

Se ha demostrado que la adición de 1% litio disminuye aproximadamente un 3% de la densidad final de la aleación e incrementa hasta en un 6% el módulo de elasticidad, además de las reducciones en densidad y su alta resistencia específica las aleaciones Al-Li poseen características como bajo crecimiento de grietas por fatiga y alta resistencia a la corrosión [1-7].

1.2 Planteamiento del problema

El enfoque de este proyecto tiene su impacto en la industria automotriz y aeroespacial a nivel internacional, esto al existir una necesidad de obtener materiales estructurales cada vez más resistentes y ligeros con propiedades adecuadas a las condiciones de trabajo. Las aleaciones de aluminio aún son ampliamente utilizadas como elementos de maquinaria y estructural por su ligereza y buenas propiedades mecánicas, más sin embargo, algunas aleaciones se ven limitadas por su difícil o inexistente capacidad de soldadura. El presente trabajo pretende dar un análisis de las propiedades mecánicas y la capacidad de soldadura al adicionar elementos de menor densidad a la aleación A380 con la intención de obtener una mejora en sus propiedades mecánicas a la vez que se reduce su densidad.

1.3 Justificación

La industria automotriz y aeronáutica demanda cada día materiales más livianos y de mejores propiedades mecánicas, de ahí la investigación de nuevas aleaciones que presenten esas características.

Existen pocos estudios de la aleación de aluminio-silicio con adiciones de litio y magnesio como elementos aleantes, por lo que se vuelve provechosa esta investigación, la cual sentara las bases para nuevos productos y procesos de manufactura con este tipo de material.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Estudiar la microestructura, las propiedades mecánicas y su soldabilidad por el proceso de soldadura por fricción y agitación (FSW – Friction Stir Welding), de aleaciones Al-Si A380 con adiciones de magnesio y litio.

1.4.2 Objetivos específicos

Estudiar las fases presentes en la aleación Al-Si A380 al agregar magnesio y litio.

Estudiar las propiedades mecánicas de las aleaciones a temperatura ambiente, media (0.5 temperatura homóloga de fusión) y alta temperatura (0.6-0.7 temperatura homóloga de fusión).

Estudiar la capacidad de soldabilidad por el proceso de FSW de las aleaciones.

Caracterización metalográfica de las aleaciones por microscopía óptica, y microscopía electrónica de barrido.

1.5 Hipótesis

El litio y el aluminio formaran fases como δ' (Al_3Li), así como el magnesio y silicio formaran β (Mg_2Si) y el aluminio-cobre θ (Al_2Cu) que se caracterizan por formarse dentro de la matriz y ser susceptibles a tratamientos térmicos.

El magnesio y litio en aleación con aluminio poseerá una menor densidad, ya que el litio y el magnesio son más livianos.

La soldadura por fricción de la aleación Al-Si-Mg-Li, al ser un proceso que no alcanza temperaturas de fusión del material, presentará una buena unión soldada.

CAPÍTULO II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propiedades del aluminio puro

Las propiedades del Al como baja densidad y resistencia a la corrosión, lo convierten en un material ideal para usar tanto en aplicaciones novedosas como convencionales. Por ejemplo, en la producción de vehículos, empaques de comidas y bebidas, construcción de edificios, transmisión de electricidad, desarrollo de infraestructura en la industria del transporte, producción de equipo aeroespacial y manufactura de maquinaria y herramientas. Dado que la demanda por más tecnología y productos sustentables está aumentando, las oportunidades para el Al continúan expandiéndose. El Al es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, su color es blanco-plateado y pertenece al tercer grupo de la tabla periódica con el número atómico 13. Con base en el carbono 12 su peso atómico es 26.98 uma, el Al no presenta isótopos naturales y su número de coordinación para el oxígeno es de 4 o 6 [8,9].

2.1.1 Propiedades físicas del aluminio

En las últimas décadas, el uso del Al en diferentes aplicaciones industriales ha ido incrementando por considerarse un metal ligero, pues su densidad de 2.70 g/cm^3 es un tercio de la del acero. Además, es muy resistente a la corrosión debido a la formación instantánea de una película de óxido, la cual protege al metal. Su punto de fusión es de $660 \text{ }^\circ\text{C}$, tiene una alta reflectividad y buena conductividad térmica y eléctrica [8,9]. En la tabla 2.1 Se muestran las propiedades de interés del aluminio al 99% de pureza.

Tabla 2. 1 Propiedades físicas del aluminio [8].

Punto de fusión [$^\circ\text{C}$]	660
Punto de ebullición [$^\circ\text{C}$]	2480
Densidad a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [g/cm^3]	2.70

2.1.2 Propiedades mecánicas del aluminio

El Al por ser un material no ferroso, presenta propiedades mecánicas que no son óptimas para la mayoría de las aplicaciones industriales, pero éstas pueden ser incrementadas de manera considerable al añadir otros elementos de aleación tales como cobre, magnesio, silicio, entre otros y posteriormente aplicar tratamientos térmicos [8]. En la tabla 2.2 se presentan las propiedades mecánicas del aluminio 1199 que posee un 99% de pureza.

Tabla 2. 2 Propiedades mecánicas del aluminio [10].

Módulo de elasticidad [GPa]	62
Coefficiente de Poisson	0.33
Dureza, Brinell	12
UTS [MPa]	45
Deformación [%]	50

2.1.3 Estructura cristalina y radio atómico del aluminio

La estructura cristalina es la forma en cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas o iones, estos son empaquetados de manera ordenada y con patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio y a lo largo de muchas distancias atómicas. El aluminio tiene una estructura cristalina cubica centrada en las caras FCC, por sus siglas en inglés face centered cubic, la cual puede observarse en la figura 2.1, el número de coordinación para FCC es 12, el radio atómico es de 1.43 Å [11].

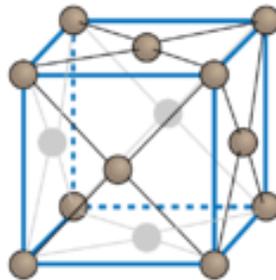


Figura 2. 1 Estructura cristalina del aluminio.

2.2 Propiedades del magnesio

El magnesio es un metal de color gris brillante y es el tercer metal estructural más usado, siguiendo al aluminio y hierro. Las principales aplicaciones del magnesio se encuentran en aleaciones con aluminio o zinc y para procesos de producción de hierro y acero así como titanio en el proceso Kroll [12]. Al igual que el aluminio, el magnesio encuentra su principal aplicación en el área aeroespacial debido a su baja densidad, sin embargo hoy en día es más común ver aplicaciones de aleaciones de magnesio en la industria automotriz tanto como para partes estructurales como de componentes mecánicos [13].

2.2.1 Propiedades físicas del magnesio

La densidad del magnesio es de apenas $\frac{2}{3}$ la del aluminio y pose el punto de fusión más bajo entre los metales alcalinotérreos [14]. El magnesio es flamable especialmente cuando se encuentra en polvos, las temperaturas alcanzadas por las flamas alcanzan los 3100 °C y son difíciles de extinguir por que la combustión continúa en el nitrógeno formando nitruro de magnesio [15]. En la tabla 2.3 se muestran algunas de las propiedades físicas del magnesio.

Tabla 2. 3 Propiedades físicas del magnesio [10].

Punto de fusión [°C]	650
Punto de ebullición [°C]	1091
Densidad a 20 °C [g/cm ³]	1.783

2.2.2 Propiedades mecánicas del magnesio

Las aleaciones de magnesio son bajas en densidad y pueden ser tratadas térmicamente para obtener altas resistencias a la tracción. Estas aleaciones están disponibles tanto para forjado como para vaciado. En la tabla 2.4 se muestran las propiedades mecánicas del magnesio.

Tabla 2. 4 Propiedades mecánicas del magnesio [10].

Módulo de elasticidad [GPa]	44
Coefficiente de Poisson	0.35
Dureza, Brinell	30
UTS [MPa]	90
Deformación [%]	2-6

2.2.3 Estructura cristalina y radio atómico del magnesio

El magnesio tiene una estructura hexagonal, como se observa en la figura 2.2 el número de coordinación es de 12 y el radio atómico es de 1.6 Å [11].

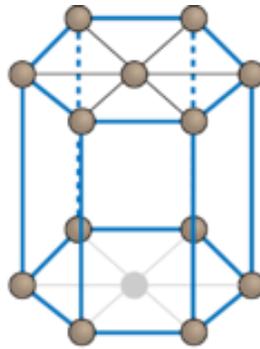


Figura 2. 2 Estructura cristalina del magnesio.

2.3 Propiedades del litio

El litio es un metal suave de color blanco-plateado y se caracteriza por ser el metal y solido más ligero. El litio y sus componentes tiene aplicación en cerámicos resistentes al calor, lubricantes, baterías, entre otros, siendo el más común este último. El litio como elemento aleante en el aluminio es utilizado por su reducción en densidad y aumento en módulo de elasticidad [16].

2.3.1 Propiedades físicas del litio

El litio es lo suficientemente suave para ser cortado con un cuchillo pose una densidad muy baja de apenas 0.534 g/cm^3 , siendo el de menor densidad de todos los elementos solidos a temperatura ambiente. Este metal reacciona con facilidad con el agua formando gas de hidrogeno e hidróxido de litio en solución acuosa por lo que generalmente se almacena en compuestos de hidrocarburos. Además, el litio es corrosivo por lo que requiere un manejo especial para evitar contacto con la piel. El respirar polvo de litio o compuestos de este inicialmente irrita la nariz y garganta mientras que una exposición más prolongada puede llevar a un edema pulmonar [17]. En la tabla 2.5 se muestran las propiedades físicas del litio.

Tabla 2. 5 Propiedades físicas del litio [10].

Punto de fusión [°C]	180
Punto de ebullición [°C]	1342
Densidad a 20 °C [g/cm^3]	0.534

2.3.2 Propiedades mecánicas del litio

Pese a que el litio por sí solo no es utilizado como metal estructural, las propiedades mecánicas son limitadas, en la tabla 2.6 se presentan solo algunas de las propiedades mecánicas del litio.

Tabla 2. 6 Propiedades mecánicas del litio [10].

Módulo de elasticidad [GPa]	--
Coefficiente de Poisson	--
Dureza, Vickers	≤ 5
UTS [MPa]	≤ 15
Deformación [%]	--

2.3.3 Estructura cristalina y radio atómico del litio

El litio tiene una estructura cristalina cubica centrada en el cuerpo BCC, por sus siglas en inglés body centered cubic, como se muestra en la figura 2.3. El número de coordinación es de 8 y el radio atómico de 1.55 Å [11].

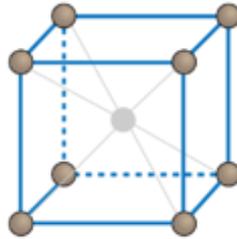


Figura 2. 3 Estructura cristalina del litio.

2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminios

Es conveniente la división de las aleaciones de aluminio en 2 mayores categorías, aleaciones para forja y aleaciones para fundición, cuya principal diferencia se basa en el mecanismo primario de desarrollo de sus propiedades. Varias aleaciones responden a tratamientos térmicos basados en solubilidad de fases. Estos tratamientos incluyen solución térmica (solution heat treatment), temple (quenching) y endurecimiento por precipitación o envejecido (precipitation or age hardening).

Las nomenclaturas para aleaciones de aluminio fueron desarrolladas por la asociación de aluminio (The Aluminium Association) y es ampliamente reconocida, la cual divide en dos familias para aleaciones de forja y de fundición [8].

2.4.1 Aleaciones de forja

Para las aleaciones de forja se emplea un sistema de 4 dígitos para producir una familia de composiciones como se muestra [8]:

- 1xxx: Composición pura (sin aleante). Uso principal en la industria eléctrica y química.
- 2xxx: Aleaciones con cobre como el principal elemento aleante, sin embargo otros elementos como magnesio puede ser agregados. Serie ampliamente utilizada en la industria aeroespacial por su alta resistencia.
- 3xxx: Aleaciones donde el manganeso es el principal elemento de aleación. Uso general en la arquitectura y otros productos.
- 4xxx: Aleaciones donde el silicio es el principal elemento de aleación, usado en barrillas de soldadura.
- 5xxx: Aleaciones donde el magnesio es el principal elemento de aleación, usado principalmente en aplicaciones marinas.
- 6xxx: Aleaciones donde el magnesio y silicio son los principales elementos de aleación, comúnmente usado para extrusiones arquitectónicas y componentes automotrices.
- 7xxx: Aleaciones donde el zinc es el principal elemento de aleación, sin embargo otros elementos como cobre, magnesio, cromo y zirconio pueden ser especificados. Usado en la industria aeroespacial u otra aplicación de alta resistencia. Esta serie se caracteriza por poseer la mayor resistencia de las aleaciones de aluminio.
- 8xxx: Composición miscelánea, como contenidos de hierro y/o litio.
- 9xxx: Reservada para un uso futuro.

2.4.2 Aleaciones de fundición

En las aleaciones de fundición se describen por un sistema de tres dígitos seguido por un valor decimal. El decimal .0 en todos los casos pertenece a los límites de aleación de fundición. Decimal .1 y .2 concierne a las composiciones de lingote. Familias de aleación para fundición se muestran a continuación [8]:

- 1xx.x: Composición pura, sin aleación.
- 2xx.x: Aleaciones en las que el cobre es el elemento de aleación principal. Otros elementos pueden ser especificados.
- 3xx.x: Aleaciones en las que el silicio es el elemento principal de aleación. Los otros elementos de aleación como cobre y magnesio son especificados. Esta serie abarca casi el 90% de todas las fundiciones de forma producidas.
- 4xx.x: Aleaciones donde el silicio es el principal elemento de aleación.
- 5xx.x: Aleaciones donde el magnesio es el principal elemento de aleación.
- 6xx.x: Sin uso
- 7xx.x: Aleaciones donde el zinc es el principal elemento de aleación. Otros elementos como cobre y magnesio pueden ser especificados.
- 8xx.x: Aleaciones donde el estaño es el principal elemento de aleación.
- 9xx.x: Sin uso

2.5 Aleaciones Aluminio-Litio

El uso de aleaciones de aluminio litio en aplicaciones aeroespaciales se remonta a la década de 1950 con el desarrollo de la aleación 2020 que contenía un 4.5% de peso en cobre y 1.2% de peso en litio. El interés en estos materiales disminuyó por un tiempo, hasta que la crisis del petróleo en 1973, cuando el precio del combustible forzó la búsqueda de materiales livianos para la industria aeronáutica. En los 1980 la segunda generación de aleaciones aluminio-litio fue desarrollada con contenidos de 1.9 al 2.7% en peso de litio, como lo son las aleaciones 2090, 2091 y la 8090 entre otras, sin embargo esta generación de aleaciones presentaba problemas de anisotropía, baja rigidez y poca resistencia a la corrosión por lo que la segunda generación no obtuvo un amplio uso en la industria aeronáutica. En la década de 1990 se presentó la tercera generación de aleaciones aluminio-litio en la que se redujo aún más el contenido de litio (0.75 al 1.8% de peso) las cuales no solo presentaban reducciones de densidad sino que se mejoraban las desventajas de corrosión presentadas en la generación anterior, buena resistencia y rigidez en combinación con las técnicas estándar de manufactura. En la figura 2.4 se presenta el diagrama de fases

Aluminio-Litio, sin embargo en el caso de las aleaciones de en estudio lo más importante es la parte rica en aluminio [18].

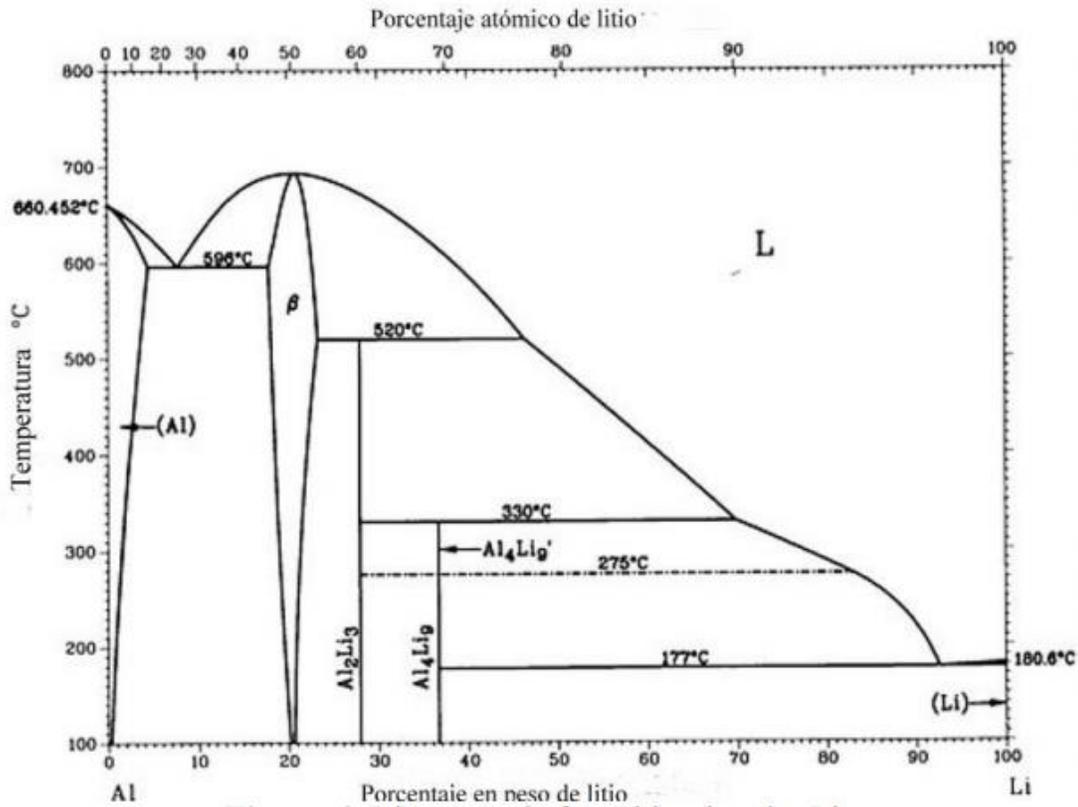


Figura 2. 4 Diagrama de fases Aluminio – Litio [18].

2.6 Aleaciones Aluminio-Magnesio

Las aleaciones aluminio-magnesio se encuentran en las series 5xxx de forja tanto como en las 5xx.x de fundición. Estos grupos son de moderada a alta resistencia y buena tenacidad. Generalmente están compuestas por un amplio rango de concentraciones de magnesio, desde el 0.8% en peso en la aleación 5005 hasta un 5.1% en las aleaciones 5182 y 5056 que son utilizadas en los paneles automotrices. Las aleaciones de estas series poseen buenas propiedades de soldadura y buena resistencia a la corrosión en atmosferas marinas. Sin embargo, ciertas limitaciones deben considerarse en la cantidad de trabajo en frio y la temperatura de operación permisible para las aleaciones con un contenido mayor a 3.5% y

una temperatura mayor a 65 °C con el fin de evitar fractura por corrosión [8]. En la figura 2.5 se presenta el diagrama de fases Aluminio-Magnesio.

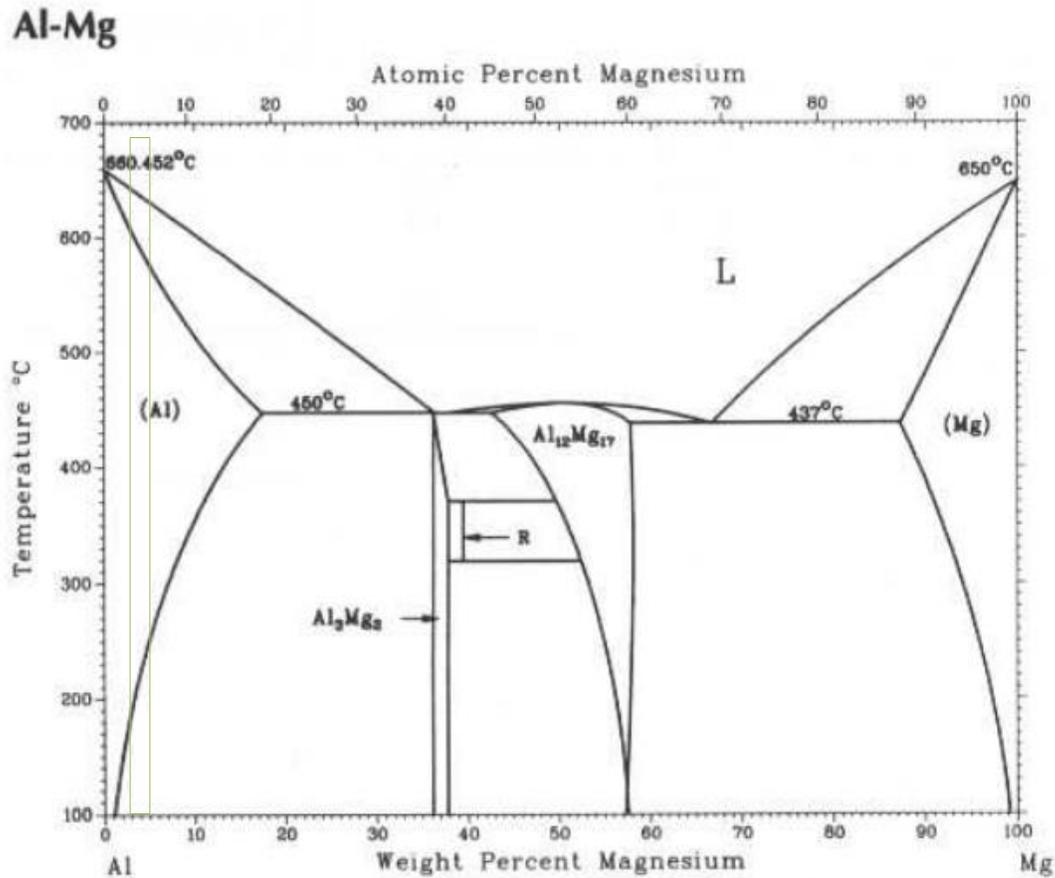


Figura 2. 5 Diagrama de fases Aluminio – Magnesio [19].

2.7 Aleaciones Aluminio-Silicio

La aleación A380 pertenece a la serie de fundición 3xx.x, siendo estas las de mayor uso comercial por su alta fluidez capaces de llenar cavidades de formas sencillas y complejas. El mayor elemento de aleación en esta serie es el silicio variando en un rango de 5% hasta un 22% en peso por lo que se pueden clasificar como hipoeutéticas (5 a 10%), eutéticas (11 a 13%) e hipereutéticas (14 a 20%) como se ilustra en la figura 2.6, sin embargo, esta serie también puede contener magnesio, cobre o ambos y en casos específicos adiciones de

níquel o berilio. El contenido de cobre se encuentra en un rango de 0% hasta un 4.5% y un contenido de magnesio tan bajo como 0.3% hasta 0.6% para las composiciones de alta resistencia, 1% para la aleación de pistones 332.0 y 336.0 y hasta un máximo de 0.10% para las composiciones de die casting 380.0 hasta 384.0. Ambos, cobre y magnesio incrementan la resistencia y dureza en la aleación en la condición “as cast”, sin embargo es posible aumentar las propiedades aún más por envejecimiento artificial T5 o incluso un tratamiento por solución seguido de un envejecimiento artificial T6 o T7. Dependiendo en la composición, el endurecimiento por precipitación es debido a los precipitados basados en Mg_2Si , Al_2Cu , Al_2CuMg o una combinación de estas fases [8]. En la figura 2.6 se presenta el diagrama de fases aluminio-silicio.

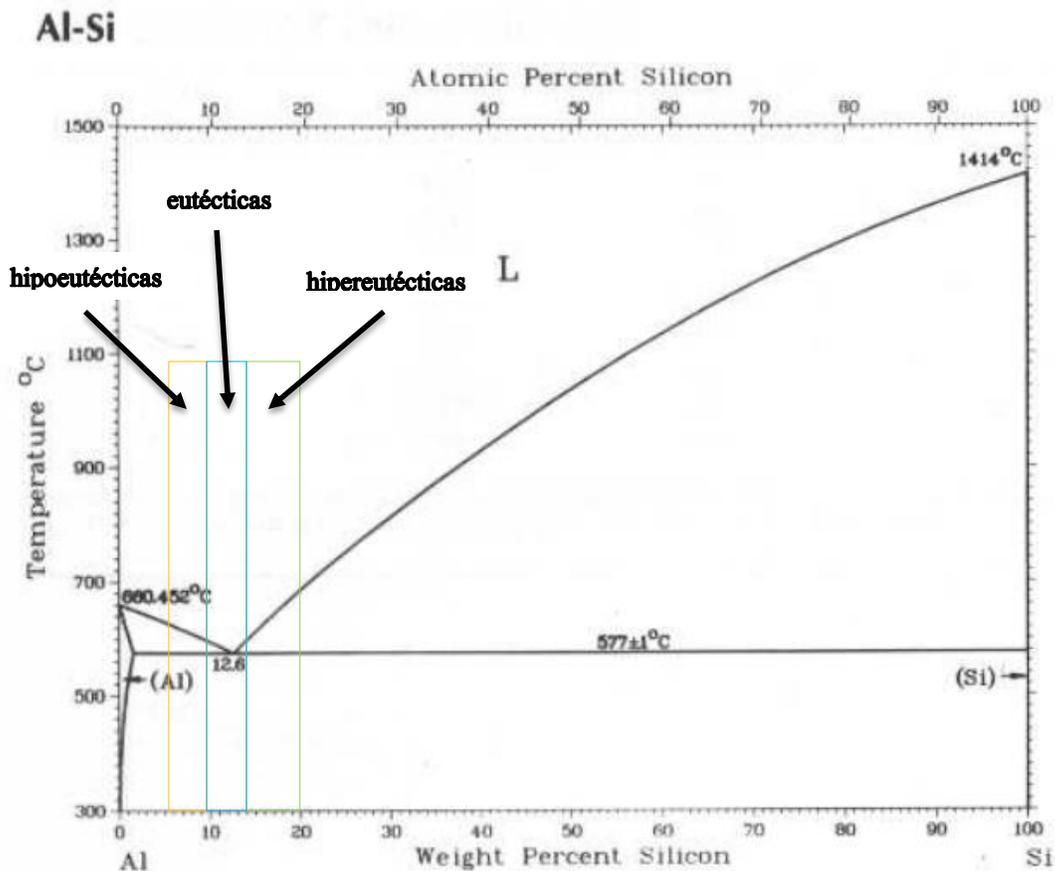


Figura 2. 6 Diagrama de fases Aluminio – Silicio [20].

2.8 Aleaciones A380

El aluminio A380 es por mucho el más utilizado en procesos de fundición a presión (die casting), ofreciendo la mejor combinación de propiedades y una facilidad de producirlo. Sus aplicaciones incluyen equipos electrónicos y comunicación, componentes automotrices, soportes de motor, cubiertas de mecanismos y transmisión, carcazas de máquinas podadoras de césped, componentes mobiliarios, herramientas de mano eléctricas.

2.8.1 Composición química

En la tabla 2.7 se muestra el rango de composición química estándar de los elementos de aleación 380 [8].

Tabla 2. 7 Composición química de la aleación 380 [8,10].

Aleación	Composición química [% wt]					
	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Otros
A380	7.5-9.5	1	3-4	0.1	0.5	0.5 Ni, 3 Zn, 0.35 Sn

2.8.2 Microestructura

En la figura 2.7 se muestra la microestructura regular de un aleación A380, la cual contiene una fase continua de aluminio en forma dendrítica (α) mostrada como regiones color blanco; islas eutécticas de silicio color gris oscuro en forma acicular o de aguja, las cuales tienen una morfología similar a la escritura china, dichas islas eutécticas están entre dendríticos y precipitaciones intermetálicas con color gris claro. Las dimensiones de las partículas de silicio se observan dentro del rango de 10-40 μm y están localizadas dentro de las islas eutécticas [21].

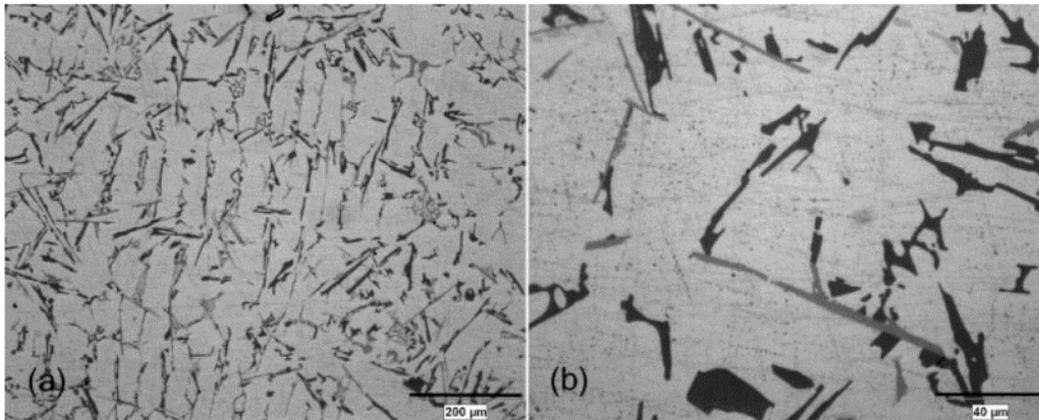


Figura 2. 7 Micrografías de la aleación A380 [21].

2.8.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la aleación A380 se describen en la tabla 2.8 [10].

Tabla 2. 8 Propiedades mecánicas de la aleación A380 [10].

Módulo de elasticidad [GPa]	71
Coefficiente de Poisson	0.33
Dureza, Brinell	80
UTS [MPa]	324
Deformación [%]	3.5

2.9 Soldadura de Aluminio

El aluminio posee varias propiedades físicas y químicas que es necesario entender al usar los distintos procesos de soldadura. Las propiedades específicas que afectan en la soldadura son las características de sus óxidos; la solubilidad del hidrogeno en el aluminio líquido; sus características térmicas, eléctricas y no magnéticas; la ausencia de cambio de color al ser calentado; y su amplio rango de propiedades mecánicas y temperaturas de fusión resultado de las aleaciones con otros elementos [8,9,22].

La soldadura por fricción y agitación es un proceso innovador de estado sólido inventado en 1991 en el cual el material es unido por calor de fricción y deformación plástica. Este proceso ofrece ventajas al soldar metales que comúnmente se consideran insoldables, tales como el aluminio, magnesio y aleaciones de cobre. Estudios demuestran que la soldadura por fricción puede evitar la pérdida de litio así como las grietas en caliente y poros que comúnmente son generados en los procesos de fusión, obteniendo así una mejora en las propiedades mecánicas de la unión soldada [23–30].

2.10 Proceso de Soldadura FSW (Friction Stir Welding)

La soldadura por fricción (FSW, por sus siglas en inglés Friction Stir Welding), es un proceso de soldadura en estado sólido, es decir, sin alcanzar puntos de fusión de los materiales. La unión es producida a lo largo de las piezas de trabajo por inserción de una herramienta con la fuerza axial necesaria para mantener el contacto entre el hombro y el material de trabajo generando las condiciones termo-mecánicas necesarias para la unión soldada [31]. La herramienta se mantiene en rotación, lo que produce la fricción y agitación entre las dos superficies de trabajo, una de ellas, dependiendo del sentido de rotación, horario o antihorario, tendrá un avance positivo de agitación y la otra superficie un retroceso en la agitación. La translación de la herramienta produce la unión [32]. El proceso se muestra en la figura 2.8.

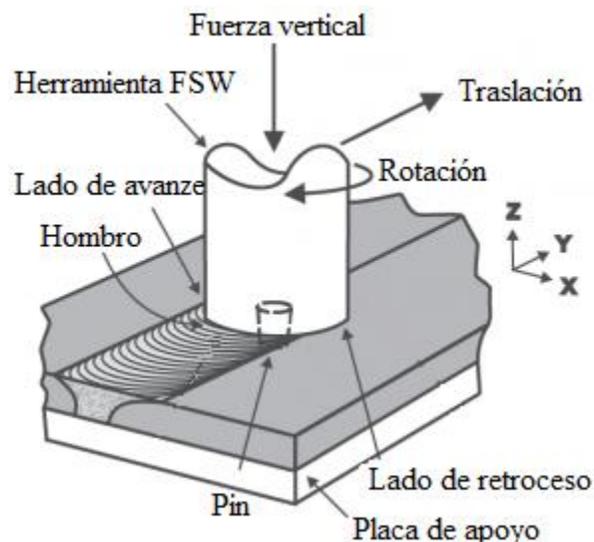


Figura 2. 8 Soldadura por fricción [33].

2.10.1 Equipo del proceso FSW

El equipo para realizar soldadura por fricción es relativamente sencillo, al ser un proceso que no requiere protección por gases ni aporte de material, en este proyecto se utilizó una fresadora vertical CNC para el control apropiado de revoluciones y velocidad de avance que son los parámetros primarios del proceso.

2.10.2 Parámetros operativos

Los parámetros operativos se clasifican en parámetros fijos y primarios, los cuales se enlistan a continuación:

1. Parámetros fijos (Factores que no se pueden modificar una vez iniciado el proceso):
 - Tipo de material a soldar.
 - Material del pin.
 - Geometría del pin (Diámetro del hombro y pin, altura y perfil del pin).
 - Tipo de unión.
 - Tipo de preparación de la unión.
 - Espesor del material a soldar.

2. Parámetros primarios (factores que se pueden variar durante el proceso):
 - Frecuencia rotacional.
 - Fuerza axial.
 - Velocidad de entrada.
 - Velocidad de avance.
 - Velocidad de salida.
 - Ángulo del pin.

2.10.3 Zonas de soldadura FSW

Las uniones soldadas mediante este proceso presentan cambios microestructurales divididas en zonas, las cuales son visualmente apreciadas en un corte trasversal de la unión soldada seguido de procedimientos estándar de metalografía. Figura 2.9.

2.10.3.1 Metal base (MB)

Esta zona no presenta ningún cambio microestructural ni ciclo térmico, por lo que las propiedades se consideran las del metal base.

2.10.3.2 Zona Afectada térmicamente (HAZ - Heat affected zone)

Es la zona en común de todos los procesos de soldadura, esta sufre un ciclo térmico más no una deformación de material durante la soldadura. Las temperaturas son menores que en la TMAZ (Thermo-mechanical affected zone - Zona afectada termo-mecánicamente) más sin embargo puede llegar a tener mucha influencia en materiales con tratamientos térmicos previos, exhibiendo así las peores propiedades mecánicas de toda la unión soldada en esta región [34].

2.10.3.3 Zona Afectada Termo-mecánicamente (TMAZ - Thermo-mechanical affected zone)

Se localiza a los lados de la zona de agitación. En esta región la deformación y la temperatura son menores y los efectos de la soldadura son correspondientemente menores. A diferencia de la zona de agitación, los granos son similares al del metal base.

2.10.3.4 Zona de Agitación (NZ - Nugget Zone) o Stir Zone

También conocida como la zona de re-cristalización dinámica, es una región altamente deformada que corresponde al paso del pin durante la soldadura. Los granos de esta zona son equiaxiados y normalmente de una magnitud menor a la del metal base [35].

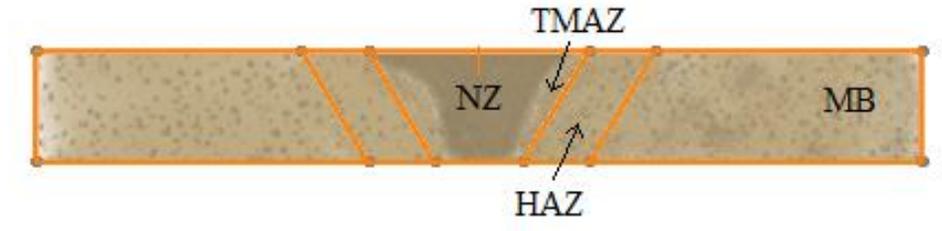


Figura 2. 9 Zonas características del proceso de soldadura por fricción.

2.11 Medición de temperatura

2.11.1 Termopar

Un termopar es una unión entre dos metales diferentes que produce una fuerza electromotriz relacionada con una diferencia de temperatura. Los termopares son un tipo ampliamente usado como sensor para la medición y control de temperatura.

Los dos conductores de diferentes materiales están conectados entre sí mediante la unión de medición, los otros extremos (las uniones de referencia) estando conectados, ya sea directamente o por algún medio adecuado, a un dispositivo para la medición de la fuerza termo electromotriz generada en el circuito.

La fuerza electromotriz generada por un termopar es una función de las temperaturas de las uniones de medición y de referencia, pero, más específicamente, que se genera como resultado de los gradientes de temperatura que existen a lo largo de las longitudes de los conductores. Mediciones efectivas y calibraciones son posibles sólo si las uniones se mantienen en las regiones isotérmicas y a una profundidad suficiente para superar las

pérdidas de calor (o ganancias), asegurando así que cada unión llega realmente a la temperatura de su entorno.

La magnitud de la fuerza electromotriz depende de los materiales de los conductores utilizados para el termopar y su condición metalúrgica. Los cambios posteriores en la composición del material y la contaminación, la tensión mecánica, o cambios bruscos de temperatura, también influyen y modifican la fuerza electromotriz y la calibración asociada.

Cuando la calibración se lleva a cabo, se garantizará que los efectos debidos a las influencias que figuran a continuación se reducen al mínimo.

Las influencias potenciales que deben tomarse en cuenta son:

- 1.- Mal contacto o la conducción de calor a lo largo del termopar (falta de inmersión).
- 2.- Variación de la temperatura con el tiempo y la distribución espacial de temperatura en la fuente térmica.
- 3.- Los efectos debidos a la utilización de cables de extensión o compensación.
- 4.- Interferencia electromagnética.
- 5.- Tensiones mecánicas o deformaciones.
- 6.- Oxidación u otra contaminación química.
- 7.- Cambios en la composición de la aleación, condición física o estructura cristalina.
- 8.- Condiciones del aislamiento [36].

Existen varios tipos de termopares en dependencia del material del cual estén hechos y rangos de temperatura, se designan por letras en la Tabla 2.7, se muestran algunos de los más importantes.

Tabla 2. 9 Termopares y sus características.

Tipo de termopar	Material (+) VS. (-)	Rango de temperatura °C
B	Platino/Rodio (30%) vs Platino/Rodio (6%)	0/1820
E	Niquel/Cromo vs Cobre/Niquel	-270/1000
J	Hierro vs Cobre/Niquel	-210/1200
K	Niquel/Cromo vs Niquel/Aluminio	-270/1372
R	Platino/Rodio (13%) vs Platino	-50/1768
S	Platino/Rodio (10%) vs Platino	-50/1768
T	Cobre vs Cobre/Niquel	-270/400
N	Niquel/Cromo/Silicio vs Niquel/Silicio/Magnesio	-270/1300

La fuerza electromotriz depende de los materiales de los conductores utilizados por el termopar y sus condiciones metalúrgicas.

La Figura 2.10 muestra la fuerza electromotriz correspondiente a la temperatura para cada tipo de termopar.

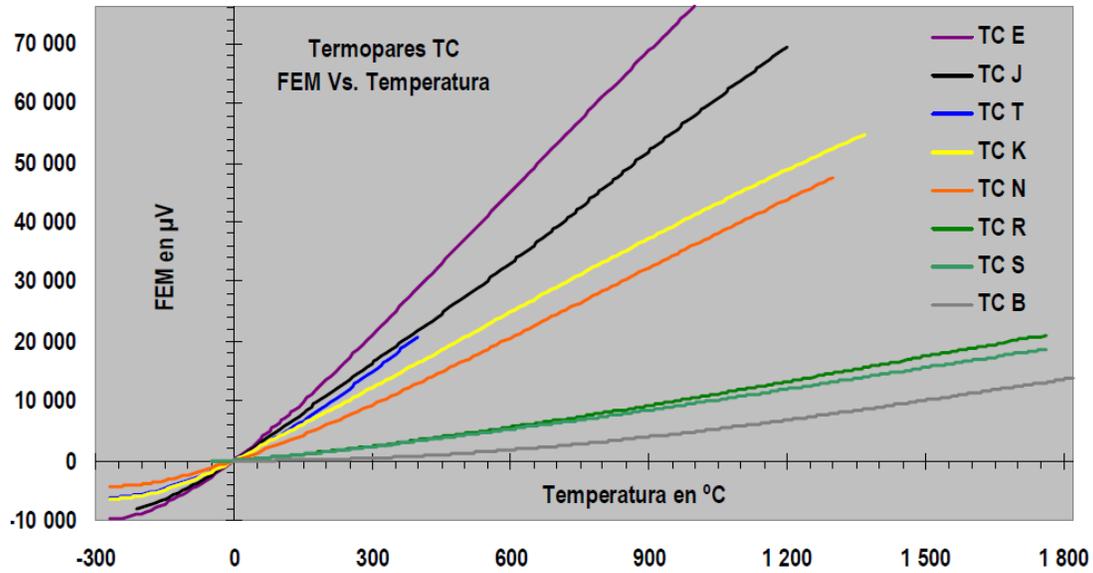


Figura 2. 10 Termopares; fuerza electromotriz contra temperatura.

Existe un código de colores, con el propósito de establecer uniformidad en la designación en los termopares y cables de extensión, por medio de colores en sus aislamientos, para identificar su tipo así como también su polaridad, Figura 2.11.

Código ANSI	Combinación de la aleación		Código de color	
	+	-	Termopar	Extensión
E	Cromel níquel - cromo Ni-Cr	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
J	hierro Fe	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
T	cobre Cu	Constantan cobre - níquel Cu-Ni		
K	Cromel níquel - cromo Ni-Cr	Alumel níquel - aluminio Ni-Al		
N	Nicrosil níquel - cromo - silicio Ni-Cr-Si	Nisil níquel - silicio - magnesio Ni-Si-Mg		
R	platino - 13% rodio Pt-13% Rh	platino Pt	No establecido	
S	platino - 10% rodio Pt-10% Rh	platino Pt	No establecido	
B	platino - 30% rodio Pt-30% Rh	platino - 6% rodio Pt-6% Rh	No establecido	

Figura 2. 11 Código de colores en los termopares.

2.11.2 Calibración de termopares por comparación

La norma ASTM E 220-02 [37], es aplicable para la calibración de termopares en un rango de -195 a 1700 °C y en general es excesivo para termopares que no se han usado con anterioridad, debido a la falta de homogeneidad en el material que estos presentan. La calibración por comparación consiste en medir la fuerza electromotriz del termopar en un medio, mientras simultáneamente, se mide con un termómetro de referencia. El termómetro de referencia puede ser cualquiera, que tenga menor incertidumbre, al termómetro a calibrar, por ejemplo, el de resistencia de platino (SPRTs-Standard platinum resistance thermometers-) para uso en temperaturas entre -196 a 962 °C, con incertidumbres tan bajas de 0.001 °C. Para temperaturas mayores a 620 °C un horno cilíndrico eléctrico con una zona isotérmica localizable es normalmente usado. La elección de un instrumento para la medición de la fuerza electromotriz del termopar dependerá en la exactitud de la calibración deseada, siendo un voltímetro digital el más usado. Al conectar los cables al voltímetro, es necesario que sean de por lo menos 30 cm de largo para evitar capturar ruidos electromagnéticos.

Mediante la calibración por comparación, existe una desviación admisible entre la temperatura de referencia y la del termopar a prueba, la cual no debe ser mayor a 5 °C, de existir esta, la desviación de la fuerza electromotriz es corregida mediante el uso de software ya que no es recomendable sumar o restar la temperatura de desviación sino corregir la fuerza electromotriz [37].

CAPÍTULO III MATERIALES, EQUIPOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción preliminar

La presente tesis se realizó en dos grandes etapas; fundición y vaciado en moldes de grafito para la obtención de muestras para pruebas de tensión y dureza a temperatura variable; fundición y vaciado en moldes permanentes para la obtención de placas y realizar soldadura por fricción a tope. En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo y los pasos comprendidos dentro de las dos etapas.

Se diseñó y fabricó una modificación a la máquina de fluencia para la obtención de dureza en función de la temperatura, considerando la carga aplicada y la medición de la indentación, el proceso se describe a mayor detalle en la sección 3.3.1.2.

La soldadura por fricción se llevó a cabo a partir de adaptaciones en una fresadora vertical CNC utilizando un pin de acero AISI 1045 tratado térmicamente, el cual de igual manera se diseñó y fabricó en el taller de máquinas y herramientas.

Todos los resultados se obtuvieron en equipos de la Universidad Autónoma de Zacatecas a excepción de la microscopía electrónica, la cual se realizó en Saltillo en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. para las muestras de tensión y dureza y en la Universidad Autónoma de Aguascalientes para las uniones soldadas por FSW.

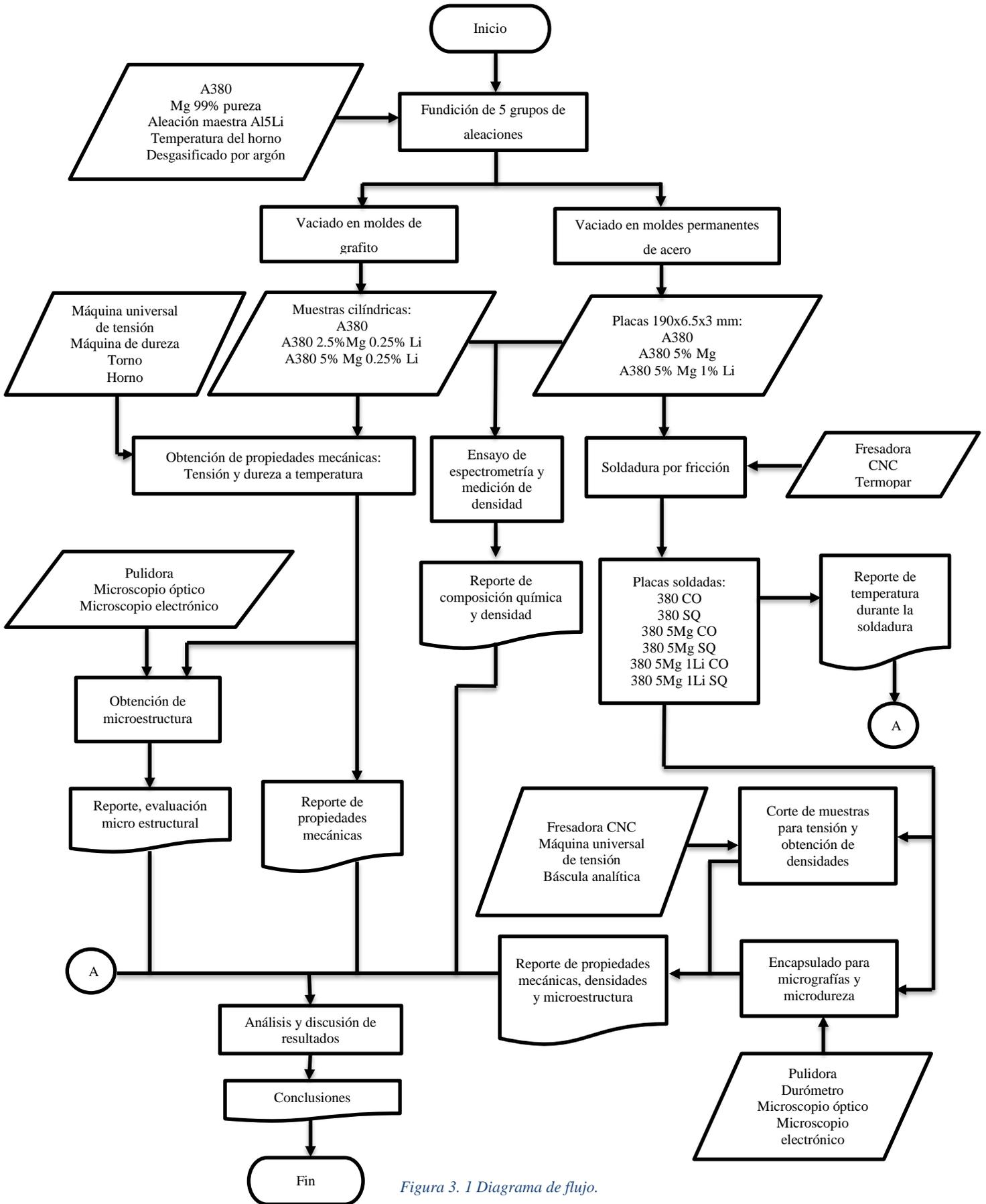


Figura 3. 1 Diagrama de flujo.

3.1 Materiales

En la primera etapa, la etapa de fundición, se utilizó una aleación de aluminio de fundición A380, magnesio con una pureza del 99% y una aleación maestra de aluminio-litio Al5Li. Figura 3.2.



Figura 3. 2 Materiales utilizados para la fundición.

Además, se utilizaron 8 juegos de placas de acero AISI 1020 de 254 mm x 63.5 mm x 3.75 mm y tornillería para la creación del molde en el cual se formaron las placas para el proceso de soldadura por fricción.

El pin utilizado durante la soldadura fue construido a partir de una barra de acero AISI 1045 con diámetro de 12.7 mm el cual se maquinó a geometría específica utilizando el torno y fresadora del taller y las muflas para realizar un tratamiento térmico de templado y revenido.

Para el análisis metalográfico se utilizó polvo termoplástico transparente (lucita) para la encapsulación de muestras, lijas de SiC (carburo de silicio) con granulometría de 100, 120, 240, 400, 600, 1000, 1500, 3000; alúmina (Al_2O_3), paño *Dip-Floc* para 0.05 μm , además del maquinado del porta muestras para la microscopía electrónica a partir de una barra de aluminio A6061.

3.2 Equipos

3.2.1 Fundición

Para llevar a cabo el proceso de fundición se utilizó un horno eléctrico de resistencia para realizar la fundición de la aleación de aluminio A380 de acuerdo con el porcentaje requerido de magnesio y litio, un desgasificado con argón y posteriormente realizar el vaciado. Figura 3.3.

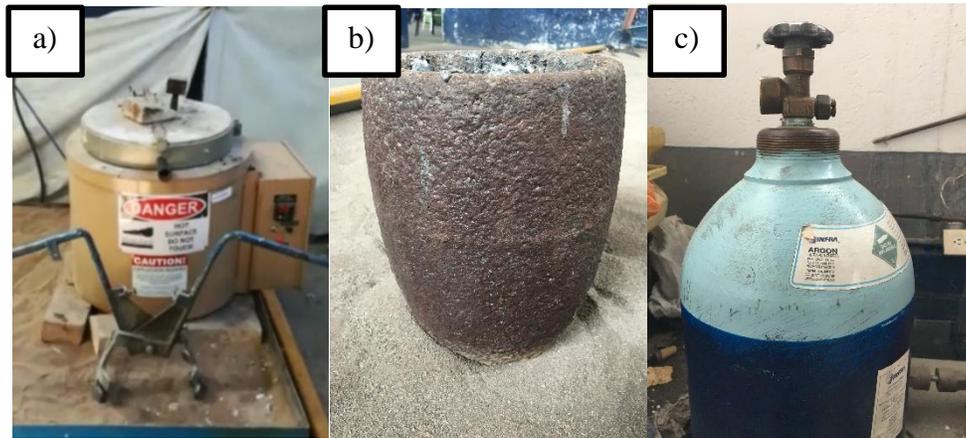


Figura 3. 3 a) Horno de resistencia; b) Crisol; c) Tanque de gas argón.

La obtención de pesos de adición para los porcentajes deseados de aleación se realizó por medio de una báscula digital CRT CCS-H con una margen de error de 0.002 Kg. Figura 3.4.



Figura 3. 4 Báscula digital.

Se realizó análisis químico de las aleaciones por el método de espectrometría de chispa con el equipo *Q4 TASMÁN*. Figura 3.5.



Figura 3. 5 Equipo de espectrometría de chispa.

3.2.2 Propiedades mecánicas

Para realizar las probetas de tensión se utilizó un torno modelo *GH-1340A* para las probetas cilíndricas y la fresadora CNC modelo *XK7130A*, marca *GSK* para las probetas planas de soldadura. De igual manera se empleó el torno para la elaboración de las probetas de dureza. Figura 3.6.



Figura 3. 6 a) Torno convencional; b) Fresadora CNC.

Ambos ensayos de tensión se llevaron a cabo en una máquina universal *Shimadzu (AG-1)* de 100 KN. Figura 3.7.



Figura 3. 7 Equipo de ensayos de tensión uniaxial.

La medición de dureza a temperatura se realizó en una máquina diseñada y fabricada en la universidad empujando un injerto de carburo de tungsteno como indentador, un horno de resistencia, una serie de pesos como carga y un termómetro *Digi-Sense* utilizando un termopar tipo E. Las indentaciones fueron medidas en un comparador óptico marca *Nikon* Modelo 6c. Figura 3.8 y 3.9.



Figura 3. 8 Máquina de dureza a temperatura.

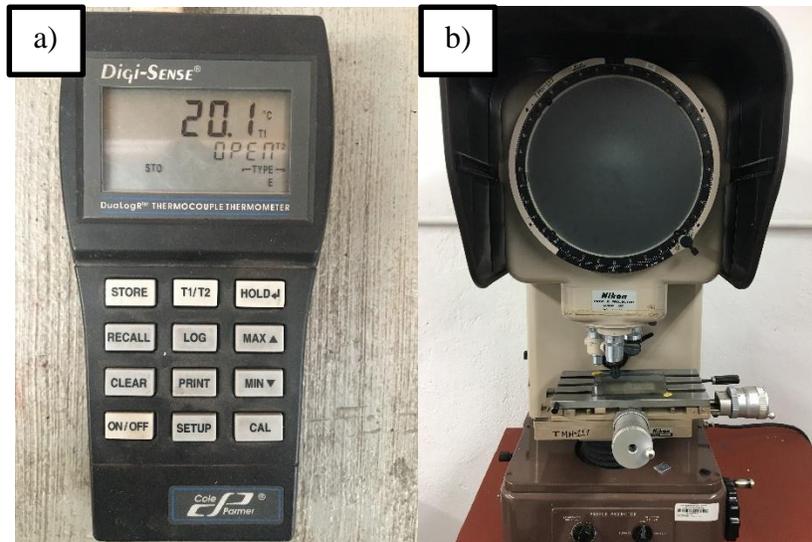


Figura 3. 9 a) Termómetro portable con termopar tipo E; b) Comparador óptico.

Para la medición de microdureza en las uniones soldadas se empleó un micro-durómetro marca *Shimadzu modelo HMV* utilizando un micro-identador de punta de diamante en forma piramidal. Figura 3.10.



Figura 3. 10 Mico-durómetro.

3.2.3 Soldadura por fricción y agitación

En el proceso de soldadura por fricción y agitación se utilizó la fresadora CNC utilizando como base una placa de acero y unas mordazas para la sujeción de las placas. Figura 3.11.

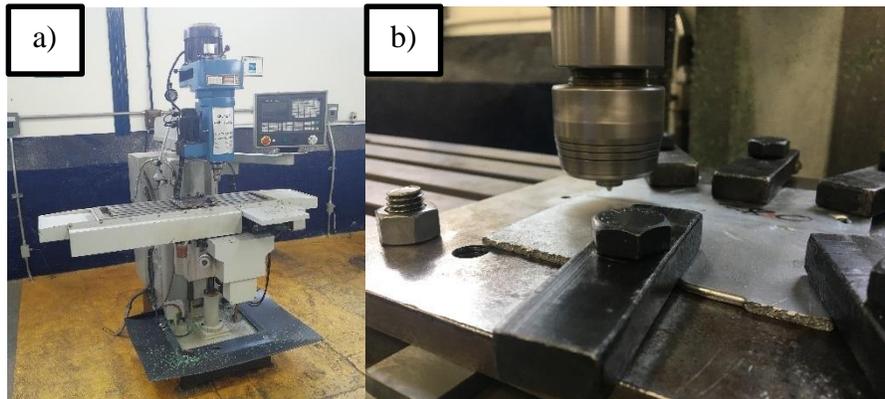


Figura 3. 11 a) Fresadora CNC; b) Aditamentos para la sujeción de placas para soldadura FSW.

La obtención de la temperatura durante el proceso de FSW in-situ, se empleó un termopar tipo K y la tarjeta de adquisición de datos *Omega* modelo *OMB-Net 6000 Series*. Figura 3.12.



Figura 3. 12 Tarjeta de adquisición de datos Omega.

3.2.4 Metalografía

El desbaste grueso, medio y pulido se realizó en una pulidora marca *Metkon* modelo *Forcipol*. Figura 3.13a. Utilizando un microscopio óptico marca *Union Versament* modelo III para las fotomicrografías. Figura 3.13b.

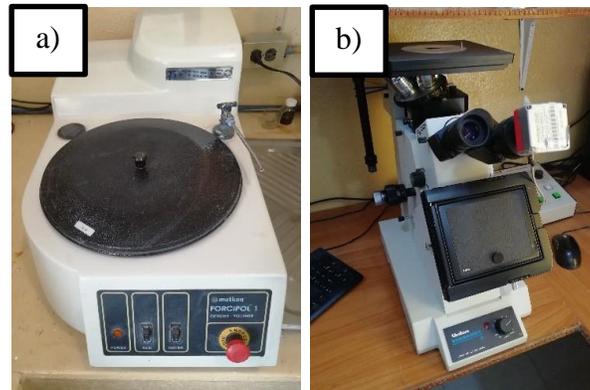


Figura 3. 13 a) Pulidora Metkon; b) Microscopio óptico metalográfico.

El microscopio electrónico de barrido (SEM, Scanning Electron Microscope) de la marca *JEOL*, modelo *JSM-5900LV* y aditamento de espectrometría de dispersión de rayos x (EDS, energy-dispersive X-ray spectrometer) de la marca *Oxford Instruments* modelo 7274 fue utilizado para el análisis de la microestructura y las fases presentes. Figura 3.14.



Figura 3. 14 Microscopio electrónico de barrido.

3.3 Metodología

3.3.1 Tensión y dureza

3.3.1.1 Fundición

En la primera etapa se realizaron los cálculos necesarios para obtener la concentración de elementos deseados para la aleación. Como material base se utilizaron lingotes de aluminio A380, y como elementos de adición lingotes de magnesio con una pureza establecida al 95% al igual que lingotes de aleación maestra aluminio-litio con una concentración de 5% litio (Al5Li) el cual contenía un 6.16% litio de acuerdo a la hoja de datos del proveedor.

La ecuación 1 muestra el cálculo realizado para la adición en peso de los elementos aleantes:

$$\text{Material de adición en peso} = \frac{(CD - CE)(PM)}{CMA}$$

Ecuación 1. Fórmula para calcular pesos necesarios de adición.

Donde:

CD: Concentración deseada en la aleación. [% de peso]

CE: Concentración existente en el material base. [% de peso]

PM: Peso a fundir del material base. [Gramos]

CMA: Concentración del material de adición. [% de peso]

El cálculo utilizado para la obtención de adición de 0.25% litio y 2.5% magnesio como primera aleación, se expresan en la ecuación 2 y 3:

$$\text{Gramos de Al5Li} = \frac{(0.25\%)(760 \text{ g})}{6.16\%} = 30.84 \text{ g}$$

Ecuación 2. Cálculo de adición de litio al 0.25%, fundición 1.

$$\text{Gramos de Mg} = \frac{(2.5\% - 0.25\%)(760 \text{ g} + 30.84 \text{ g})}{95\%} = 18.73 \text{ g}$$

Ecuación 3. Cálculo de adición de magnesio al 2.5%, fundición 1.

El peso de la aleación base A380 es de 760 gramos, la aleación base no contiene litio por lo que CE es cero. La adición de litio es el primero en calcularse ya que de los elementos aleantes es el de menor concentración por lo que podría aportar el mayor peso y repercutir en las concentraciones finales. Para la adición de magnesio es necesario considerar la masa añadida de la aleación de Al5Li por lo que el peso incrementa de 760 a 790.84 gramos (30.84 gramos más correspondientes a Al5Li). También es necesario considerar la cantidad de magnesio ya presente en el material base, en este caso de un 0.25% por lo que este se considera dentro de la ecuación.

El cálculo utilizado para la obtención de adición de 0.25% litio y 5% magnesio como segunda aleación, se expresan en la ecuación 4 y 5:

$$\text{Gramos de Al5Li} = \frac{(0.25\%)(820 \text{ g})}{6.16\%} = 33.27 \text{ g}$$

Ecuación 4. Cálculo de la adición de litio al 0.25%, fundición 2.

$$\text{Gramos de Mg} = \frac{(5\% - 0.25\%)(820 \text{ g} + 33.27 \text{ g})}{95\%} = 42.66 \text{ g}$$

Ecuación 5. Cálculo de la adición de magnesio al 5%, fundición 2.

Una vez obtenidos los cálculos, se cortaron fragmentos de los lingotes hasta obtener el peso requerido. Figura 3.15.



Figura 3. 15 Corte en fragmentos de lingotes y obtención de peso.

La fundición se realizó en 2 ocasiones, una para obtención de la aleación con 2.5% magnesio 0.25% litio y otra para 5% magnesio 0.25% litio. El horno se estableció a 720 °C colocando solo la aleación A380 en un crisol limpio hasta fundir. Después se agregaron las cantidades de peso de adición de elementos previamente calculadas permitiendo su fundición dentro del crisol. Por último se realizó un desgasificado con argón por medio de una lanza de grafito con un flujo de 5 pie³/hora por un tiempo de 5 minutos para después remover la escoria generada y preparar para el vaciado. Figura 3.16.

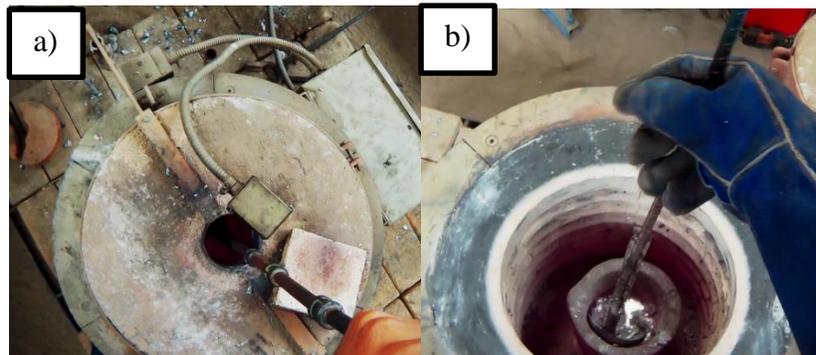


Figura 3. 16 a) Desgasificado con argón; b) Remoción de escoria.

El vaciado se efectuó en moldes cilíndricos de grafito dejando enfriar a temperatura ambiente. Otra pequeña porción se vació en pequeños contenedores de acero para después maquinar la superficie y verificar por espectrometría de emisión de chispa la composición química resultante. Figura 3.17.

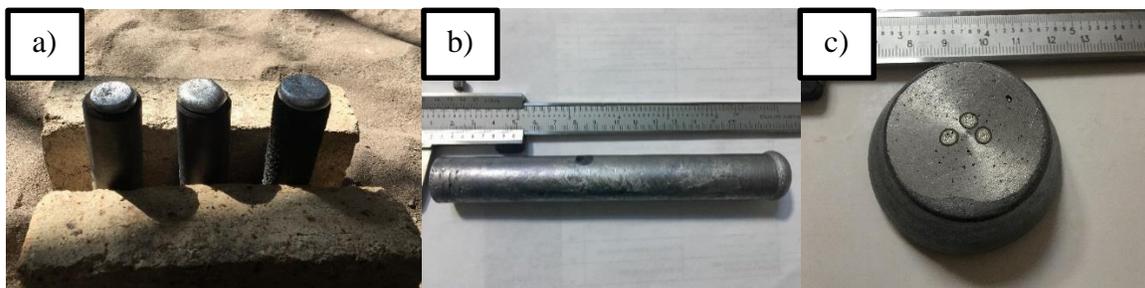


Figura 3. 17 a) Vaciado en moldes de grafito; b) Probetas cilíndricas; c) Muestras de ensayo para espectrometría.

3.3.1.2 Diseño, construcción y operación de la máquina de dureza

1. Diseño y fabricación:

- Diseño de los aditamentos en CAD. Para el cual se empleó el software SolidWorks 2018 (Anexos 1-6). En la figura 3.18 se muestran los aditamentos necesarios a la máquina de fluencia y una vista seccionada del diseño del indentador. La figura 3.19 muestra la máquina con los aditamentos ensamblados.

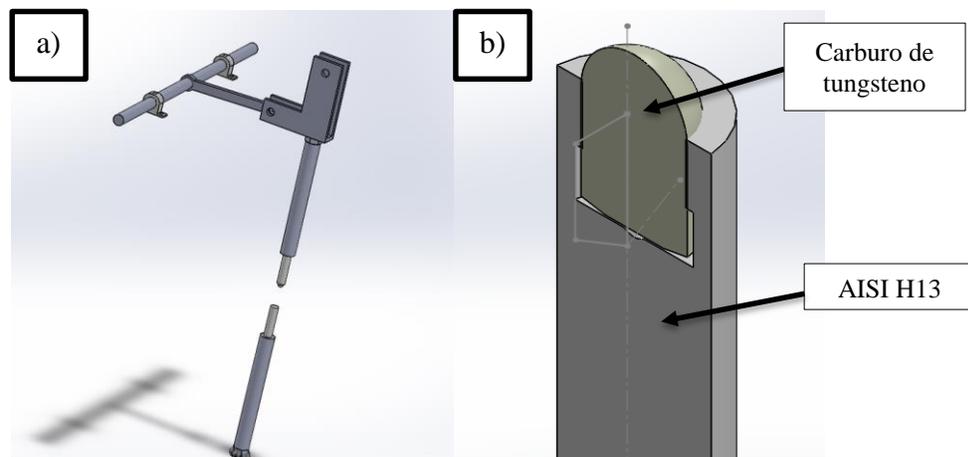


Figura 3. 18 a) Aditamentos a la máquina de fluencia; b) Vista seccionada del injerto de carburo de tungsteno.

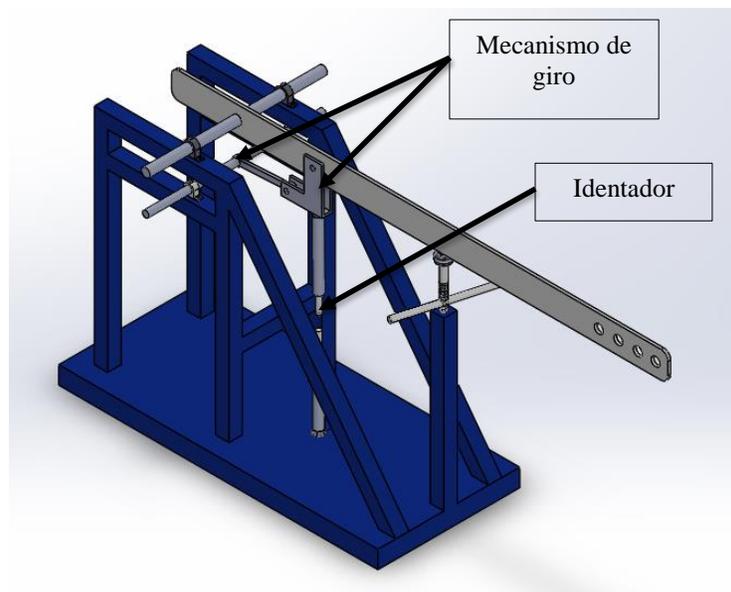


Figura 3. 19 Máquina de dureza en CAD.

- Materiales para la fabricación. Fue necesario adquirir 2 rodamiento autoajustables de piso de $\frac{1}{2}$ " , un balero de bolas de carga radial, una barra de acero AISI 1018 de $\frac{3}{8}$ " de diámetro por 400 mm de largo, un tramo de solera de $\frac{1}{4}$ " de espesor por 2" de ancho, una barra de acero cold rolled de $\frac{5}{8}$ " de diámetro por 500 mm de largo, un tramo de acero AISI H13 de 300 mm, un identador esférico de carburo de tungsteno.
- Fabricación de las piezas. Se utilizó el torno para la elaboración de las barras a medida, así como la barrenación para colocar el identador y los tornillos de nivelación de altura en las barras cold rolled. También se empeló un taladro de banco para diversas perforaciones tanto en el cuadro de soporte principal como en las piezas de aditamento. Las uniones permanentes fueron soldadas por el proceso SMAW y en las removibles se usaron tornillos, esto con el objetivo de obtener una máquina de doble propósito.
- La máquina se optimizo para funcionar con una carga de 250 Kg con una permanencia de 10 a 15 s utilizando un identador de 9 mm de diámetro, comprobando su exactitud al realizar una prueba con un material de dureza conocida y verificando resultados. Todo con forme a la norma *ASTM E10* [38] para la obtención de dureza Brinell (HB) en materiales metálicos.

2. Principio de funcionamiento:

- La máquina funciona en base a estática y suma de momentos. Un momento se expresa como una fuerza por distancia como se muestra en la ecuación 6:

$$M = F \cdot d$$

Ecuación 6. Momento.

Donde:

M = Momento [N.m]

F = Fuerza [N]

d = Distancia [m]

Por lo tanto, al realizar el diagrama de cuerpo libre se obtiene la siguiente figura 3.20 donde las cotas están expresadas en milímetros.

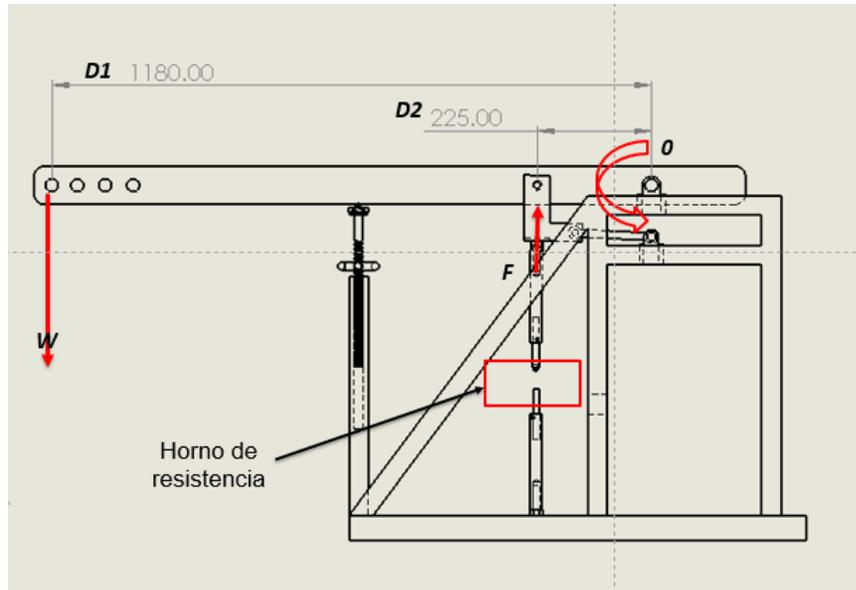


Figura 3. 20 Diagrama de cuerpo libre.

- La suma de momentos en el punto O se expresa en la ecuación 7:

$$\begin{aligned}\Sigma M_O &= 0 \\ (W \cdot D1) + (F \cdot D2) &= 0\end{aligned}$$

Ecuación 7. Sumatoria de momentos.

- Es necesario despejar W para conocer el peso que es necesario colocar para obtener una fuerza de 250 Kg en el indentador, resultando la ecuación 8:

$$W = -\frac{(F \cdot D2)}{D1}$$

Ecuación 8. Despeje de W.

- Sustituyendo:

$$W = - \frac{(250 \text{ Kg} \cdot 225 \text{ mm})}{1180 \text{ mm}} = 47.66 \text{ Kg}$$

Ecuación 9. Sustitución de valores en la ecuación 8.

- En la figura 3.21 se muestra los pesos utilizados en la máquina para obtener 48 Kg en total, incluyendo la masa de la reja y el centro de gravedad del brazo.

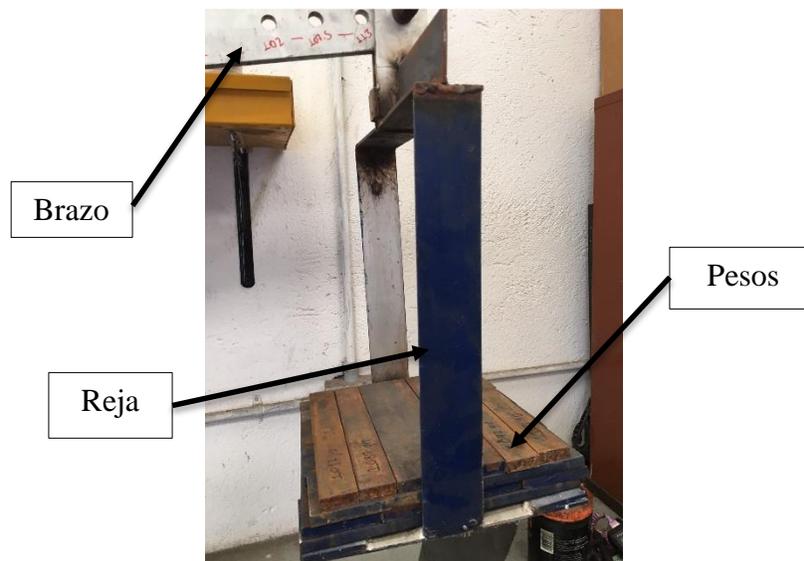


Figura 3. 21 Ilustración de los pesos usados para aplicar 250 Kg fuerza en el indentador.

3. Operación:

- Para la operación de esta máquina fue necesario construir probetas que cumplan con la norma *ASTM E10* [38] (anexo 6) y tengan una buena sujeción en la máquina al momento de aplicar la carga para asegurar la precisión de los resultados. En la figura 3.22 se muestra el diseño CAD así como la probeta terminada. El maquinado de la probeta se realizó en un torno, devastando la cara para la indentación con una lija de 120 para asegurar uniformidad en la superficie.

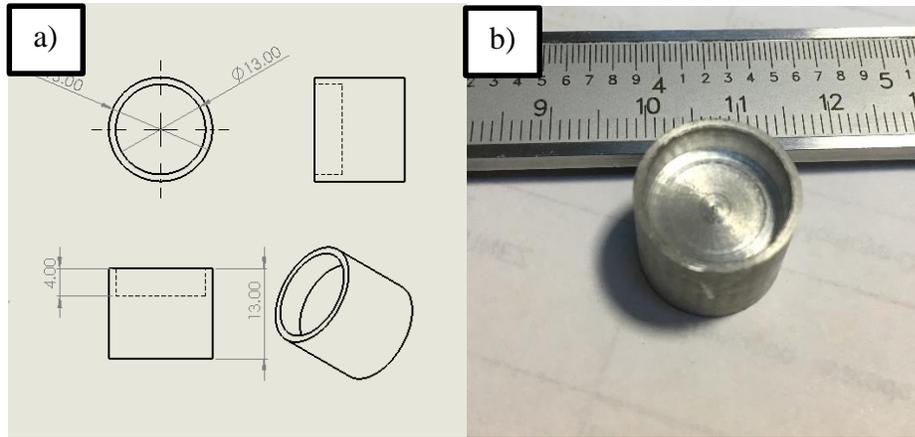


Figura 3. 22 a) Diseño de la probeta en CAD; b) Probeta de dureza.

- Para colocar las probetas en posición es necesario elevar el indentador girando la manivela en sentido anti-horario como se muestra en la figura 3.23.



Figura 3. 23 Elevación del indentador.

Esta probeta se coloca en el porta muestras de acero H13 con el hueco hacia abajo y posicionando en el centro de esta el termopar para la medición de la temperatura como se muestra en la figura 3.24.



Figura 3. 24 Colocación de las probetas de dureza.

- Se enciende el horno de resistencia y se establece la temperatura de prueba en el control de la unidad verificando con el termopar la lectura. Figura 3.25.



Figura 3. 25 Control y verificación de la temperatura en la máquina de dureza.

- Una vez alcanzada la temperatura de prueba, se mantiene por 30 minutos para asegurar una homogeneidad en el material.
- Para realizar la prueba se baja el indentador con ayuda de la manivela girando en sentido horario, una vez que el indentador toca la muestra se mide el tiempo de permanencia el cual para estas pruebas se estableció en 15 segundos para posteriormente levantar usando la manivela de nuevo. Para asegurar que la fuerza aplicada es la deseada, es necesario comprobar que el brazo se encuentra en posición horizontal a la hora de la indentación lo cual se comprueba con ayuda de un nivel colocado en el brazo como se muestra en la figura 3.26. De no estar en posición horizontal la prueba debe de ser rechazada y nivelar con ayuda de los tornillos de sujeción en las barras, tanto del indentador como del porta muestras.



Figura 3. 26 Nivel para el correcto posicionamiento del brazo.

Esta prueba es repetible de 2 a 3 veces dependiendo del tamaño de la huella. Figura 3.27.



Figura 3. 27 Probeta ensayada 3 veces.

- La medición del diámetro de la huella se realiza en el comparador óptico midiendo en dos ocasiones girando la muestra 90° para obtener un promedio de la indentación.
- Una vez obtenidas las mediciones, se aplica la ecuación 10 para la obtención de la dureza Brinell:

$$HB = \frac{2F}{\pi Db(Db - \sqrt{Db^2 - Di^2})}$$

Ecuación 10. Ecuación para el cálculo de dureza Brinell.

Donde:

HB = Dureza Brinell

F = Carga del indentador [Kg]

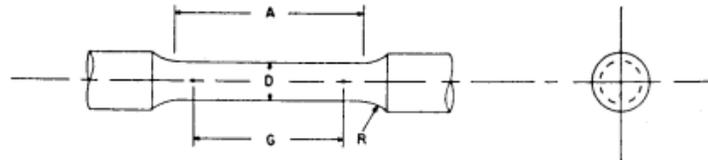
Db = Diámetro de la bola [mm]

Di = Diámetro de la indentación [mm]

Las condiciones de carga, el diámetro del indentador y el diámetro de la huella (indentación) son conocidas, por lo que es posible sustituir directamente para la obtención de los valores de dureza.

3.1.1.1 Propiedades mecánicas

En la segunda etapa se maquinaron las probetas cilíndricas utilizando el torno para obtener 6 probetas de tensión de acuerdo a la norma *ASTM E8* [39] bajo la clasificación *Small-size Specimen 3*. Figura 3.28 y 3.29.



Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gage Length Five times the Diameter [E8M]					
-------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--

Figura 3. 28 Dimensiones para las probetas cilíndricas de ensayos de tensión de acuerdo a la norma *ASTM E8* [39].

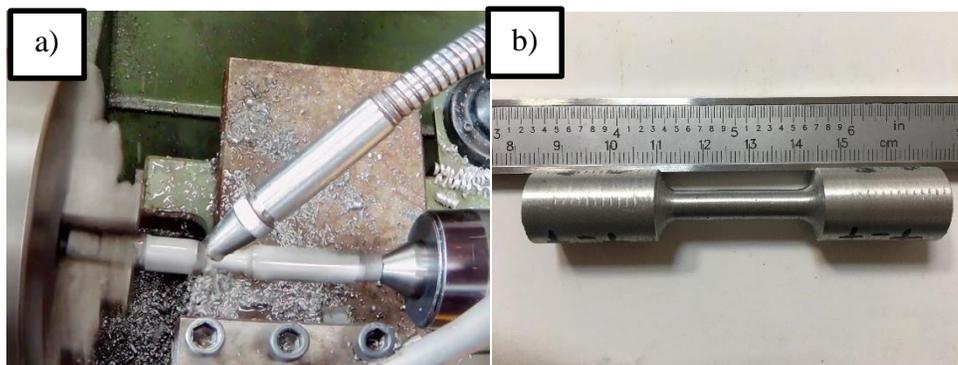


Figura 3. 29 a) Maquinado de la probeta en torno convencional; b) Probeta de tensión.

Los ensayos de tensión se realizaron en la maquina *Shimadzu* con una velocidad de 1 mm/min. Los resultados obtenidos se discuten en el capítulo 4.

Las pruebas de dureza se realizaron 3 veces por probeta a 6 temperaturas diferentes, temperatura ambiente y a 0.5-0.7 la temperatura homologa de fusión del aluminio en incrementos de 0.05, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Temperaturas de pruebas para dureza.

Prueba	Temperatura homologa de fusión del aluminio	Temperatura °C
1	0.32	25 (ambiente)
2	0.5	194
3	0.55	240
4	0.6	286
5	0.65	333
6	0.7	380

Los resultados se discuten en el capítulo 4.

3.1.1.2 Metalografías

Para la obtención de micrografías se optó por tomar una probeta de dureza y seccionarla a la mitad de una indentación como se muestra en la figura 3.30.

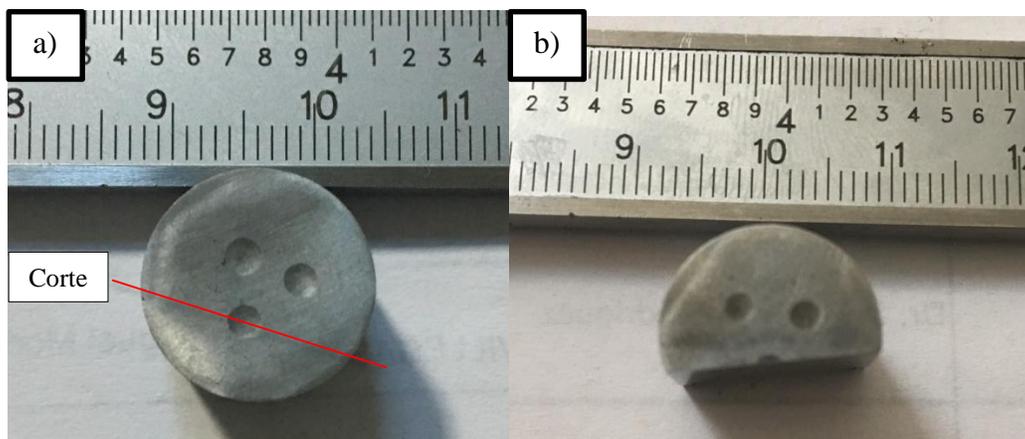


Figura 3. 30 a) Corte de la probeta de dureza; b) Probeta seccionada.

Posteriormente se prosiguió con un procedimiento estándar de metalografía utilizando lijas de 100, 120, 240, 400, 600, 1000, 1500, 3000 para terminar con un pulido con aerosol de diamante, obteniendo una superficie tipo espejo. Figura 3.31.



Figura 3. 31 Muestra pulida con acabado espejo para el microscopio.

3.1.2 Soldadura por fricción

3.1.2.1 Fundición

En la primera etapa de fundición de las placas para la soldadura por fricción se siguió la misma metodología descrita en la sección 3.3.1.1, cambiando las concentraciones de litio y el molde de vaciado.

El cálculo para las adiciones de litio se presenta en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 11, cálculo para la adición de 5% magnesio:

$$\text{Gramos de Mg} = \frac{(5\% - 0.25\%)(472 \text{ g})}{95\%} = 23.6 \text{ g}$$

Ecuación 11. Calculo de la adición de 5% magnesio, fundición 3.

Ecuación 12 y 13, cálculo para la adición de 1% litio y 5% magnesio:

$$\text{Gramos de Al5Li} = \frac{(1\%)(440 \text{ g})}{6.16\%} = 71.42 \text{ g}$$

Ecuación 12. Cálculo para la adición de 1% litio, fundición 4.

$$\text{Gramos de Mg} = \frac{(5\% - 0.25\%)(440 \text{ g} + 71.42 \text{ g})}{95\%} = 25.57 \text{ g}$$

Ecuación 13. Cálculo para la adición de 5% magnesio, fundición 4.

De igual manera, la fundición se realizó en dos ocasiones, siendo la primera fundición con una adición solamente de 5% magnesio y la segunda con un 5% magnesio y 1% litio. El procedimiento de fundición es el mismo descrito en la sección 3.3.1.1.

Para el vaciado se utilizaron moldes permanentes contruidos a partir de placas de acero con tres cavidades para cada placa, montados por medio del empalme de placas separadas entre sí por una sección del mismo material y atornilladas de los extremos. Además se utilizaron cuatro placas en ángulo para fabricar un embudo con el objetivo de canalizar el metal fundido hacia las cavidades del molde. Este molde permanente fue precalentado a 500 °C utilizando otro horno de resistencia con el objetivo de evitar un choque térmico y garantizar la fluidez del metal a través de las cavidades para las placas al momento de vaciar en el molde. Estos procesos se muestran en la figura 3.32.



Figura 3. 32 a) Construcción del molde a partir de placas de acero; b) Molde permanente con el embudo colocado, nótese que el material ya ha sido vaciado; c) Placas obtenidas a partir del molde.

Al abrir el molde de acero se seleccionaron las dos mejores placas y se identificaron como se muestra en la figura 3.33 Además fueron rectificadas en la fresadora CNC usando un face-mill cutter (fresa para careado) para asegurar que todas las placas quedaran con un

espesor de 3 mm como se muestra en la figura 3.34. La placa sobrante se utilizó para realizar ensayos de espectrometría por chispa y conocer su composición química.

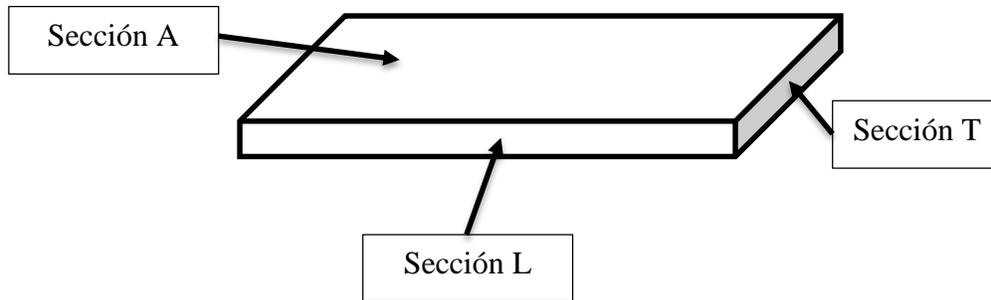


Figura 3. 33 Identificación de las secciones en las placas obtenidas.



Figura 3. 34 Rectificado de las placas.

Una vez rectificadas, cada placa se secciono a la mitad para así obtener 4 placas por fundición, resultando así un total de 2 uniones soldadas por fundición.

3.1.2.2 Proceso de soldadura por fricción FSW

Para el proceso de soldadura por fricción se utilizó un pin de acero AISI 1045 el cual se maquinó con una geometría cónica en un extremo y una cuadrada en el otro como se muestra en la figura 3.35 (anexo 7). Para mejor compresión en esta tesis se mencionan como *CO* y *CU* respectivamente. Posteriormente este pin fue tratado térmicamente calentándolo a 950 °C por 20 minutos y enfriando rápidamente en agua para aumentar la

dureza del mismo. En la tabla 3.2 se especifican en detalle las dimensiones de la geometría del pin.

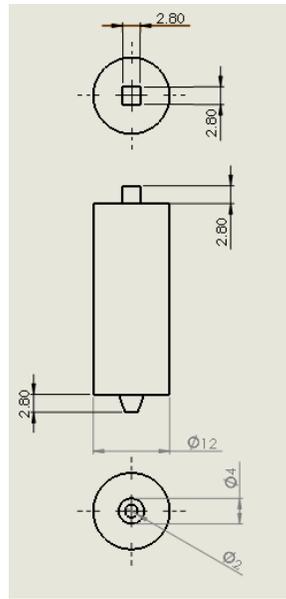


Figura 3. 35 Diseño del pin.

Para proceder a soldar se montó una placa de acero en la mesa de la fresadora a la cual se le realizó una perforación en el centro con el objetivo de colocar un termopar para la medición de la temperatura durante el proceso de soldadura. Además se comprobó el paralelismo de la placa utilizando un comparador de carátula anclado al usillo y realizando un movimiento en dirección a la soldadura (Eje X) para garantizar de esta manera una inmersión constante del pin dentro de las placas. Figura 3.36.

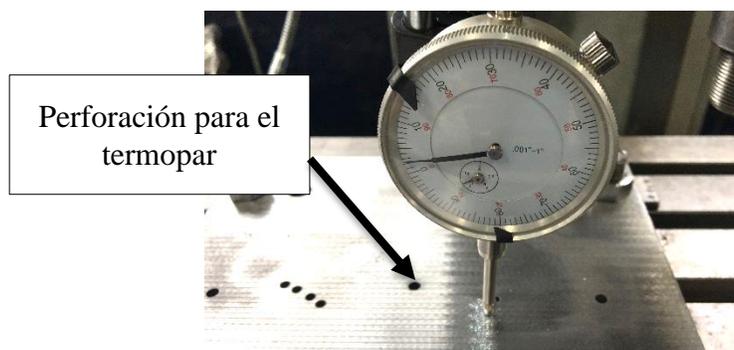
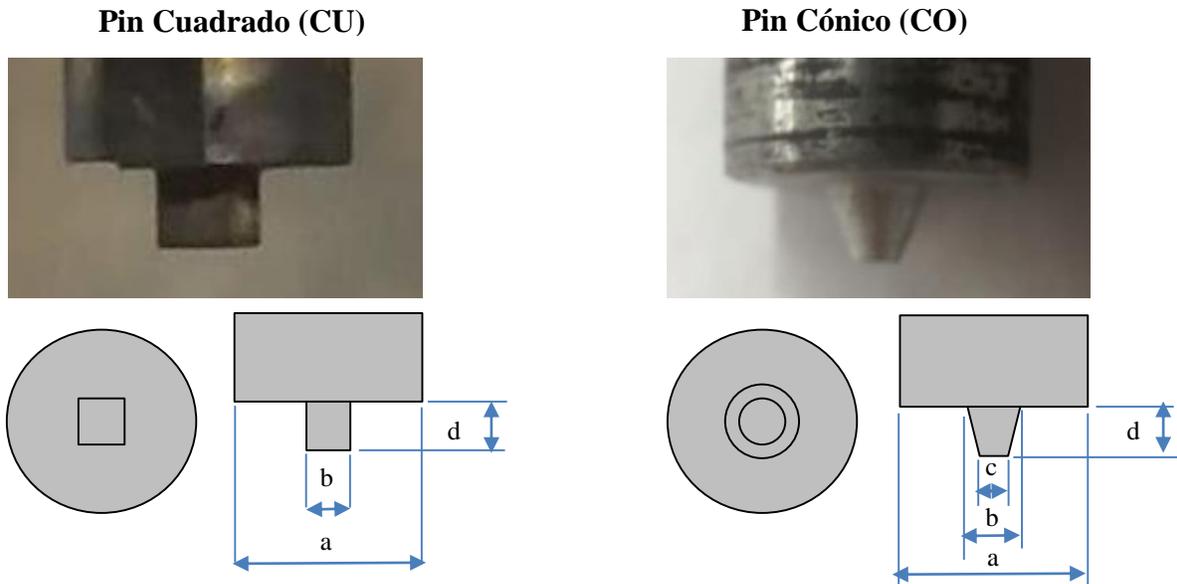


Figura 3. 36 Comprobación de paralelismo de la placa por medio de un comparador de carátula.

Tabla 3. 2 Geometría y dimensiones del pin.

Sección Transversal	a Diámetro Hombro (mm)	b Diámetro mayor de pin (mm)	c Diámetro menor de pin (mm)	d Profundidad de pin (mm)
Cuadrado (CU)	12	2.8	N/A	2.8
Cónico (CO)	12	4	2	2.8



Una vez que se maquinó el pin y se comprobó el correcto funcionamiento de los aditamentos a la fresadora se seleccionaron los parámetros primarios de soldadura, los cuales se describen en la tabla 3.3 (anexo 8).

La soldadura se realizó a tope uniendo las secciones longitudinales (sección L) de las placas realizando una pequeña perforación entre las placas para la colocación del termopar para la obtención del perfil de temperatura con respecto al tiempo alcanzado durante el proceso, para lo cual se utilizó una tarjeta de adquisición de datos Omega. Las placas fueron fijadas a la placa de acero mediante mordazas para evitar su desplazamiento durante la soldadura. En la figura 3.37 se muestra una unión desde la vista inferior y la posición del termopar en esta. El código CNC de la soldadura se describe en la sección de anexos (anexo 9).

Tabla 3. 3 Parámetros primarios del proceso de soldadura y su designación.

Condición	Frecuencia rotacional [RPM]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de inmersión [mm/min]	Designación
1				A380 CO
2				A380 CU
3				A380 5Mg CO
4	1840	12	4	A380 5Mg CU
5				A380 5Mg 1Li CO
6				A380 5Mg 1 Li CU

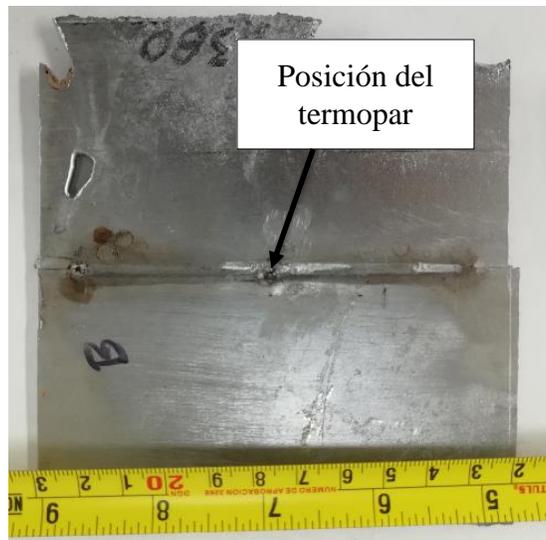


Figura 3. 37 Vista inferior de la unión soldada.

De igual manera en la figura 3.38 se observa una unión desde la vista superior, el paso del pin y el sistema de sujeción en la misma.

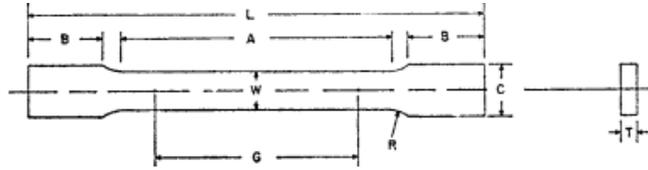


Figura 3. 38 Vista superior de la unión soldada.

3.1.2.3 Propiedades mecánicas

Se obtuvieron probetas de tensión de las uniones soldadas de acuerdo a la norma *ASTM E8* [39] para placas bajo la clasificación *Subsize Specimen* como se ilustra en la figura 3.39 de tal manera que el cordón de soldadura quedara perpendicular en la zona calibrada de la probeta. Esta se cortó utilizando la fresadora CNC (código anexo 10) con una herramienta de $\frac{1}{8}$ " para así obtener 3 probetas de tensión y una para metalografía y microdureza por unión. Figura 3.40.

Las probetas de tensión obtenidas fueron pulidas con lija de 120 para obtener una probeta de espesor consistente para posteriormente realizar ensayos de tensión en la máquina universal *shimadzu*. Figura 3.41.



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Figura 3. 39 Dimensiones para las probetas planas de acuerdo a la norma ASTM E8 [39].

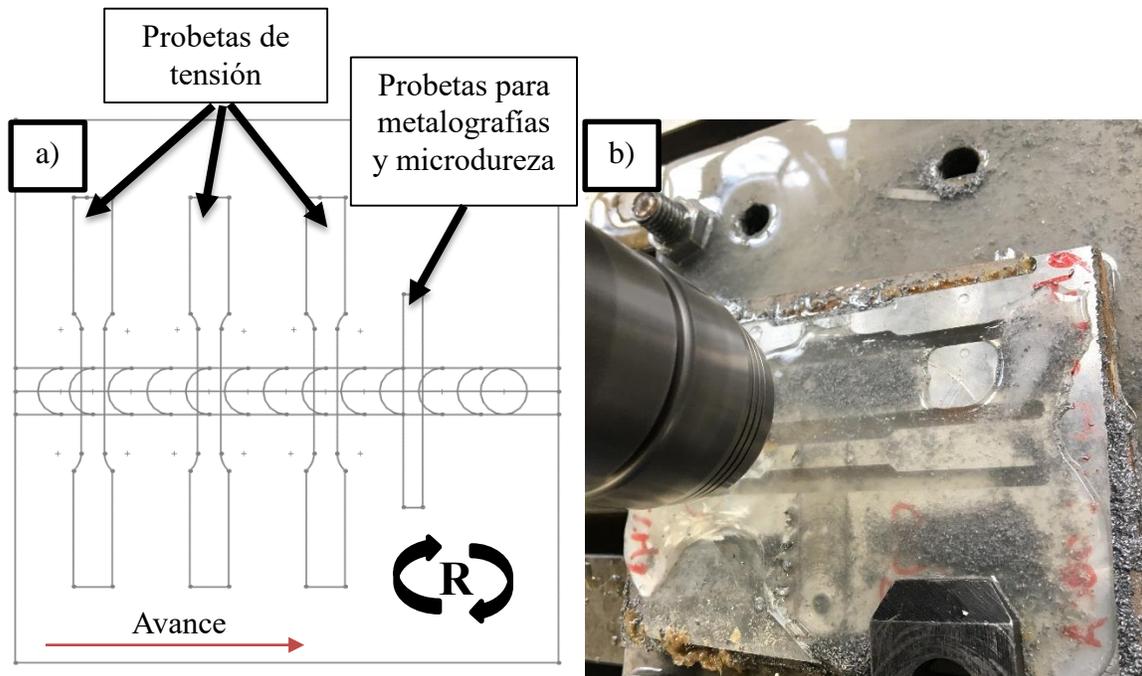


Figura 3. 40 a) Dibujo esquemático de corte para la obtención de probetas de la unión soldada; b) Corte de probetas de tensión por medio de la fresadora CNC.

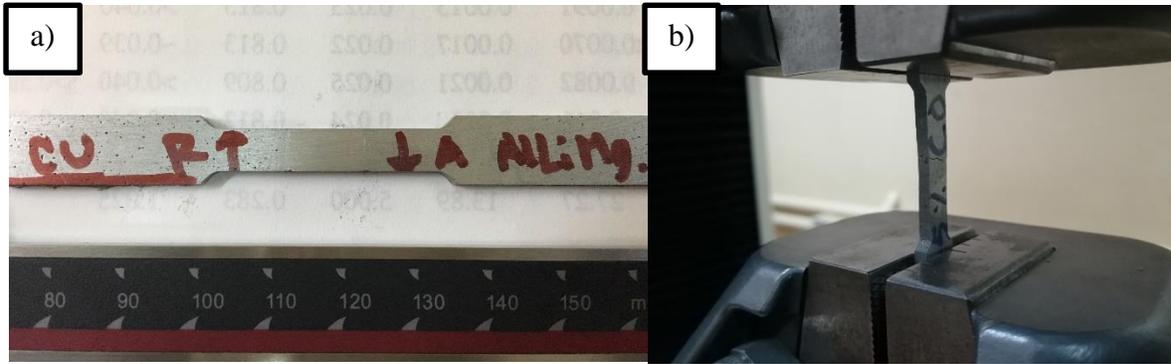


Figura 3. 41 a) Probeta pulida; b) Ensayo de tensión.

Se utilizó polvo termoplástico transparente para el encapsulado de la probeta para microdureza, colocándola de manera que la sección trasversal (Sección T) de la unión quedara expuesta como se muestra en la figura 3.42. Seguido de un procedimiento estándar de pulido metalográfico descrito en la sección 3.3.1.3.



Figura 3. 42 Muestras encapsuladas y pulidas de la sección trasversal de la unión soldada.

Las pruebas de microdureza se realizaron utilizando un equipo *shimadzu* con un microidentador piramidal utilizando 10 N de carga con un tiempo de permanencia de 10 segundos y una separación entre indentación de 400 μm realizando un barrido de la muestra desde el metal base pasado por el centro de la unión soldada para de nuevo llegar al metal base obteniendo así un total de 40 indentaciones como se ilustra en la línea amarilla en la figura 3.43. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

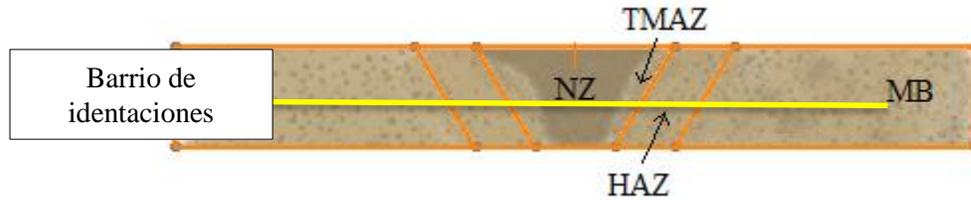


Figura 3. 43 Representación de barrido de indentaciones en la probeta encapsulada.

3.1.2.4 Metalografías

Para la microscopía óptica se utilizaron las probetas previamente encapsuladas de dureza realizando un barrido para generar una única imagen completa de la muestra encapsulada y de esta manera observar los cambios estructurales. Las imágenes se presentan en el siguiente capítulo.

Se fabricó un porta muestras para la realización de microscopía electrónica a partir de una barra de aluminio A6061 utilizando un torno convencional y la fresadora CNC además de un machuelo para la colocación de un opresor, este con la intención de sostener las muestras en su lugar como se observa en la figura 3.44. Las muestras colocadas corresponden desde el centro del cordón hasta el metal base. Una vez aseguradas las muestras se prosiguió con un pulido estándar de metalografía previamente descrito hasta obtener un acabado espejo.

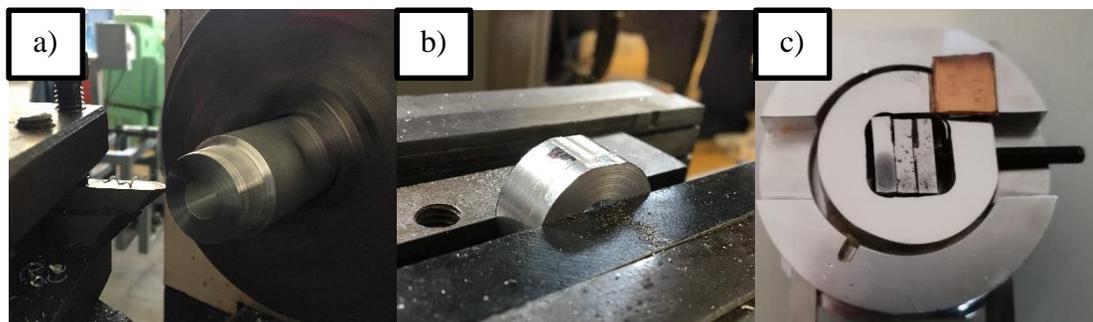


Figura 3. 44 Porta muestras. a) Maquinado en torno; b) Maquinado en fresadora; c) Colocación en el microscopio.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Composición química

Se obtuvo la composición química de los 4 grupos de aleaciones por espectrometría de chispa, incluyendo una prueba de la aleación A380. Los resultados se presentan en la tabla 4.1. Las pruebas a la aleación A380 comprueban que los elementos de aleación como silicio, magnesio, cobre y hierro se encuentran dentro del rango especificado como se describió en la sección 2.8 para esta aleación.

Tabla 4. 1 Composición química de las fundiciones utilizadas.

Aleación	Designación	Composición química [% wt]							
		Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Ti	Li	Al
Base	A380	9.6	4.1	0.84	0.25	1.46	0.01	0	Bal.
1	A380 2.5Mg 0.25Li	9.1	3.7	0.89	2.3	1.34	0.09	0.25*	Bal.
2	A380 5Mg 0.25Li	8.51	2.9	0.88	5.1	1.45	0.03	0.25*	Bal.
3	A380 5Mg	8.9	3.2	0.92	4.9	1.2	0.09	0	Bal.
4	A380 5 Mg 1Li	8.6	2.9	0.88	4.8	1.2	0.08	1*	Bal.

Los resultados demuestran el aumento en las concentraciones de magnesio a una aproximación aceptable a la deseada en las aleaciones, lo que confirma que la ecuación 1 es adecuada. La composición de litio en peso reportada es nominal, ya que ni la espectrometría por chispa ni EDS detectan este elemento debido a su bajo peso atómico, por lo que sería necesario realizar un SIMS (secondary ion mass spectrometry) para su detección y cuantificación [39,40].

4.2 Densidad

La medición de densidad se realizó en cada grupo de aleación de manera experimental, los resultados se muestran en la figura 4.1 donde se confirma que la adición de magnesio es inversamente proporcional a la densidad de la aleación ya que la densidad del magnesio es de 1.74 g/cm³ a comparación del aluminio con 2.7 g/cm³.

Además la adición de 1% litio provoca una reducción en un 3% de la aleación como se ha demostrado en diversos estudios [1–7].

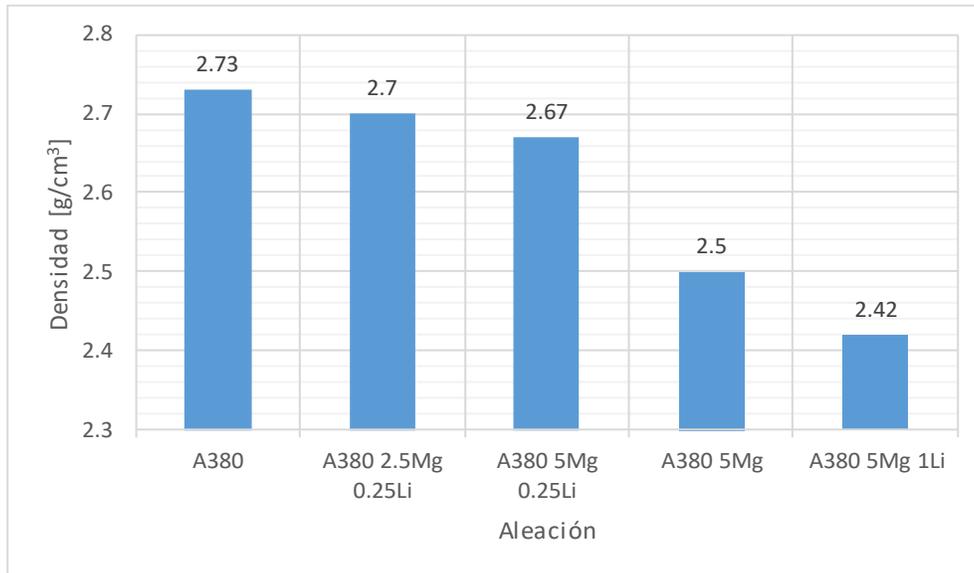


Figura 4. 1 Densidad respecto al porcentaje de elementos de aleación.

En la figura 4.1 es evidente la disminución de densidad con las adiciones de magnesio y/o litio, llegando a existir una reducción de hasta 11.35% la densidad de la aleación base A380, sin embargo es relevante señalar que la densidad se tomó de manera experimental en muestras las cuales contenían un alto porcentaje de porosidad siendo aún más presentes en las aleaciones para las placas para las soldaduras lo cual aporta valores más bajos en la densidad.

4.3 Tensión y dureza, Aleaciones A380 2.5%Mg 0.25%Li y A380 5%Mg 0.25%Li

4.3.1 Metalografías

4.3.1.1 Micrografías

En la figura 4.2 se ilustra la microestructura obtenida por microscopía electrónica por electrones retrodispersados de la aleación que contiene un 2.5% magnesio y 0.25% litio tomadas a diferentes magnificaciones. Es posible observar la porosidad en el material marcado por flechas azules en la figura 4.2 b.

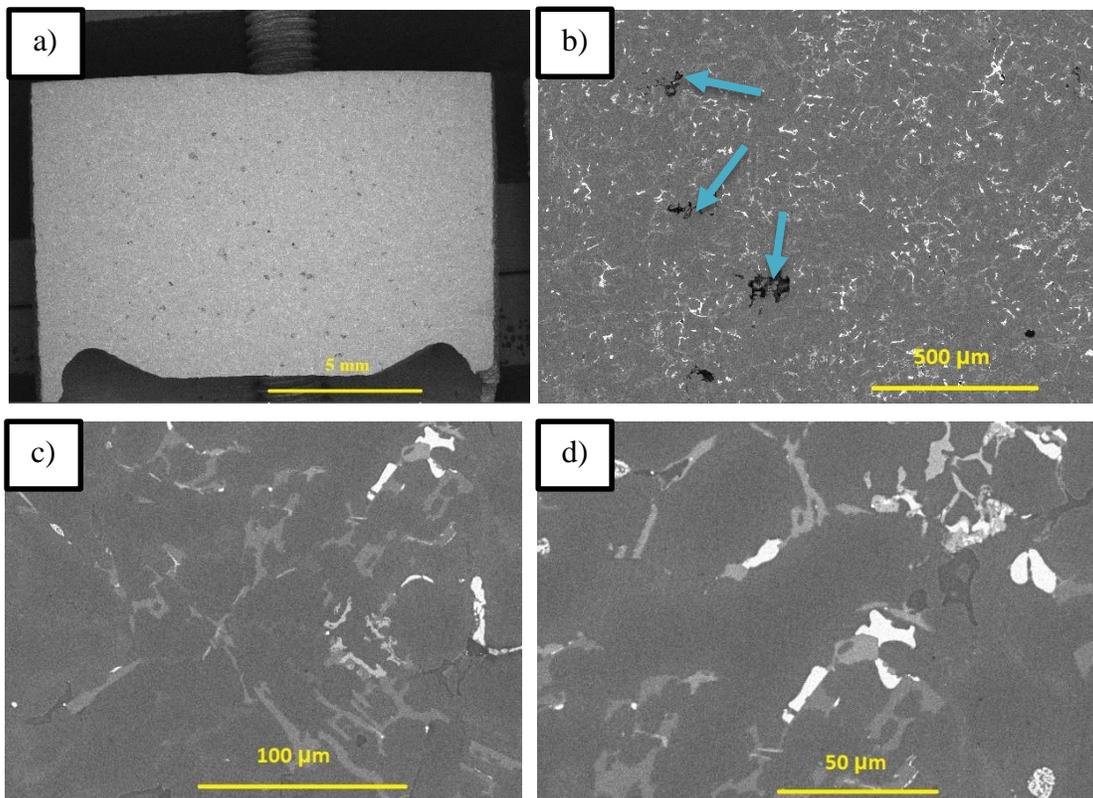


Figura 4. 2 Micrografías electrónicas, aleación A380 2.5Mg 0.25Li a varias magnificaciones. a) 6X; b) 100X; c) 650X; d) 1000X.

La figura 4.3 muestra el mapeo EDS en la aleación utilizando una magnificación de 1300X donde es posible observar la presencia silicio, magnesio, cobre y hierro dentro de una matriz de aluminio.

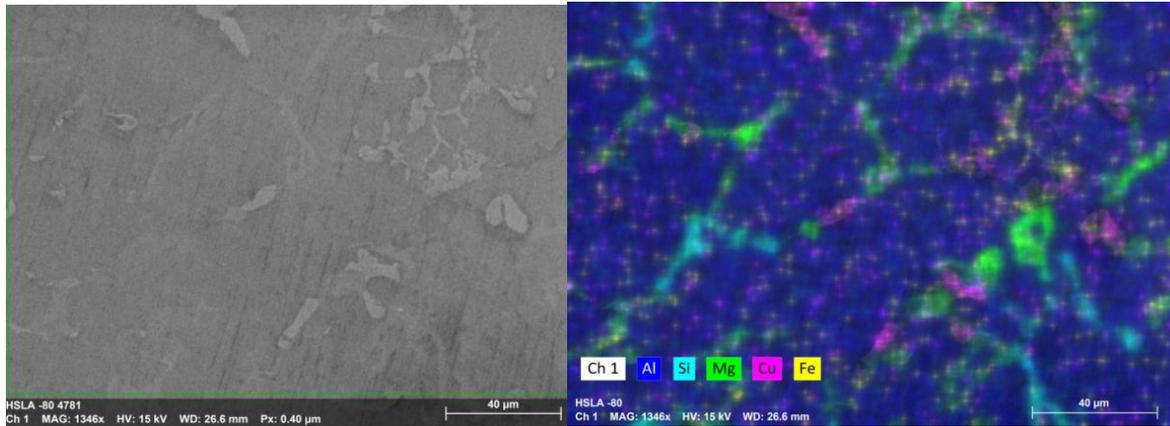


Figura 4. 3 EDS de la aleación A380 2.5Mg 0.25Li.

Se obtuvo un análisis puntual en las fases presentes para determinar su estequiometría química como se indica en la figura 4.4, los resultados se presentan en la tabla 4.2.

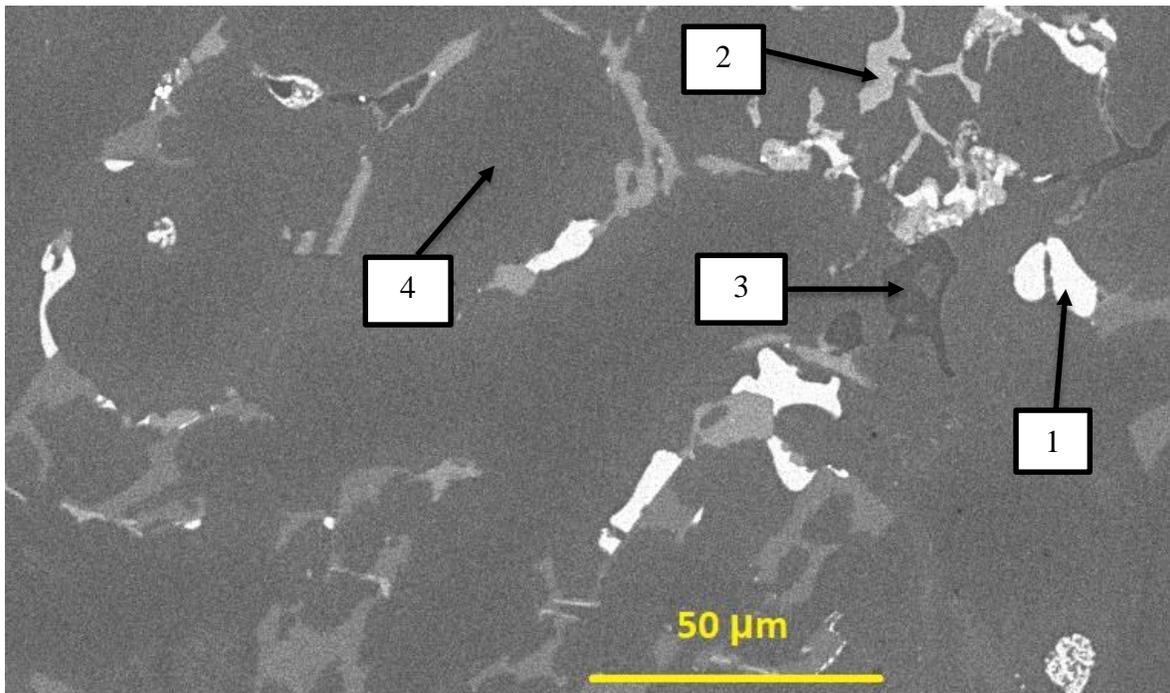


Figura 4. 4 Análisis puntual por EDS de las fases presentes en la aleación A380 2.5Mg 0.25Li.

Tabla 4. 2 Resultados de EDS puntual aleación A380 2.5Mg 0.25Li.

Análisis	Elementos (% atom)				
	Aluminio	Magnesio	Silicio	Cobre	Hierro
1	58.98	3.07	2.61	17.73	-
2	67.03	-	7.55	0.98	8.17
3	52.68	2.74	25.94	0.63	-
4	98.23	0.65	0.55	0.58	-

De los resultados anteriores, se observa que el análisis 1 corresponde a una fase de aluminio y cobre la cual está representada por las porciones más blancas en la micrografía y que posee una morfología tipo bloque la cual podría corresponder a la fase θ (Al_2Cu). El análisis 2 muestra la presencia de hierro, además de aluminio y silicio con un color más oscuro que el anterior y de acuerdo a la estequiometría podría tratarse de la fase β -Fe (Al_5FeSi). Por otro lado el análisis 3 presenta un intermetálico de aluminio y silicio el cual se ve representado por las porciones más oscuras en la micrografía. Por último el análisis 4 representa la matriz de aluminio.

La figura 4.5 muestra la microscopia electrónica por electrones retrodispersados de la aleación con un contenido de 5% magnesio y 0.25% litio. Las flechas azules indican la porosidad presente en el material.

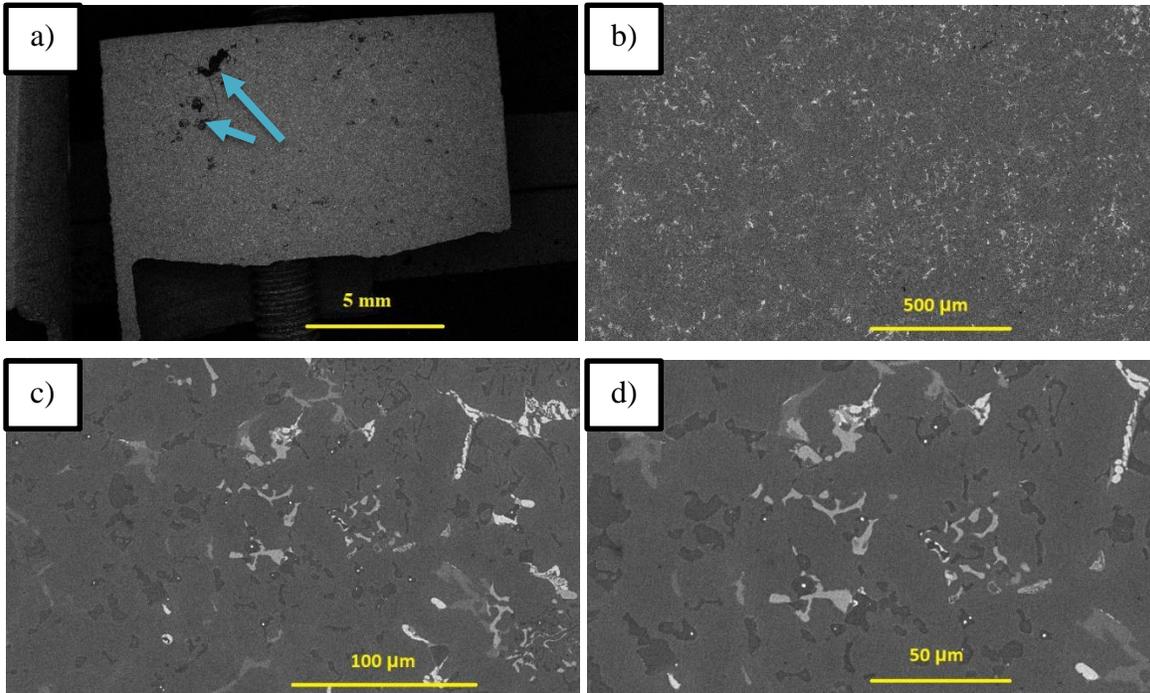


Figura 4. 5 Micrografías electrónicas, aleación A380 5Mg 0.25Li a varias magnificaciones. a) 6X; b) 100X; c) 650X; d) 1000X.

En la figura 4.6 se presenta el mapeo EDS de la aleación con una magnificación de 1300X.

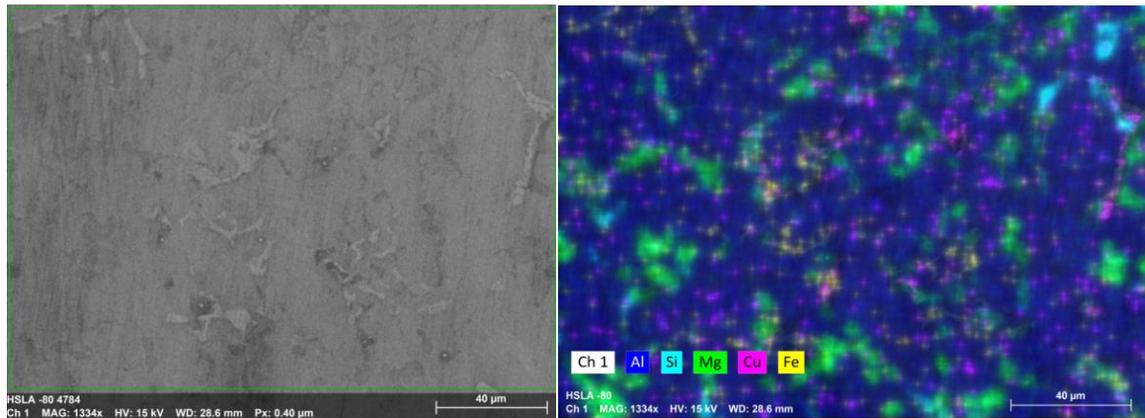


Figura 4. 6 EDS de la aleación A380 5Mg 0.25Li.

El análisis puntual por EDS se presenta en la figura 4.7 y los resultados en la tabla 4.3.

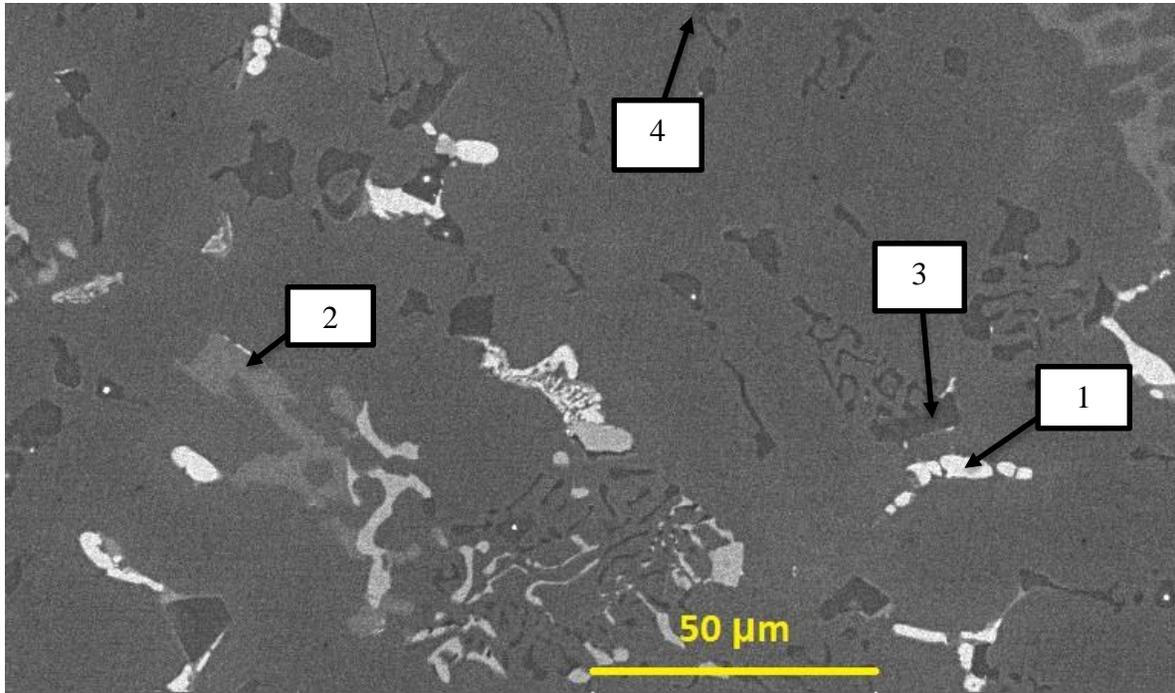


Figura 4. 7 Análisis puntual por EDS de las fases presentes en la aleación A380 5Mg 0.25Li.

Tabla 4. 3 Resultados de EDS puntual aleación A380 5Mg 0.25Li.

Análisis	Elementos (% atom)				
	Aluminio	Magnesio	Silicio	Cobre	Hierro
1	69.06	-	4.85	26.09	-
2	62.61	11.24	22.07	1.22	2.86
3	8.81	57.78	33.41	-	-
4	35.38	32.88	31.74	-	-

En el análisis 1 es posible observar la presencia de la fase θ como en el análisis anterior de la aleación A380 2.5Mg 0.25Li, el análisis 2 corresponde a una estequiometría similar a la fase π -Fe ($\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$), mientras el análisis 3 se trata de la fase β (Mg_2Si). Por último el análisis 4 presenta un intermetálico de aluminio, magnesio y silicio en proporciones similares.

4.3.2 Propiedades mecánicas

4.3.2.1 Ensayos de tensión

En la figura 4.8 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas de la aleación base A380 tanto como de las aleaciones de 2.5% magnesio 0.25% litio y 5% magnesio 0.25% litio respectivamente, vaciados en moldes de grafito y probados en la condición “as cast” de un promedio de 3 pruebas de cada aleación. Es evidente la tendencia negativa del UTS y deformación respecto a la cantidad de adición de magnesio en donde la cantidad de magnesio es inversamente proporcional al UTS resultando en una reducción de 11.95 MPa (6.2%) con la adición de 2.5% Mg y 15.83 MPa (8.21%) con adición de 5% Mg respecto a la aleación base A380. No obstante es necesario tomar en cuenta la presencia de poros los cuales pudieron actuar como concentradores de esfuerzos e iniciar la grieta que llevaría a la fractura ya que ambos elementos de adición son susceptibles a la generación de poros al actuar con el oxígeno presente en la atmosfera durante la fundición [2,41].

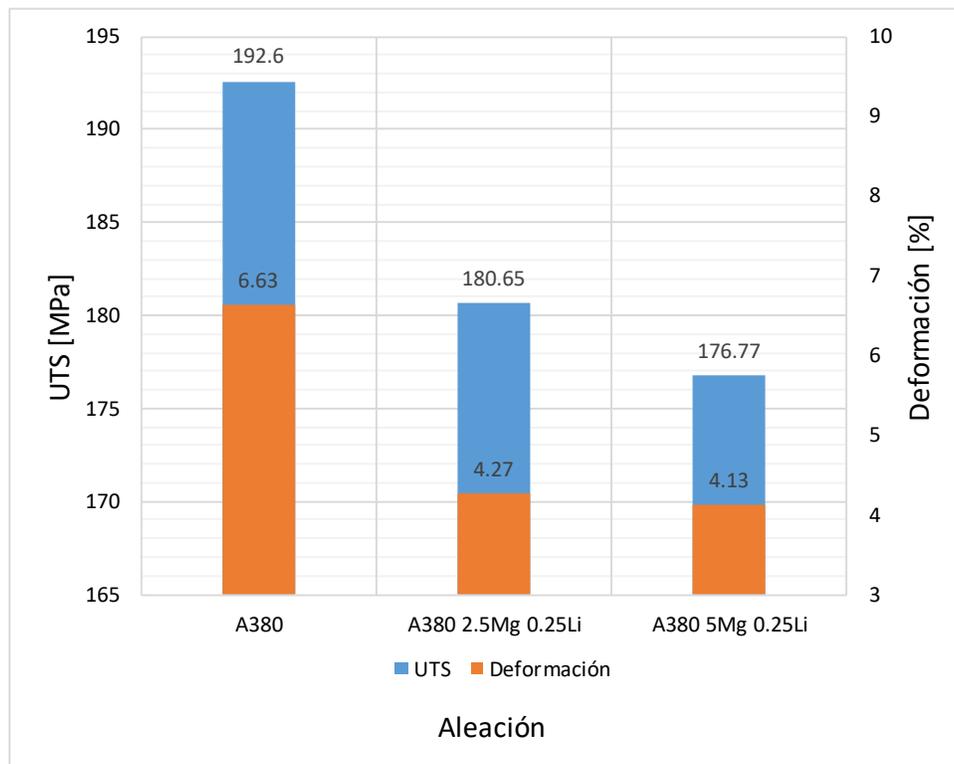


Figura 4. 8 UTS y deformación de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.

4.3.2.2 Ensayos de dureza

Los resultados de las pruebas de dureza están expresados en la tabla 4.4 los cuales de igual manera se encuentran graficados en la figura 4.9.

Tabla 4. 4 Dureza a temperatura de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.

Temperatura °C	Dureza, Brinell [HB]		
	A380	A380 2.5Mg 0.25Li	A380 5Mg 0.25Li
23	84	75	65
193	76	71	65
240	70	72	64
286	61	64	68
333	59	66	63
380	53	62	47

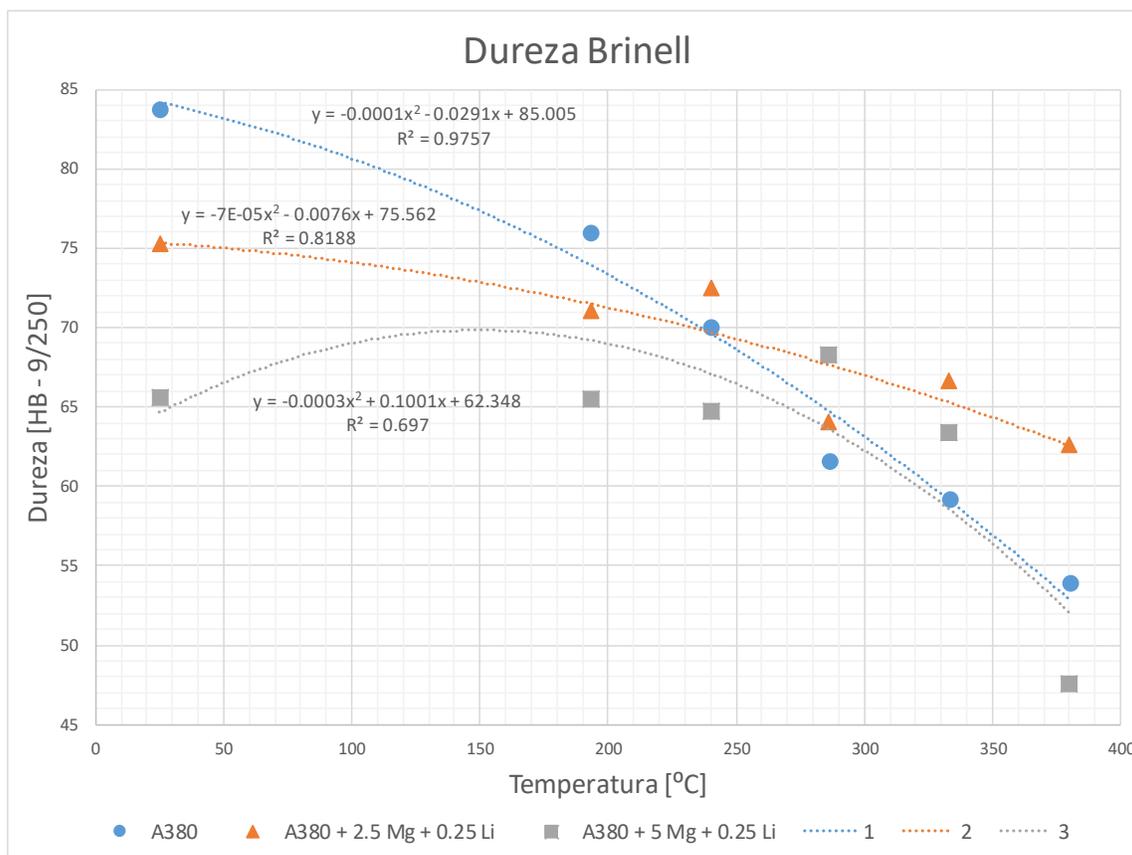


Figura 4. 9 Variación de la dureza con la temperatura de las aleaciones A380, A380 2.5Mg 0.25Li y A380 5Mg 0.25Li.

Se puede observar que la dureza de la aleación base A380 sin la adición de elementos es de 84 HB y disminuye al agregar los elementos de adición magnesio y litio a temperatura ambiente. Siendo así, los resultados demuestran que la dureza disminuye proporcionalmente a la cantidad de adición de magnesio-litio en la aleación. Esto puede ser atribuido al cambio de morfología y la presencia de nuevas fases con contenido de litio. La dureza de los materiales corresponde a la dureza y distribución de las fases existentes en la estructura del material por lo que la presencia de compuestos de magnesio-litio resultan más suaves que los formados por silicio o cobre, lo que resulta en una disminución de la dureza. Sin embargo, al elevar la temperatura de prueba se observa una disminución gradual de la aleación A380 resultado incluso menor que la aleación A380 2.5%Mg 0.25%Li.

4.4 Soldadura por fricción, Aleaciones A380 5%Mg y A380 5%Mg 1%Li

4.4.1 Metalografías

4.4.1.1 Macrografías

En la figura 4.10 se presentan las uniones soldadas utilizando el pin cuadrado desde una vista superior donde es posible observar la apariencia superficial de las uniones, así como la entrada, salida y el material desplazado por el hombro de la herramienta durante el avance del mismo a lo largo de la soldadura.



Figura 4. 10 Vista superior de las uniones soldadas por pin cuadrado. a) A380; b) A380 5Mg; c) A380 5Mg 1Li.

En la figura 4.11 se presenta una macrografía compuesta por la unión de varias micrografías tomadas con el microscopio óptico a 50X de la sección transversal de las uniones soldadas, donde de manera general se distinguen las zonas representativas de la soldadura por fricción.

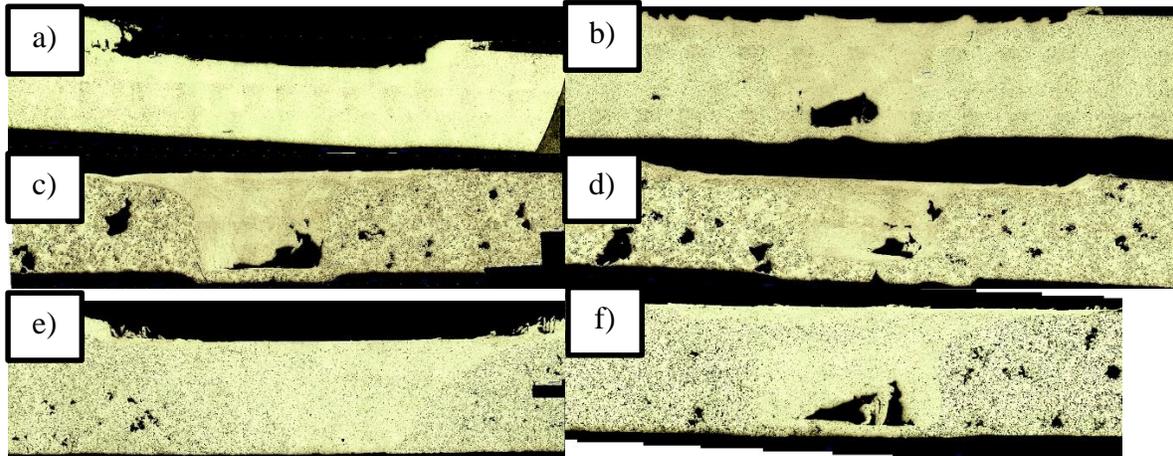


Figura 4. 11 Macrografías de la sección transversal de la unión soldada. a) A380 CU; b) A380 CO; c) A380 5Mg CU; d) A380 5Mg CO; e) A380 5Mg 1Li CU; f) A380 5Mg 1Li CO.

De lo anterior se aprecia como la adición de magnesio a la aleación base eleva el contenido de porosidad en el metal base figura 4.11c y 4.11d, y como de igual manera esta porosidad se ve significativamente reducida con la adición de litio figura 4.11e y 4.11f. De acuerdo al diagrama de Ellingham como se ilustra en la figura 4.12 lo anterior puede ser atribuido a la mayor oxidación del magnesio antes que la del litio y aluminio. Al mismo tiempo se observa la recrystalización, la homogenización y la reducción de poros en la zona de agitación. Además se observa un faltante de material (poro túnel característico de este proceso) en la zona de agitación de la soldadura como se ilustra en las figuras 4.11b, 4.11c, y 4.11f, lo cual puede ser atribuido a los parámetros operativos primarios de la soldadura y la geometría del pin.

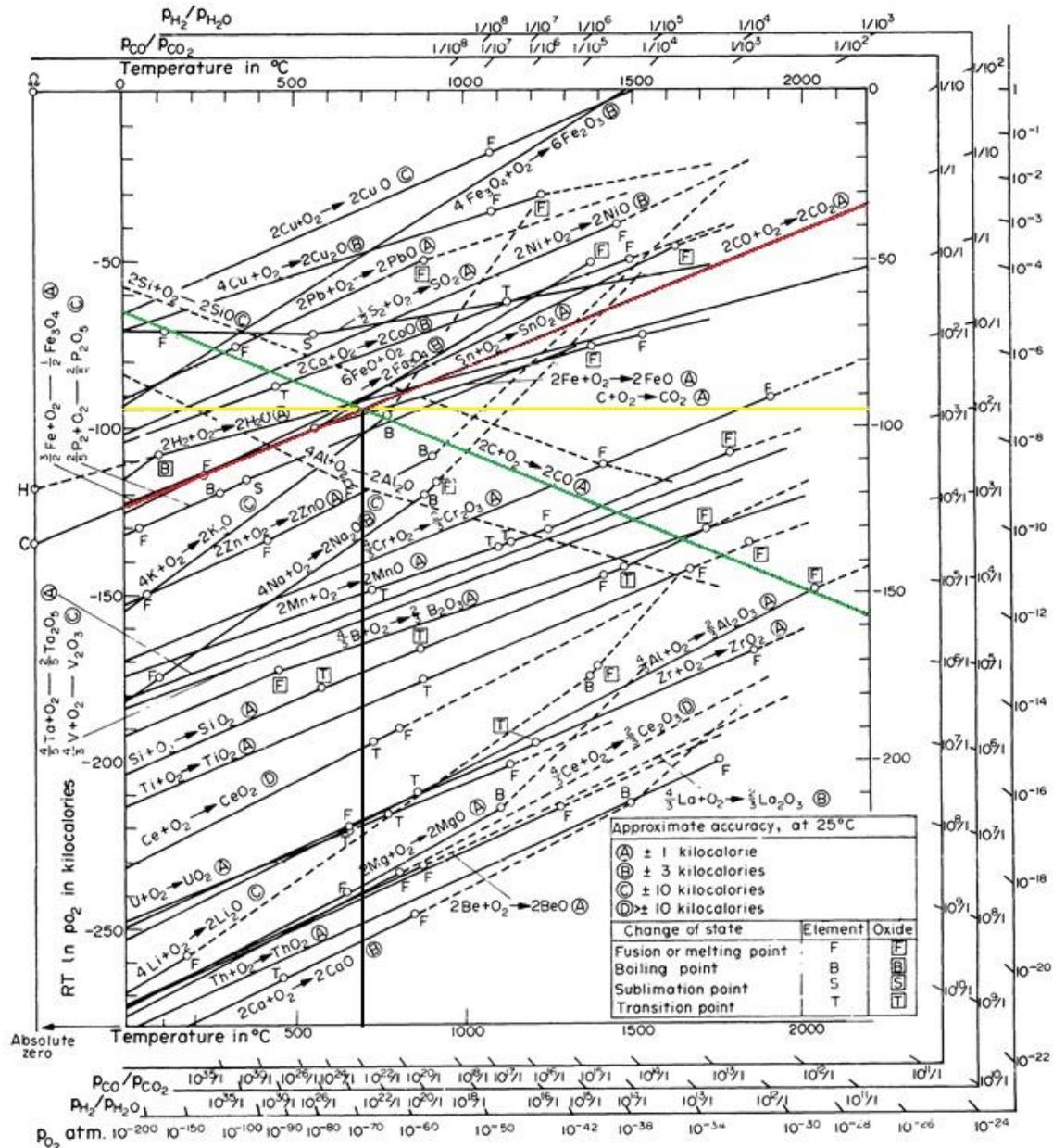


Figura 4. 12 Diagrama de Ellingham para óxidos.

4.4.1.2 Micrografías

En la figura 4.13 se presentan las micrografías ópticas del metal base de las aleaciones.

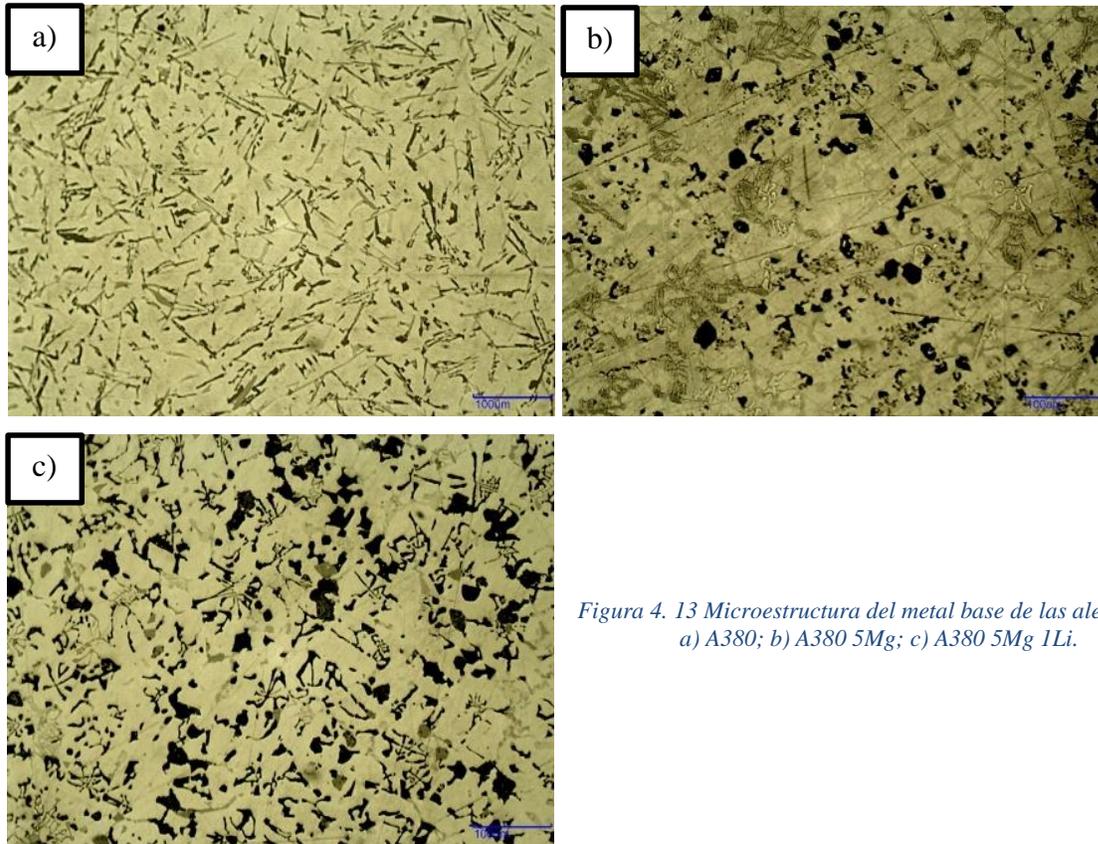


Figura 4. 13 Microestructura del metal base de las aleaciones.
a) A380; b) A380 5Mg; c) A380 5Mg 1Li.

La figura 4.13a representa la microestructura característica de la aleación A380 como se describió en la sección 2.8.2. La adición de magnesio al 5% modifica esta microestructura apareciendo nuevas fases y morfologías como las fases θ , β -Fe, β , π -Fe e intermetálicos de aluminio silicio.

En la figura 4.14 se presentan las micrografías de la unión soldada para las distintas aleaciones. Se puede observar la existencia de una recristalización en la zona de agitación, y como pasa a ser una zona homogénea de granos equiaxiados.

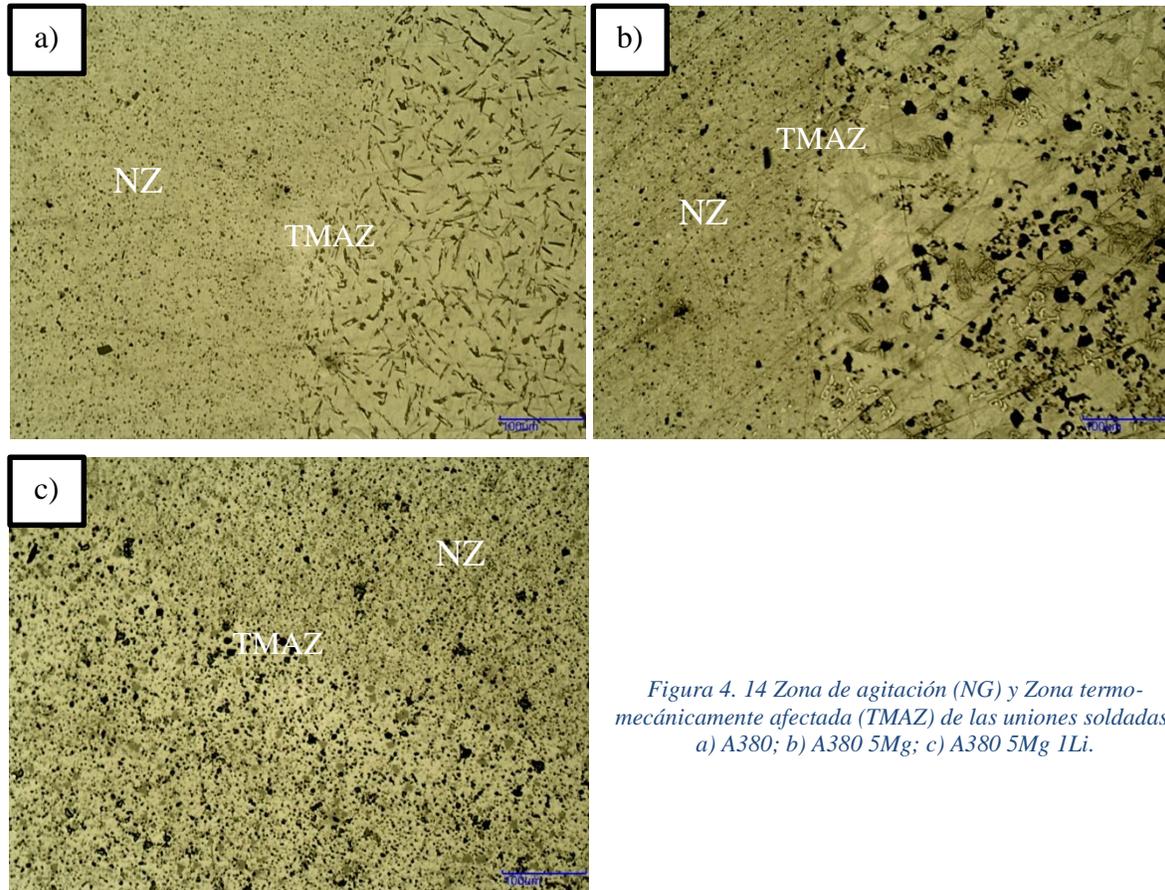


Figura 4. 14 Zona de agitación (NG) y Zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) de las uniones soldadas. a) A380; b) A380 5Mg; c) A380 5Mg 1Li.

La microscopía electrónica de la unión A380 se presenta en la figura 4.15 donde de manera más clara se observan las agujas de silicio eutéctico y como estas se fracturan en pequeñas partículas en la zona de agitación. En la figura 4.15c se ilustra una de aguja de silicio eutéctico y a su lado la fase θ (Al_2Cu).

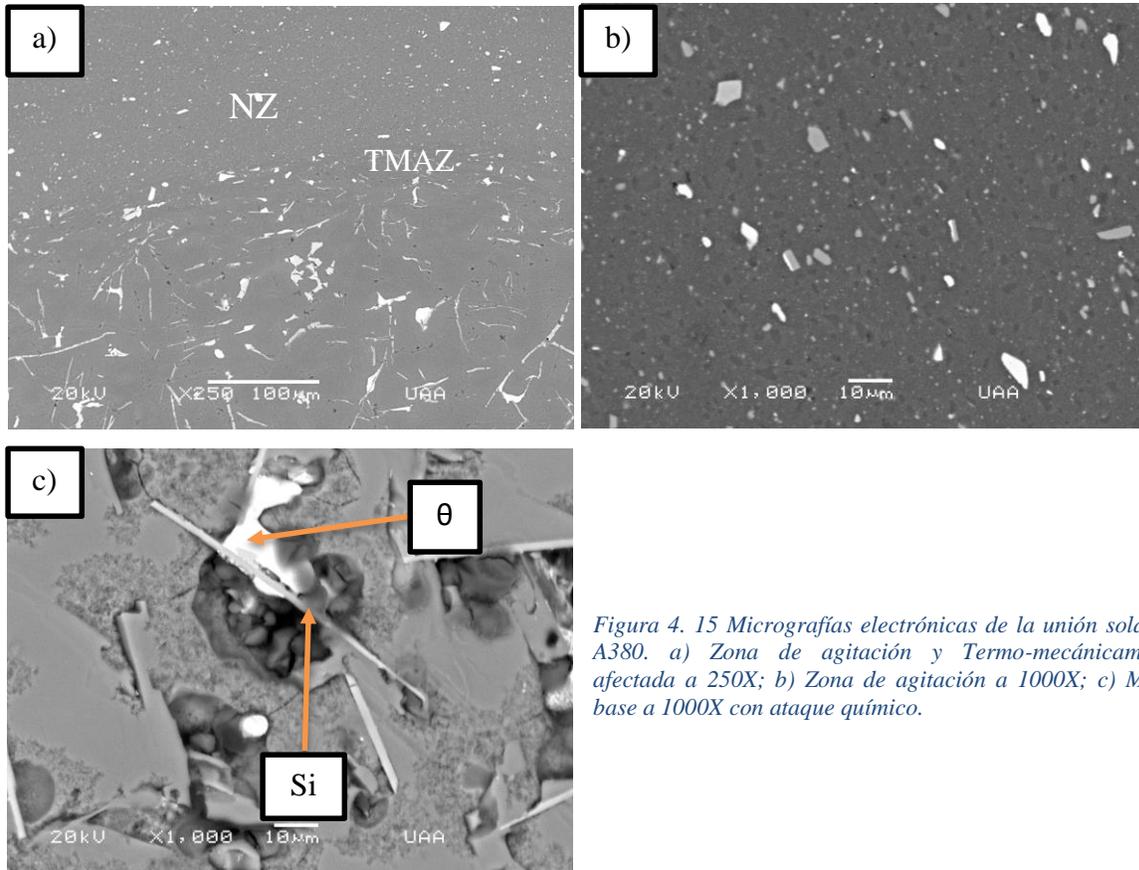


Figura 4. 15 Micrografías electrónicas de la unión soldada A380. a) Zona de agitación y Termo-mecánicamente afectada a 250X; b) Zona de agitación a 1000X; c) Metal base a 1000X con ataque químico.

Las microscopías de las uniones soldadas de las aleaciones con contenidos de 5% magnesio y 5% magnesio 1% litio se presentan en la figura 4.16.

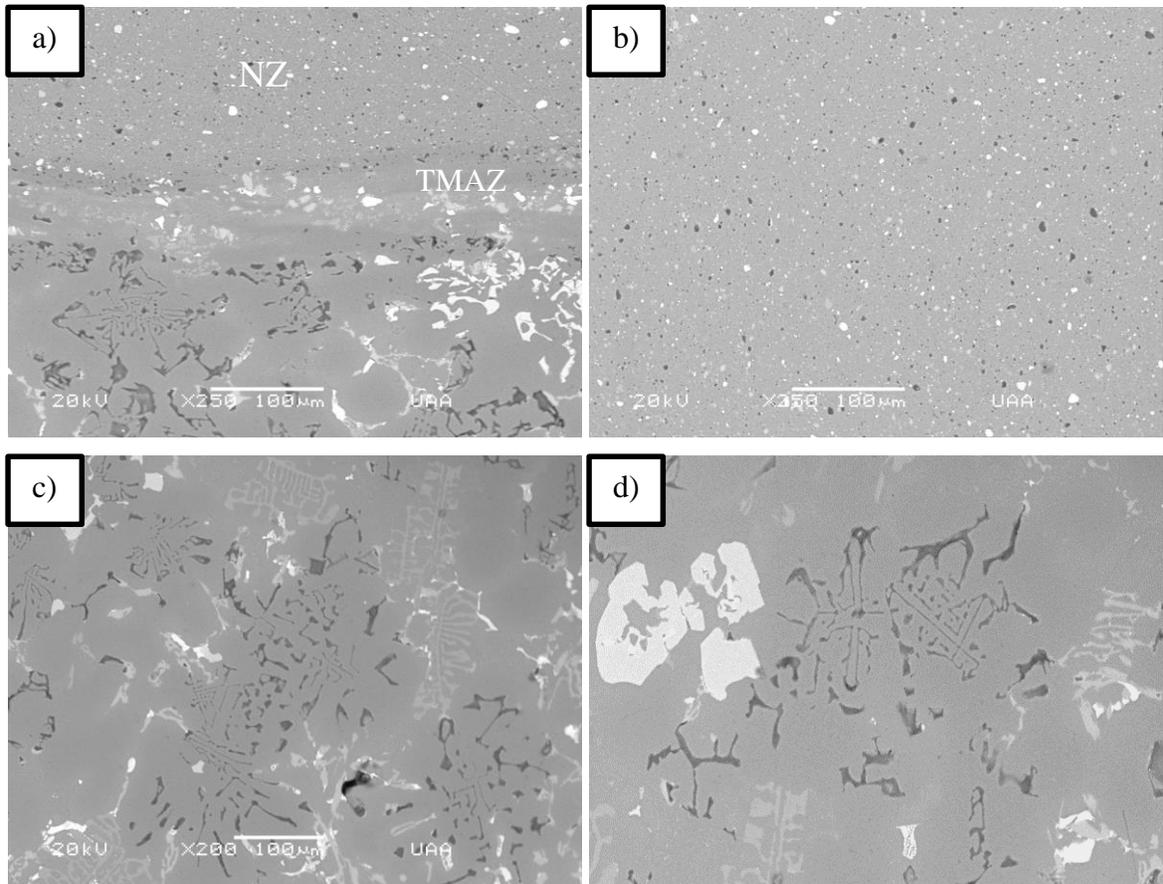


Figura 4. 16 Micrografías electrónicas de las aleaciones. a) Zona de agitación y termo-mecánicamente afectada la unión de soldadura aleación A380 5Mg a 250X; b) Zona de agitación aleación A380 5Mg 1Li a 350X; c) Metal base aleación A380 5Mg a 200X; d) Metal base aleación A380 5Mg.

4.4.2 Temperatura durante el proceso FSW

En las figuras 4.17 y 4.18 se presenta los perfiles de temperatura de las uniones soldadas obtenidas con cada geometría de pin. La máxima temperatura registrada durante las soldaduras ocurre en la aleación A380 5%Mg 1%Li utilizando el pin de geometría cónica registrando una temperatura de 381 °C. En cuanto a la geometría de pin cuadrado su máximo se establece en la misma aleación registrando un máximo de 287 °C. De lo anterior y con base en los diagramas de fases presentados en la sección 2.5 a 2.7 se confirma que no existió fusión dentro de la zona de agitación.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede remarcar que el pin cónico alcanza temperaturas mayores en comparación a las del pin cuadrado, en donde la aleación se adhiere a este, además de que la aleación A380 5%Mg 1%Li presenta la mayor temperatura seguida por la aleación A380 y por último la aleación A380 5%Mg para ambas geometrías de pin.

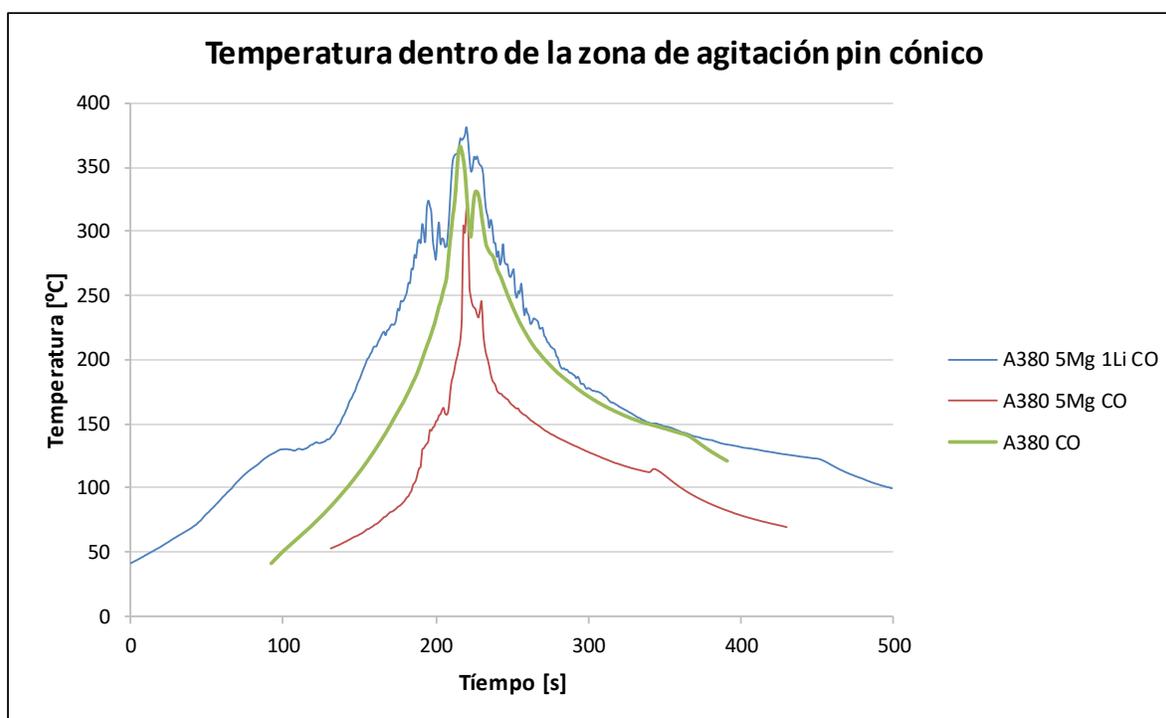


Figura 4. 17 Temperatura dentro de la zona de agitación pin cónico.

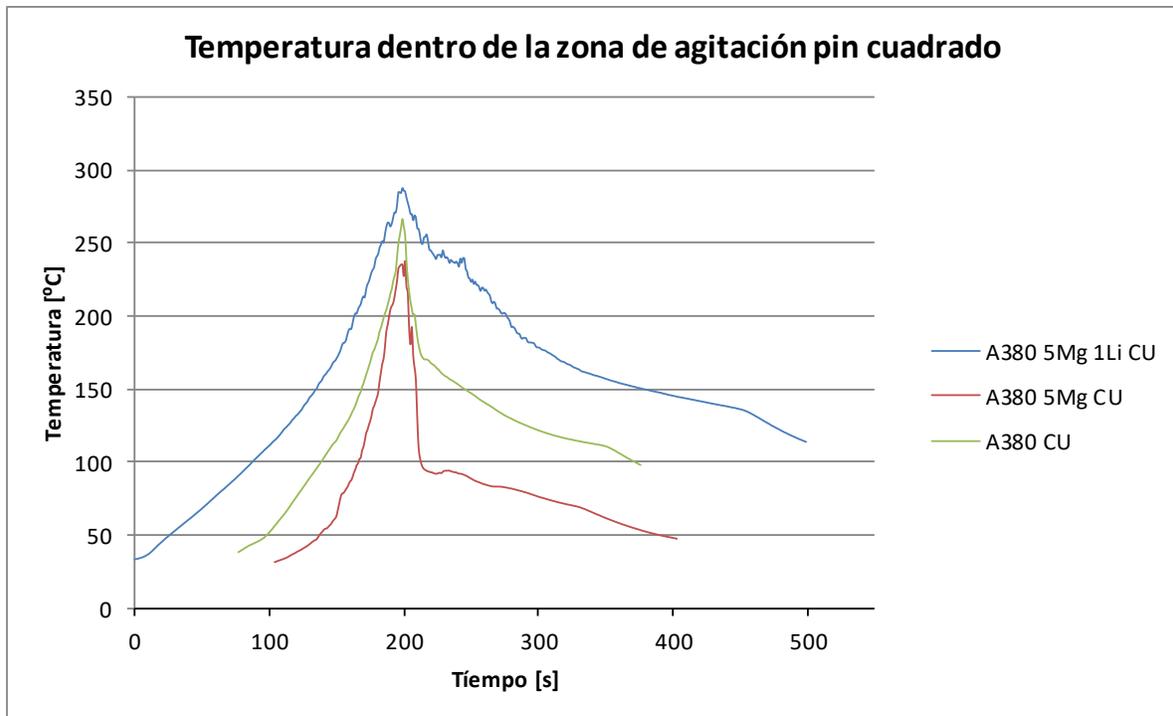


Figura 4. 18 Temperatura dentro de la zona de agitación pin cuadrado.

4.4.3 Propiedades mecánicas

4.4.3.1 Ensayos de tensión

Durante las pruebas de tensión se observó que la fractura aparecía generalmente en dos posiciones, dentro de la zona de agitación (NZ) como se muestra en la figura 4.19a y en el metal base como se observa en la figura 4.19b. Este comportamiento indica que las muestras en las que la fractura ocurrió en el metal base, la unión de soldadura FSW presenta mejores propiedades mecánicas, el cual puede ser atribuido a la homogenización de partículas de silicio en la matriz por la acción de la agitación del pin [21], además de que la porosidad se ve disminuida por la misma, provocando así el aumento de resistencia dentro de la unión.

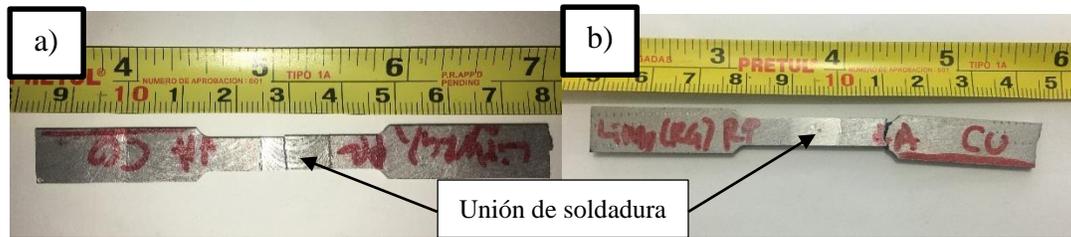


Figura 4. 19 Zona de fractura de las probetas. a) Dentro de la zona de agitación; b) Metal base.

En las figuras 4.20 y 4.21 se presentan el UTS y la deformación obtenidas de las uniones soldadas. En estas se aprecia como la adición de 5% magnesio disminuye las propiedades mecánicas pero al agregar 1% de litio a la misma aleación las propiedades se recuperan pero sin sobrepasar las de la aleación base A380, esto debido a la reducción de porosidad presentada en comparación a las que solo contenían adición de magnesio como se ilustra en las macrografías (sección 4.4.1). Además se observa que la geometría del pin tiene un impacto en las propiedades mecánicas obteniendo así que el pin cuadrado es el de mejores resultados para la aleación base y para la fundición 4 con contenido de litio.

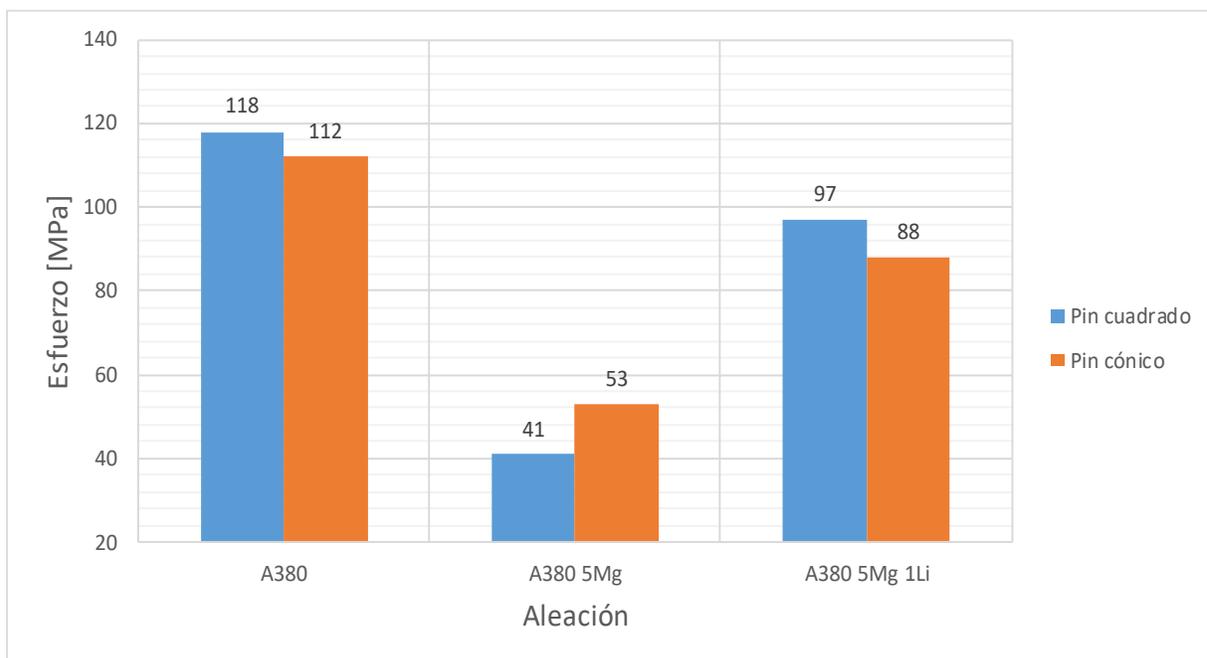


Figura 4. 20 Último esfuerzo de las uniones soldadas.

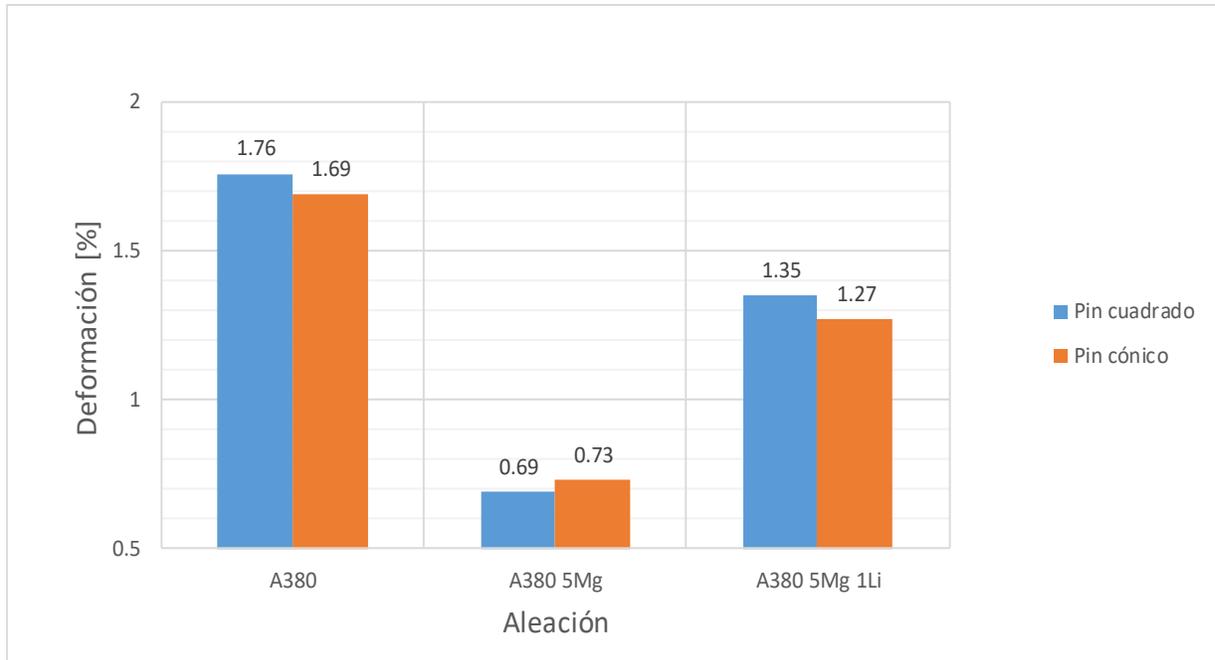


Figura 4. 21 Deformación de las uniones soldadas.

4.4.3.2 Ensayos de microdureza

En las figuras 4.22 y 4.23 se presentan los resultados de microdureza de las seis uniones soldadas separados de acuerdo a la geometría del pin. Es posible observar una inconsistencia a lo largo del metal base, esto es atribuido a la dispersión de porosidad dentro del material, sin embargo es visible una homogenización dentro de la zona de agitación y la zona afectada termo-mecánicamente, debido a la recristianización y la reducción de porosidad producida por la agitación del pin dentro del material.

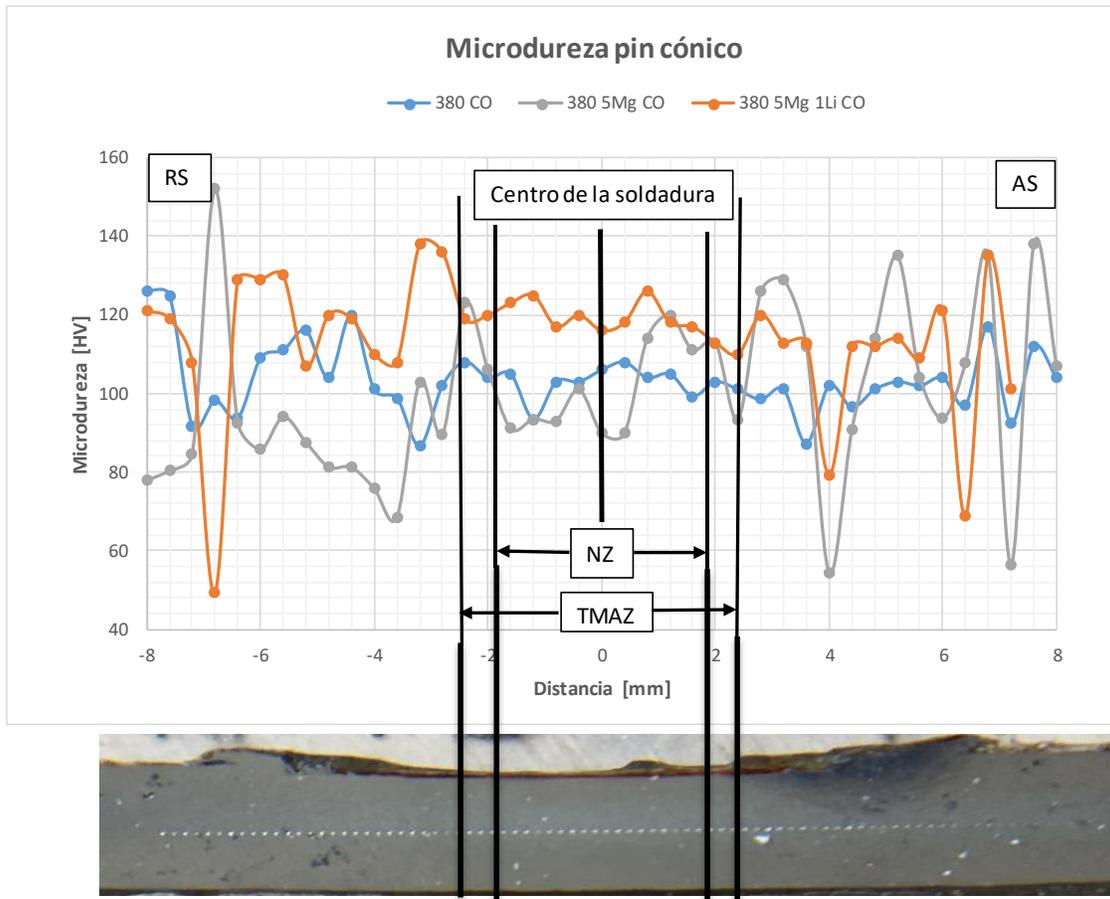


Figura 4. 22 Perfil de microdureza pin cónico.

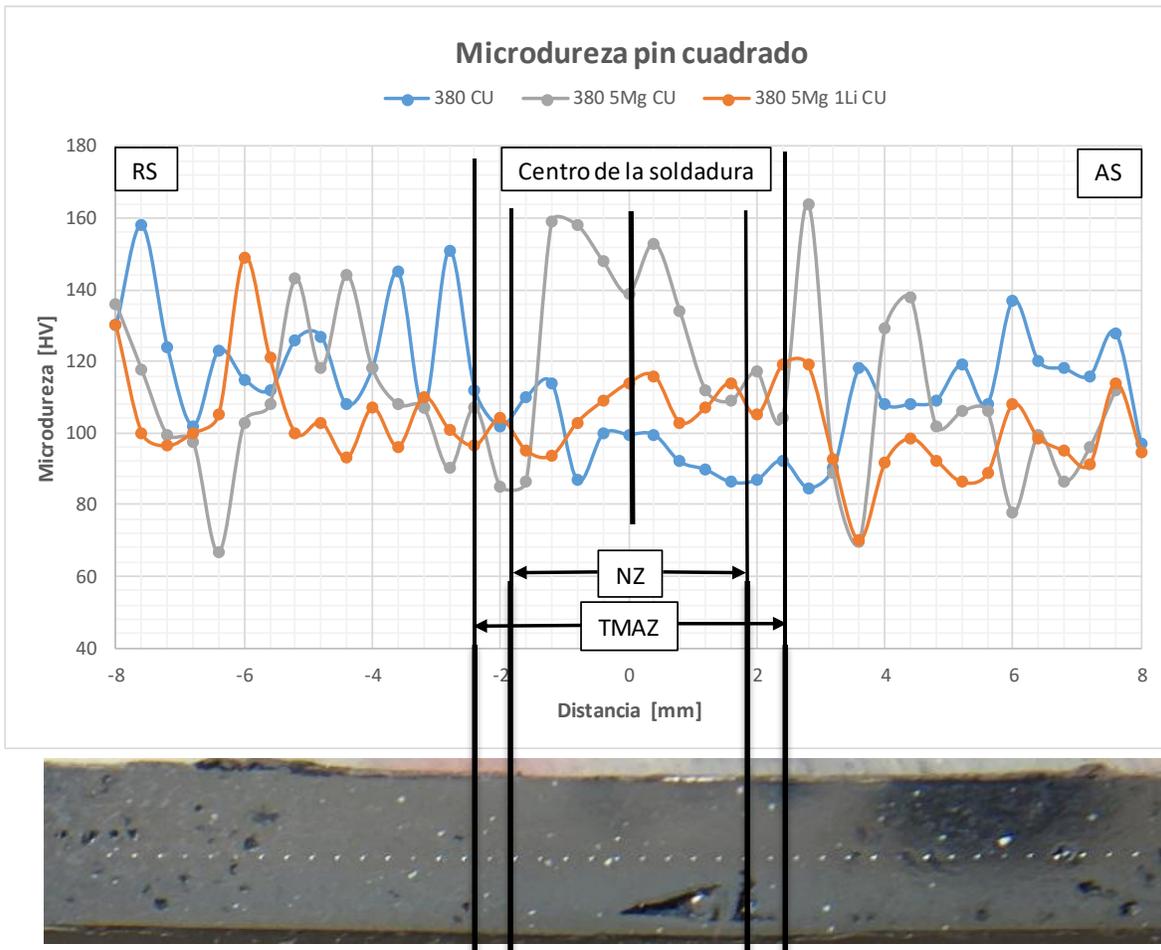


Figura 4. 23 Perfil de microdureza pin cuadrado.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

- La adición de magnesio y litio reduce las propiedades mecánicas generales de la aleación hasta en un 8.21% en la resistencia y un 37.7% en su deformación máxima; mas sin embargo la densidad de la aleación se ve reducida y existe una mejora en la maquinabilidad.
- Existe la presencia de nuevas fases entre las que destacan β y θ por ser susceptibles a tratamientos térmicos como el T6, por lo que es posible incrementar las propiedades mecánicas de las aleaciones. Sin embargo es posible que existan también fases con contenido de litio las cuales pudieran ser propensas a obtener fases como δ (Al_2Li) o T_1 (Al_2CuLi), después de aplicar un tratamiento térmico de envejecido las cuales se caracterizan por ser las fases que incrementan la resistencia en el material.
- Es posible obtener una buena unión por medio del proceso de soldadura por fricción (FSW), en la presente investigación se demostró que no existe fusión de materiales durante la soldadura por lo que es un método favorable para elementos tan reactivos como el magnesio y litio.
- El uso de un pin cuadrado con respecto al cónico no genero un aumento en la temperatura de la soldadura como se esperaba, posiblemente sea atribuido a la adherencia de material al pin cuadrado creando así un pin cilíndrico en su lugar.

Trabajos futuros

Se recomienda utilizar un horno de atmosfera controlada para evitar la interacción del magnesio y litio con el oxígeno de la atmosfera y de esta manera tener un mejor control en la cantidad de porosidad en el material. Además es posible utilizar otro método de vaciado como el vaciado a presión (die casting), ambas recomendaciones sugieren la reducción de defectos en el material por lo que se esperaría una mejora en las propiedades mecánicas.

Para un mejor análisis de la microestructura de las aleaciones con contenido de litio se recomienda utilizar métodos que detecten este elemento, por ejemplo el ya mencionado SIMS (secondary ion mass spectrometry).

También es recomendable investigar las temperaturas y tiempos óptimos de los tratamientos térmicos de solución y envejecimiento, ya que estas aleaciones son tratables térmicamente, lo que implica una mejora en sus propiedades mecánicas.

Siendo así, es posible aplicar un tratamiento térmico post-soldadura con la intención de mejorar las propiedades de la unión.

En cuanto a la soldadura por fricción, es recomendable la investigación del efecto de la variación de los parámetros operativos y geometría del pin para la obtención de una buena soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Deschamps, M. Garcia, J. Chevy, B. Davo, and F. De Geuser, "Influence of Mg and Li content on the microstructure evolution of Al-Cu-Li alloys during long-term ageing," *Acta Mater.*, vol. 122, 2017.
- [2] M. Karamouz, M. Azarbarmas, M. Emany, and M. Alipour, "Microstructure, hardness and tensile properties of A380 aluminum alloy with and without Li additions," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 582, 2013.
- [3] S. Yang, J. Shen, X. Yan, X. Li, F. Zhang, and B. Sun, "Homogenization treatment parameter optimization and microstructural evolution of Al-Cu-Li alloy," *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Met. Mater. Eng.*, vol. 46, no. 1, 2017.
- [4] R. Ivanov, A. Deschamps, and F. De Geuser, "Clustering kinetics during natural ageing of Al-Cu based alloys with (Mg, Li) additions," *Acta Materialia*, vol. 157, 2018.
- [5] E. Balducci, L. Ceschini, S. Messieri, S. Wenner, and R. Holmestad, "Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 707, no. June, 2017.
- [6] R. Ivanov, A. Deschamps, and F. De Geuser, "High throughput evaluation of the effect of Mg concentration on natural ageing of Al-Cu-Li-(Mg) alloys," *Scripta Materialia*, vol. 150, 2018.
- [7] X. M. Wang, G. A. Li, J. T. Jiang, W. Z. Shao, and L. Zhen, "Influence of Mg content on ageing precipitation behavior of Al-Cu-Li-x alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 742, 2019.
- [8] J. R. Davis, "Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview," *ASM Int.*, 2001.
- [9] M. W. Gordon, *Handbook of aluminum*, vol. 1. Marcel Dekker, 2003.
- [10] "Online Materials Information Resource - MatWeb." [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/SearchProperty.asp?gclid=Cj0KCQjw0brtBRDOARIsANMDykaSkLTs1eyUwoUzwJcXccRwU0okk7Q0T1OtMgqOQQiLkjBF3676dqAaAky4EALw_wcB. [Accessed: 22-Oct-2019].
- [11] S. Avner, "Introduccion a La Metalurgia Fisica Sydney H Avner." p. 227, 1988.

- [12] K. Amundsen *et al.*, “Magnesium,” in *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [13] E. Aghion and B. Bronfin, “Magnesium alloys development towards the 21st century,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 350, pp. 19–28, 2000.
- [14] Z. Zeng, J. F. Nie, S. W. Xu, C. H. J. Davies, and N. Birbilis, “Super-formable pure magnesium at room temperature,” *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, Dec. 2017.
- [15] E. L. Dreizin, E. L. Dreizin, C. H. Berman, and E. P. Vicenzi, “Condensed-phase modifications in magnesium particle combustion in air,” *Scr. Mater.*
- [16] J. O. Márquez, “Aleaciones metálicas en aplicaciones aeronáuticas Aleaciones metálicas de aplicaciones en aeronáutica Autor : Javier Otero Márquez,” no. August, 2015.
- [17] A. K. Furr, *CRC Handbook of Laboratory Safety*, 5th Editio. CRC Press, 2000.
- [18] A. Valencia Giraldo, “Las aleaciones aluminio-litio,” *Rev. Colomb. Mater.*, no. 8, 2016.
- [19] A. K. Dahle, Y. C. Lee, M. D. Nave, P. L. Schaffer, and D. H. StJohn, “Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys,” *Journal of Light Metals*, vol. 1, no. 1. Elsevier BV, 2001.
- [20] “ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams - ASM International.” [Online]. Available: https://www.asminternational.org/bestsellers/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION. [Accessed: 03-Nov-2019].
- [21] H. E. Camurlu and N. U’nal, “Friction stir processing and characterisation of A380 cast aluminium alloy,” vol. 24, no. 6, 2011.
- [22] J. R. Davis and M. Park, *Alloying: understanding the basics*, vol. 39, no. 09. 2002.
- [23] Y. Mao, L. Ke, F. Liu, C. Huang, Y. Chen, and Q. Liu, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of 2060 aluminum lithium alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 5–8, 2015.
- [24] Y. E. Ma, Z. C. Xia, R. R. Jiang, and W. Y. Li, “Effect of welding parameters on mechanical and fatigue properties of friction stir welded 2198 T8 aluminum–lithium alloy joints,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 114, 2013.
- [25] H. S. Lee, J. H. Yoon, J. T. Yoo, and K. No, “Friction stir welding process of

- aluminum-lithium alloy 2195,” *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, 2016.
- [26] E. A. L. Baltazar, A. H. Jázquez, A. L. Ibarra, P. O. González, and B. Hernández, “Evaluación de los parámetros en soldadura por fricción en un aluminio A6061-T6,” 2018.
- [27] J. Zhang, X. S. Feng, J. S. Gao, H. Huang, Z. Q. Ma, and L. J. Guo, “Effects of welding parameters and post-heat treatment on mechanical properties of friction stir welded AA2195-T8 Al-Li alloy,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, 2018.
- [28] S. R. Ren, Z. Y. Ma, and L. Q. Chen, “Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy,” *Scr. Mater.*, vol. 56, no. 1, 2007.
- [29] P. M. G. P. Moreira, A. M. P. de Jesus, M. A. V. de Figueiredo, M. Windisch, G. Sinnema, and P. M. S. T. de Castro, “Fatigue and fracture behaviour of friction stir welded aluminium-lithium 2195,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 60, no. 1, 2012.
- [30] J. T. Yoo, J. H. Yoon, K. J. Min, and H. S. Lee, “Effect of Friction Stir Welding Process Parameters on Mechanical Properties and Macro Structure of Al-Li Alloy,” *Procedia Manuf.*, vol. 2, no. February, 2015.
- [31] A. International, *ASM Handbook Welding brazing and soldering*, vol. 6. 1993.
- [32] S. Gao, C. S. Wu, G. K. Padhy, and L. Shi, “Evaluation of local strain distribution in ultrasonic enhanced Al 6061-T6 friction stir weld nugget by EBSD analysis,” *Mater. Des.*, vol. 99, 2016.
- [33] “» Friction Stir Welding.” [Online]. Available: <https://reach.wisc.edu/friction-stir-welding/>. [Accessed: 03-Nov-2019].
- [34] M. W. Mahoney, C. G. Rhodes, J. G. Flintoff, R. A. Spurling, and W. H. Bingel, “Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 29, no. 7, 1998.
- [35] L. E. Murr, R. D. Flores, O. V. Flores, J. C. McClure, G. Liu, and D. Brown, “Friction-stir welding: Microstructural characterization,” *Mater. Res. Innov.*, vol. 1, no. 4, 1998.
- [36] E. Association and N. M. Institutes, *Calibration of Thermocouples*, vol. 1. 2011.
- [37] ASTM, “Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques ASTM E 220- 02,” 2011.

- [38] ASTM, "Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials ASTM E10-15," 2012.
- [39] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM E8/E8M," 2011.
- [40] V. Kumar, "Detection and distribution of lithium in Mg-Li-Al based alloy by ToF-SIMS," *Appl. Surf. Sci.*, 2016.
- [41] L. Wang, H. Rhee, S. D. Felicelli, A. S. Sabau, and J. T. Berry, "OXIDE FILM AND POROSITY DEFECTS IN MAGNESIUM ALLOY AZ91," 2009.

ANEXOS