



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“INFLUENCIA DE LA SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA GTAW EN
LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE
JUNTAS SOLDADAS DE ALUMINIO A1200 - H14 USADO EN LA
INDUSTRIA CARROCERA”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR:

JHOE SEBASTIAN FIALLOS AVILA

RIOBAMBA – ECUADOR

2020

©2020, Jhoe Sebastian Fiallos Avila

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jhoe Sebastian Fiallos Avila, declaro que el presente trabajo de titulación es de propia autoría y que los resultados obtenidos del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos del presente trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de marzo del 2020



Jhoe Sebastian Fiallos Avila

C.C 060554225-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, “INFLUENCIA DE LA SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA GTAW EN LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE JUNTAS SOLDADAS DE ALUMINIO A1200 - H14 USADO EN LA INDUSTRIA CARROCERA”, realizado por el señor: JHOE SEBASTIAN FIALLOS AVILA, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Msc. Marcelo Antonio Jácome Valdez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	10-03-2020
Ing. Marco Vinicio Guevara Granizo PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	10-03-2020
Ing. Marco Homero Almendariz Puente MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	10-03-2020

DEDICATORIA

Este Trabajo de Titulación va dedicado a toda mi familia por ser el pilar fundamental en la obtención de este logro, por todo su apoyo, ánimos y en especial por creer siempre en mí.

Jhoe

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por haberme dado la oportunidad de alcanzar esta meta que muchas veces me parecía inalcanzable. A mi familia, que me dio las fuerzas necesarias para alcanzar este logro.

Debo agradecer también a mis amigos, amigas, compañeros y compañeras con los que juntos hemos afrontado y superado todos los retos que se han presentado.

A los docentes Ing. Marco Guevara e Ing. Marco Almendariz por su guía, ayuda y consejos entregados durante la realización de este trabajo. Un agradecimiento especial a la Facultad de Mecánica y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por haberme permitido formar parte de tan prestigiosa Institución, mil gracias de todo corazón.

A mi tío Luis Carrillo Bravo † ya que sin su ayuda la realización de este trabajo no hubiera sido posible, siempre estarás en mi corazón.

Jhoe

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
LISTA DE ANEXOS	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1	Formulación del problema	5
1.2	Justificación	6
1.3	Alcance	6
1.4	Objetivos	7
1.4.1	<i>Objetivo General</i>	7
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i>	7
1.5	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.5.1	El Proceso de Soldadura	7
1.5.2	Métodos de unión para Aluminio	8
1.5.3	La Soldadura	9
1.5.3.1	<i>Tipos de procesos de Soldadura</i>	10
1.5.3.2	<i>Equipo de Soldadura por Arco Eléctrico</i>	11
1.5.3.3	<i>Ventajas del Proceso de soldadura</i>	12
1.6	La Soldabilidad.....	12
1.7	El Arco Eléctrico	13
1.7.1	Procesos de Soldadura por Arco Eléctrico	13

1.7.2	El Cordón de Soldadura	14
1.7.3	Los ElectrodoS	15
1.8	Tipos de procesos de Arco Eléctrico.....	15
1.8.1	Soldadura por arco con electrodo de metal revestido	15
1.8.2	Soldadura por electrodo no consumible protegido	17
1.8.3	Soldadura por electrodo consumible protegido.....	17
1.8.4	Soldadura por arco sumergido	18
1.9	Aleación de Aluminio A1200.....	19
1.9.1	Composición Química de la aleación de Aluminio ASTM A1200 - H14.....	20
1.9.2	Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio A1200	20
1.10	Soldadura de Aluminio	20
1.10.1	Principales métodos de Soldeo por arco eléctrico para Aluminio.....	21
1.10.2	Características del Proceso GTAW aplicado a la unión de Aluminio	21
1.10.3	Electrodos no consumibles para Soldadura GTAW	22
1.11	Inspección de soldadura según AWS	23
1.11.1	Ensayos No Destructivos	24
1.11.2	Ensayos Destructivos o Ensayos Mecánicos	26
1.11.2.1	<i>Ensayo de Tracción</i>	27
1.11.2.2	<i>Ensayo de Dureza</i>	28
1.11.2.3	<i>Ensayo de Micro dureza Vickers</i>	28

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	30
2.1	Estudio de los parámetros de soldadura del proceso GTAW.....	30
2.2	Definición de los parámetros del proceso de soldadura GTAW a controlar	31
2.2.1	Estudio y Definición del Equipo de Soldadura a utilizar.....	32
2.2.2	Energía eléctrica utilizada	35
2.2.3	Equipo de Control de Velocidad para antorcha GTAW	36
2.2.3.1	Clasificación de los electrodos de Tungsteno.....	36
2.2.4	Gas de Protección	38
2.2.5	El Proceso GTAW Aplicado a la Unión de Aluminio	39
2.2.6	Datos preliminares del proceso GTAW para soldadura de Aluminio	43

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	44
3.1	Calibración y Montaje del Equipo de Control de Velocidad	44
3.2	Montaje del Equipo de Control de Velocidad	45
3.3	Calibración del Equipo de Soldadura y Pruebas Iniciales	45
3.3.1	Ensayos de Soldadura en Juntas de Aluminio	46
3.4	Parámetros de Soldadura para la Aleación de Aluminio A1200 H14	53
3.5	Soldadura semiautomática de la aleación de Aluminio A1200 -H14	53
3.6	Ensayos no Destructivos realizados en las juntas soldadas	56
3.6.1	Ensayo de Inspección visual	56
3.6.2	Ensayos de Tintas Penetrantes	57
3.7	Caracterización del material	61
3.7.1	Estudio de la Microestructura del material	62
3.8	Ensayos Mecánicos	63
3.8.1	Ensayo de Microdureza Vickers	63
3.8.2	Ensayo de Tracción	67
3.9	Análisis Metalográfico del Material Obtenido	72
	Conclusiones	83
	Recomendaciones	85

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- 1:	Composición química de la aleación de aluminio ASTM A1200 -H14.....	20
Tabla 2- 1:	Propiedades mecánicas aleación aluminio A1200.....	20
Tabla 3- 1:	Clasificación de los electrodos de tungsteno.....	23
Tabla 4- 1:	Clasificación de los electrodos de tungsteno para soldadura GTAW	23
Tabla 5- 1:	Tipos de electrodos de tungsteno para proceso GTAW.....	24
Tabla 1- 2:	Tipos y clasificación de electrodos.....	34
Tabla 2- 2:	Tipos de electrodos de Tungsteno para proceso GTAW.....	38
Tabla 3- 2:	Intensidad de corriente en función del diámetro de electrodo.....	40
Tabla 4- 2:	Sugerencia de gas y corriente para diferentes materiales y espesores.....	42
Tabla 5- 2:	Parámetros iniciales de soldadura recopilados.....	43
Tabla 1- 3:	Parámetros de soldadura para la Junta N°1.....	47
Tabla 2- 3:	Parámetros de soldadura para la junta N°2.....	48
Tabla 3- 3:	Parámetros de soldadura para la junta N°3.....	49
Tabla 4- 3:	Parámetros de soldadura para la Junta N°4.....	50
Tabla 5- 3:	Parámetros de soldadura para la junta N°5.....	51
Tabla 6- 3:	Parámetros de soldadura para la junta N°6.....	51
Tabla 7- 3:	Parámetros de soldadura Junta N°7.....	52
Tabla 8- 3:	Parámetros determinados para la aleación A1200 - H14.....	53
Tabla 9- 3:	Diagonales de indentación medidas en el cordón de soldadura.....	64
Tabla 10- 3:	Dureza vickers en el cordón de soldadura.....	65
Tabla 11- 3:	Diagonales de Identación medidas en el material base.....	65
Tabla 12- 3:	Dureza vickers determinada sobre el material base.....	66
Tabla 13- 3:	Resumen de dureza vickers obtenidas.....	66
Tabla 14- 3:	Parámetros del ensayo de tracción.....	69
Tabla 15- 3:	Resultados obtenidos en los ensayos de tracción.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1:	Tipos de Roblonado.....	8
Figura 2 -1:	Esquema Básico del Soldadura por Arco.....	14
Figura 3 -1:	Partes de un Cordón de Soldadura.....	14
Figura 4 -1:	Esquema Proceso de Soldadura con electrodo de metal revestido.....	16
Figura 5 -1:	Esquema del Proceso de Soldadura GTAW.....	17
Figura 6 -1:	Esquema de soldadura GMAW.....	18
Figura 7 -1:	Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido.....	19
Figura 8 -1:	Ensayo de Líquidos Penetrantes en cordones de Soldadura.....	25
Figura 1 -2:	Equipo Básico para proceso GTAW.....	33
Figura 2- 2:	Suministro de Gas inerte Argón para proceso GTAW.....	33
Figura 3 -2:	Soplete para soldadura GTAW.....	35
Figura 4 -2:	Penetración con corriente continua y polaridad inversa.....	35
Figura 5 -2:	Penetración de la soldadura con polaridad directa.....	36
Figura 6 -2:	Penetración de la soldadura con polaridad directa.....	38
Figura 7 -2:	Arco eléctrico proceso GTAW gas de protección Argón.....	39
Figura 8 -2:	Arco eléctrico proceso GTAW gas de protección Helio.....	39
Figura 1 -3:	Pruebas y Calibración del equipo de control de velocidad.....	44
Figura 2 -3:	Antorcha GTAW montada en el equipo de control de velocidad de avance.....	45
Figura 3 -3:	Equipo de alta frecuencia para soldadura GTAW.....	46
Figura 4- 3:	Limpieza y Pre calentamiento de las juntas de aluminio.....	46
Figura 5 -3:	Esquema del tipo de soldadura a realizar.....	47
Figura 6 -3:	Montaje del equipo de soldadura y las placas de aluminio.....	47
Figura 7 -3:	Junta soldada N°1.....	48
Figura 8 -3:	Junta Soldada N°2.....	48
Figura 9 -3:	Junta Soldada N°3.....	49
Figura 10 -3:	Junta Soldada N°4.....	50
Figura 11 -3:	Electrodo para Aluminio y Acero Inoxidable.....	50
Figura 12 -3:	Junta Soldada N°5.....	51
Figura 13 -3:	Junta Soldada N°6.....	52

Figura 14 -3: Junta Soldada N°7.....	53
Figura 15 -3: Precalentamiento de las Juntas a Soldar.....	54
Figura 16 -3: Montaje de las placas a soldar.....	54
Figura 17 -3: Datos ingresados en el equipo de control de velocidad.....	55
Figura 18 -3: Cordón de soldadura formado en el material base.....	55
Figura 19 -3: Junta de aluminio soldada	56
Figura 20 -3: Junta Soldada N°1.....	57
Figura 21 -3: Junta soldada N°2.....	57
Figura 22 -3: Líquidos Penetrantes Karl Deutsch para ensayos no Destructivos.....	58
Figura 23 -3: Preparación de las juntas a ensayar.....	58
Figura 24 -3: Aplicación del líquido penetrante Karl Deutsch.....	59
Figura 25 -3: Limpieza del exceso de líquido penetrante.....	59
Figura 26 -3: Revelador aplicado sobre las juntas	59
Figura 27 -3: Resultado del ensayo en las juntas N° 1 y 2.....	60
Figura 28 -3: Resultado del ensayo en las juntas N° 3 y 4.....	60
Figura 29 -3: Resultado del Ensayo en las Juntas N° 5 y 6.....	60
Figura 30 -3: Resultado del ensayo en las juntas N° 7 y 8.....	61
Figura 31 -3: Preparación de las probetas para análisis metalográfico.....	62
Figura 32 -3: Desbaste de la superficie a analizar.....	62
Figura 33 -3: Micrómetro para ensayo de dureza Vickers	64
Figura 34 -3: Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción	68
Figura 35 -3: Probetas para ensayos de tracción	68
Figura 36 -3: Equipo utilizado para ensayos de tracción	69
Figura 37 -3: Ensayo de tracción realizado	69
Figura 38 -3: Microscopio óptico Nikon E200.....	73
Figura 39 -3: Defecto en cordón de soldadura N°1 aumento 100x.....	73
Figura 40 -3: Microestructura Junta N°1 aumento 100x.....	74
Figura 41 -3: Microestructura Junta N°1 aumento 400x.....	74
Figura 42 -3: Microestructura junta soldada N°2 aumento 100x.....	75
Figura 43 -3: Grieta en cordón de soldadura junta N°2 Aumento 100x.....	75
Figura 44- 3: Junta soldada N°2 aumento 400x	76
Figura 45-3: Junta soldada N°3 aumento 400X.....	76

Figura 46-3: Junta soldada N°4 aumento 100X.....	77
Figura 47-3: Microestructura junta soldada N°4 aumento 400X.....	77
Figura 48-3: Microestructura junta soldada N°4 aumento 400x.....	78
Figura 49-3: Microestructura junta soldada N°5 aumento 100x.....	78
Figura 50-3: Microestructura junta soldada N°5 aumento 400X.....	79
Figura 51-3: Junta soldada N° 5 aumento 400X.....	79
Figura 52-3: Junta soldada N°6 aumento 100x.....	80
Figura 53-3: Junta soldada N°6 aumento 400x.....	80
Figura 54-3: Junta soldada N° 7 aumento 400x.....	81
Figura 55-3: Junta soldada N°7 aumento 400x.....	81
Figura 56-3: Junta Soldada N°8 Aumento 100x.....	82
Figura 57-3: Junta Soldada N°8 Aumento 400x.....	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1- 1:	Tipos de procesos de soldadura.....	10
Gráfico 2- 1:	Procedimiento para realizar el análisis con Líquidos Penetrantes.....	26
Gráfico 1- 2:	Composición química requerida para los electrodos de Tungsteno.....	37
Gráfico 2 -2:	Tipo de corriente recomendada para cada material a soldar en GTAW	41
Gráfico 3- 2:	Composición y parámetros recomendados del electrodo Er 535.....	43
Gráfico 1- 3:	Curvas Fuerza Deformación de las probetas ensayadas	67
Gráfico 2- 3:	Curva Fuerza vs Distancia probeta Tracción 1.....	70
Gráfico 3- 3:	Curva Fuerza vs Distancia probeta Tracción 2.....	70
Gráfico 4- 3:	Curva Fuerza vs Distancia Probeta Tracción 2.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna
Al	Aluminio
Ar	Argón
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society of Testing Materials
AWS	American Welding Society
CA- AF	Corriente Alterna de Alta Frecuencia
CC	Corriente Continua
DC	Corriente Directa
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
He	Helio
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MPa	Mega Pascales
N	Newtons
PAW	Plasma Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
Si	Silicio
SMAW	Shield Metal Arc Welding

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: WELDING PROCEDURE

ANEXO B: RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

ANEXO C: DATASHEET TINTAS PENETRANTES KARL DEUTSCH

ANEXO D: HOJA DE DATOS ALEACIÓN DE ALUMINIO A1200 – H14

ANEXO E: DATASHEET MATERIAL DE APORTE Er5356

RESUMEN

El siguiente trabajo de titulación fue realizado con el objetivo principal determinar la microestructura y las propiedades mecánicas de una aleación de aluminio soldado bajo el proceso *GTAW* semiautomático. Este proceso de soldadura puede ser aplicado en la industria alimenticia, estructuras mecánicas o la industria carrocera. Se realizaron ensayos preliminares con diferentes parámetros de soldadura, entre estos se reguló el voltaje, amperaje, temperatura de precalentamiento y flujo de gas de protección utilizados en el proceso. Las juntas obtenidas fueron sometidas a ensayos de tintas penetrantes e inspección visual, llegando así a encontrar los parámetros de soldadura adecuados, logrando obtener las mejores propiedades posibles. El material con el que se trabajó fue la aleación de aluminio A1200-H14 debido a la relativa facilidad de encontrar este producto en el mercado local. Las dimensiones de las placas a soldar fueron 200x100x3mm. Una vez obtenido el material soldado se realizaron de ensayos destructivos y no destructivos como son: ensayos de dureza, tracción, inspección visual y tintas penetrantes para determinar las propiedades mecánicas del material. Con los diferentes ensayos mecánicos que fueron realizados se logró comprobar que la dureza del material se vio incrementada respecto a la del material base, la microestructura del material fue afectada de manera que la zona afectada térmicamente presentó una coloración diferente a la del material base, mientras que la resistencia a la tracción del material se vio reducida a la mitad, esto debido a que se realizó un único cordón de soldadura en las placas. Mientras tanto la microestructura final se vio claramente afectada después de aplicar el proceso de soldadura a las juntas, en donde se observó la clara diferencia entre el material base y el cordón de soldadura realizado, obteniendo principalmente una microestructura de tipo interdendrítica compuesta por cristales de $SiAl_2$, segregaciones de Cromo debido al material de aporte utilizado.

Palabras Clave: <SEMIAUTOMÁTICO>, <PARÁMETROS DE SOLDADURA>, <ALEACI[ÓN DE ALUMINIO>, <ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS>, <MICROESTRUCTURA>, <ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE>, <INTERDENDRÍTICA>, <SEGREGACIÓN DE CROMO>

ABSTRACT

The following research work was performed with the main objective of determining the microstructure and mechanical properties of an aluminum welded under the semi-automatic GTAW process. This welding process can be applied in the food industry, mechanical structures or the bodywork industry. Preliminary tests were carried out with different welding parameters, among these the voltage, amperage, preheating temperature and protective gas flow used in the process were regulated. The joints obtained were subjected to penetrating dye tests and visual inspection, thus finding the appropriate welding parameters and obtaining the best possible properties. The material worked with was the aluminium alloy A1200-H14 due to the relative ease of finding this product in the local market. The dimensions of the plates to be welded were 200x100x3mm. Once the welded material was obtained, destructive and non-destructive tests were carried out, such as: hardness tests, traction, visual inspection and penetrating inks to determine the mechanical properties of the material. With the different mechanical tests that were carried out it was possible to verify that the hardness of the material was increased with respect to that of the base material, the microstructure of the material was affected in such a way that the thermally affected zone presented a different colouring to that of the base material, while the tensile strength of the material was reduced by half, this due to the fact that a single weld seam was made on the plates. Meanwhile, the final microstructure was clearly affected after applying the welding process to the joints, where the clear difference between the base material and the weld bead made was observed, obtaining mainly an interdenritic type microstructure composed of SiAl₂ crystals, chromium segregations due to the filler material used.

Key words: <SEMIAUTOMATIC>, <WELDING PARAMETERS>, <ALUMINIUM ALLOYMENT>, <DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS>, <MICROSTRUCTURE>, <THERMALLY AFFECTED ZONE>, <INTERDENDRITICS>, <CHROME REGREGATION>

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, los humanos usan métodos para unir dos materiales. Sin embargo, con la llegada de la revolución industrial, alrededor del año 1800, las técnicas existentes hasta entonces, como forja o fundición, fueron mejoradas y perfeccionadas significativamente (Jeffus 2009). Se lograron perfeccionar diferentes técnicas de procesos de soldadura como: soldadura por arco, fricción, presión, atmósfera protegida entre otros (Khan 2007; Kou 2003; Thomas et al. 1995, p.3). Se han ensayado diversos métodos de soldadura en diferentes materiales siendo el aluminio uno de particular atención. El aluminio un material, que por sus características mecánicas, en especial su relación resistencia-peso, se ha convertido en un material de gran importancia en la industria (Miller et al. 2000). De entre los diferentes procesos de soldadura existentes con los cuales se puede unir el aluminio está el proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). La soldadura GTAW, que se caracteriza por el uso de un electrodo que generalmente es de Tungsteno (Jeffus 2008), requiere un gran cuidado de la atmósfera que rodea el arco formado por el electrodo.

Se han realizado estudios sobre las propiedades mecánicas del aluminio soldado bajo este proceso debido al uso que este material tiene a nivel industrial (Miller et al. 2000; Baumeister et al. 1997) y, al ser este uno de los elementos de mayor abundancia en el planeta su obtención no representa dificultad alguna (Hufnagel 1992). Además, gracias a sus propiedades mecánicas que resultan muy convenientes, principalmente su relación resistencia peso día tras día se ha convertido en uno de los materiales más explotados a nivel nacional e internacional. Diferentes industrias han optado por el aluminio como material clave para el crecimiento y desarrollo de su matriz industrial debido a los beneficios que representa el uso del aluminio (Baumeister et al. 1997; Bertram et al. 2009), por lo que es de gran importancia realizar un estudio que nos permita mejorar las propiedades que este metal ya posee. Este trabajo se enfoca en el estudio del proceso de soldadura semiautomática GTAW como método de unión para el aluminio y las afectaciones que éste presenta después de aplicar dicho proceso.

En la industria carrocera uno de los factores de mayor importancia a considerar es el peso del automóvil. A lo largo de la historia buscar diferentes soluciones que puedan ser eficaces y sustentables ha sido uno de los mayores retos. Es así como los principales materiales utilizados en la fabricación de carrocerías para autos son: aleaciones de hierro, plásticos, Resinas de poliéster y fibra de vidrio, cristales y aleaciones de aluminio. A nivel mundial existen diferentes industrias que se dedican al diseño y construcción de carrocerías para diferentes marcas de autos como, por ejemplo: Ford, Audi, Volkswagen, entre otros. De entre estos materiales uno de los más llamativos es el aluminio debido a su principal característica que es tener una relación resistencia peso muy buena.

A nivel mundial, las diferentes marcas de fabricantes de autos han tratado de poder relacionar las crecientes demandas en el mercado automotriz y a la vez tratar de buscar materiales que puedan adaptarse a diferentes situaciones. Uno de los materiales elegidos para poder mejorar las características de las carrocerías, elementos y piezas que forman parte de un automóvil es el aluminio. Al existir diferentes métodos de unión para los elementos partes y piezas de las carrocerías se vuelve necesario analizar con cuál de estos métodos se pueden obtener los mejores resultados en la industria. Los procesos de soldadura son los más utilizados en el sector industrial a nivel mundial, y entre estos el que mejores resultados presenta al trabajar con aluminio es el proceso con electrodo no consumible o proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

El estudio del proceso de soldadura GTAW aplicado a la unión de aluminio requiere de un gran cuidado y de ciertos parámetros que deben ser tomados muy en cuenta al momento de unir aluminio mediante este proceso. Es así que uno de los más importantes es como varía la fusión del material de acuerdo al tipo de energía eléctrica utilizada. Estudios de esta propiedad se han realizado para conocer cuál es la variación que se produce en juntas soldadas de aluminio por ejemplo (Yarmuch y Patchett 2007, p.3) , en donde se ve la afectación que el proceso sufre al modificar la corriente y el tipo de polaridad con el electrodo. Además, también se debe considerar también la corrosión que se puede producir en el material base por lo que se han comparado los resultados obtenidos en los procesos FSW (Friction Stir Welding) y GTAW como en (Fahimpour et al. 2012).

Existen diferentes aleaciones que pueden ser utilizadas en la industria carrocera, otra de estas aleaciones es conocida como Zircal que es utilizada en la industria naval y automotriz. El estudio realizado sobre esta aleación en (Sivashanmugam et al. 2010; Liu et al. 2012, p.13) se analizan las propiedades mecánicas obtenidas al someter el material base a un proceso de soldadura GTAW y comparando estas con las propiedades mínimas necesarias. Otras de las aleaciones utilizadas en la industria automotriz es la aleación 6061, y de la misma manera que en el estudio anterior se han realizado estudios para comparar la microestructura obtenida al aplicar este mismo proceso de soldadura a juntas soldadas de aluminio (Zhang et al. 2000). La dureza del material obtenido también es un parámetro muy importante que se ve afectado al aplicar este procedimiento para la unión de aluminio, y varios estudios han confirmado que la dureza cambia de manera significativa al ser sometido a un proceso de soldadura GTAW (Manti et al. 2008). Además, se deben estudiar las propiedades mecánicas de aluminio soldado que nos pueden dar varios indicios de cómo fue afectado el material base al ser sometido a este proceso como, por ejemplo. (Toapanta Bautista 2015)

Las propiedades mecánicas del aluminio soldado son muy importantes y su estudio es de vital importancia cuando se desea conocer como fueron afectadas después de este proceso, se descubrió que las propiedades de estas aleaciones fueron mejoradas después de ser unidas (Lakshminarayanan et al. 2009; Elangovan y Balasubramanian 2008). Todos los estudios realizados sobre procesos de

soldadura para aluminio han servido para poder mejorar las propiedades y características que este material tiene, diferentes aleaciones de este metal se han sometido a ensayos y estudios que han comprobado los cambios en sus propiedades (Malarvizhi y Balasubramanian 2011; Fan et al. 2009). Obteniendo resultados positivos a nivel internacional la industria ecuatoriana ha realizado estudios similares que han sido muy importantes para el desarrollo de la matriz productiva a nivel automotriz.

A nivel nacional el aluminio utilizado en la industria carrocera recibe diferentes métodos de unión como roblonado, remachado y soldado. Estos métodos de unión son utilizados tanto a nivel industrial como a nivel artesanal, de estos tres métodos el que mejores resultados entrega es el método de soldadura. Gracias a esto, las uniones son mucho más fuertes, duraderas y con mejores propiedades mecánicas, los estudios realizados sobre soldadura de aluminio a nivel internacional han sido el punto de partida de diferentes estudios a nivel local como (Arias Cáceres y Mantilla Guamán 2010), donde se han realizado pruebas de soldadura por arco sobre aluminio.

Finalmente se evaluarán los resultados obtenidos mediante ensayos destructivos y no destructivos que ayudarán a determinar las propiedades mecánicas del producto final obtenido, una vez obtenidas estas propiedades se podrán evaluar las mejoras esperadas tanto en las propiedades mecánicas del material como también en la microestructura, y gracias a esto se podrá concluir si el uso de un procedimiento semiautomático puede ser introducido con grandes ventajas en la industria ecuatoriana.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

ANTECEDENTES

El aluminio es uno de los metales con mayor disponibilidad en el planeta (Jeffus, 2009, pp. 4-6) consecuentemente la investigación sobre posibles usos y aplicaciones de este material se ha vuelto cada vez más importante, esto se debe a que este metal se ha utilizado a nivel industrial en diferentes aplicaciones tales como: tuberías (Wilde Jr 1976, p.5), instalación de tuberías (Palomo 2015, p.17), instalaciones sanitarias (Morales 2018), instalaciones para gas e instalaciones para telefonía y comunicación, las diferentes necesidades que se han presentado en estas industrias requieren que este material se pueda adaptar a diferentes situaciones y ambientes, las mismas que requerirán de propiedades específicas para cada aplicación, por esto es de gran importancia el estudio de procesos existentes a nivel industrial que puedan mejorar las propiedades que este metal presenta.

Uno de los procesos a los que el aluminio se somete a nivel industrial es el proceso de unión mediante soldadura, dentro de los diferentes métodos de soldadura se encuentra el proceso GTAW (Gas Tungstein Arc Welding), este procedimiento por arco bajo gas protector puede ser utilizado para unir casi todos los tipos y espesores de metales, (Jeffus 2009, p.5), sin embargo, en ocasiones la información y datos disponibles para su correcta aplicación deben ser verificados ya que las situaciones de trabajo afectan los diferentes parámetros que modifican los resultados obtenidos al aplicar este proceso de unión de metales.

El aluminio puede ser unido mediante este proceso, sin embargo, para que esto sea posible se debe cumplir con algunos requerimientos que mejorarán las características y propiedades del material resultante, es así como en base a esta consideración se han realizado diferentes investigaciones en los que se trabaja específicamente con aluminio sometido a un proceso de unión mediante soldadura por arco, mediante el proceso GTAW trabajos como los de (Pujari et al., 2018 pp.45-55) han experimentado con este proceso aplicado a la unión por soldadura de aleaciones de aluminio. Dentro de estos estudios el objetivo principal fue determinar las propiedades adquiridas por el material después de ser sometido al proceso de soldadura y los principales parámetros a tomarse en cuenta son:

- Tipo de Corriente
- Polaridad del proceso

- Tipo de Electrodo
 - Consumible
 - No Consumible
- Gas de Recubrimiento
- Amperaje y Flujo de Gas de protección

1.1 Formulación del problema

La necesidad de encontrar nuevos materiales, económicos y fáciles de encontrar u obtener han llevado a que se realicen un sinnúmero de estudios, investigaciones y ensayos que han permitido encontrar nuevos materiales que tienen el mismo desempeño mecánico en el campo que los materiales convencionales. En la industria el material convencional que ha sido utilizado desde la antigüedad es el acero debido a sus diferentes propiedades mecánicas, sin embargo, una de las desventajas que presenta este material es su elevado peso, es así que en los últimos años se ha optado por el uso de materiales que puedan desempeñar el mismo papel con una mejor relación resistencia peso. Uno de estos materiales es el aluminio que gracias a su gran disponibilidad en la corteza terrestre y a sus propiedades físicas y mecánicas ha sido seleccionado como una de las principales opciones para reemplazar el uso del acero a nivel industrial. Debido al incremento en el uso del aluminio a nivel industrial se ha vuelto necesario y de gran importancia la investigación, experimentación y pruebas que nos ayuden a mejorar las propiedades mecánicas que posee este material.

En el país el uso de la soldadura GTAW se ha limitado únicamente a procedimientos manuales que no ofrecen las garantías para ser utilizados a nivel industrial, esto junto al costo del proceso GTAW ha provocado que no sea tan utilizado. Es por eso que en la industria carrocera del país generalmente se utilizan remaches y roblones que son métodos de unión de materiales rápidos y sencillos, sin embargo, se debe tener en cuenta las desventajas que estos métodos tienen respecto al proceso de soldadura, para poder mejorar los resultados obtenidos con estos procesos se ha utilizado el proceso de soldadura, en el caso del aluminio es recomendable usar el proceso GTAW.

1.2 Justificación

- **Justificación Teórica**

Se determinarán todos los parámetros de soldadura necesarios para el proceso semiautomático GTAW aplicado a la soldadura de aluminio, entre estos tenemos: intensidad de corriente, voltaje, flujo de gas de protección y velocidad de avance del electrodo, parámetros que serán obtenidos mediante la respectiva investigación bibliográfica, y posteriormente serán validados mediante el análisis que tuvo el proceso de soldadura sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del material.

- **Justificación Metodológica**

Para lograr los objetivos planteados en el presente estudio se recurre a la investigación de diferentes fuentes bibliográficas que nos permita conocer/analizar o estudiar diferentes procesos de soldadura para el aluminio. Con esto se pretende conocer la influencia que este proceso tiene en la microestructura, así como también en las propiedades mecánicas del material utilizado en el proceso y posteriormente poder relacionar estos conocimientos a la semi automatización del proceso GTAW aplicado a la unión de juntas de aluminio.

- **Justificación Práctica**

De acuerdo con el objetivo del presente estudio, sus resultados nos permitirán encontrar una variante al proceso de soldadura GTAW que, generalmente se lo aplica de manera manual, lo cual variará de manera evidente tanto las propiedades mecánicas como su microestructura, proceso que podrá ser utilizado dentro de la industria carrocería o en diferentes procesos y/o aplicaciones a nivel industrial.

1.3 Alcance

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo realizar el estudio del efecto que tiene un proceso de soldadura aplicado a la unión de materiales con base de Aluminio y la determinación de los parámetros de soldadura adecuados para aplicar el proceso semiautomático

GTAW a la unión de juntas de la aleación de aluminio A1200 – H14 usado en la industria carrocería del país.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General*

- Analizar la influencia que el proceso de soldadura semiautomático GTAW tiene sobre la microestructura, la resistencia a tracción y la dureza de la aleación de aluminio A1200 – H14.

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Determinar los parámetros de soldadura adecuados para la aleación de aluminio A1200 - H14 bajo el proceso GTAW semiautomático.
- Verificar mediante ensayos de inspección visual y líquidos penetrantes la calidad del cordón de soldadura.
- Determinar mediante ensayos mecánicos de tracción y dureza las propiedades mecánicas del material resultante.
- Analizar la variación de la dureza del material resultante según las diferentes zonas de soldadura.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos.

1.5 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.5.1 El Proceso de Soldadura

El proceso de soldadura tiene como objetivo principal unir dos materiales. Proceso que desde la antigüedad fue necesario para la evolución de la especie humana, que a lo largo de la historia fueron inventados diferentes procedimientos de soldadura para poder cubrir esta necesidad. El inicio del uso de este proceso se dio de la edad de piedra a la de los metales, siendo el primer

metal utilizado por el hombre el cobre gracias a que se lo podía encontrar en estado natural en la superficie del planeta, los trabajadores de esos materiales rápidamente solucionaron los problemas que se tenían para fundir y alear metales (Jeffus 2009, p5).

Los primeros métodos de soldadura consistían en la formación de un molde de arena con la forma deseada sobre una pieza metálica y sobre esta verter metal fundido, formando así una única pieza de metal. Otro de los procesos que fueron utilizados en la antigüedad para la unión de metales consistió en colocar dos piezas metálicas muy cercanas y entre estas verter metal fundido, una vez que los bordes del material base quedaban fundidos con el material vertido se dejaba reposar hasta que la junta se endureciera. Con la primera revolución industrial se introdujo un nuevo método de soldadura conocido como soldadura por forja que consistía en calentar el material base hasta una temperatura maleable, cuando el material llegaba a este punto se utilizaba un martillo para golpear el material calentado con el metal que se deseaba soldar, este fue el método principal de unión de metales desde el año 1750 hasta el año 1886 año en el que el ingeniero inglés Elihu Thomson desarrolló la técnica conocida hasta la actualidad como soldadura por resistencia, siendo esta una manera mucho más rápida y confiable para unir materiales metálicos (Jeffus, 2009, pp. 4-6).

1.5.2 Métodos de unión para Aluminio

Los métodos que se utilizan para la unión de piezas y/o elementos fabricados de aluminio son los mismos métodos que se emplean para las estructuras de acero y son los siguientes:

- Roblonado

Este procedimiento consiste en la unión de piezas previamente perforadas por el cual un remache destinado para este proceso es introducido, formando así una segunda cabeza a este lo cual transforma al remache en un roblón, esto se logra con la estampación en caliente del remache, este proceso se lo puede realizar a mano mecánicamente con prensas hidráulicas o con el uso de herramientas de aire comprimido (Picazo Iranzo 2007). Los tipos de roblonado son las diferentes maneras de colocar las piezas que dependen de la resistencia final requerida y pueden ser de los siguientes tipos:

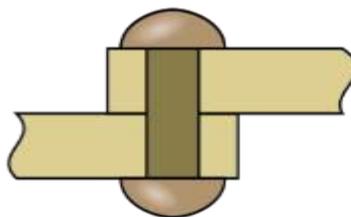


Figura 1- 1: Unión de placas por roblonado

Fuente: (Gálvez y Roldán 2015)

- Atornillado

Los tornillos son utilizados para formar uniones desmontables con una mayor velocidad en su ejecución, la forma en la que trabajan los tornillos es muy similar a la de los roblones, existen tres clases de tornillos destinados para este procedimiento: Tornillos ordinarios, calibrados y de alta resistencia (Iranzo).

- Soldadura

Entre los procesos de soldadura aplicables a la unión de materiales metálicos se encuentran los procesos de arco eléctrico, de estos el que mejores resultados presenta es el proceso por atmósfera protegida, principalmente el proceso GTAW.

1.5.3 La Soldadura

La soldadura es el proceso en el que se realiza la unión de dos materiales metálicos que generalmente se lo realiza por fusión de materiales, en la que las dos partes son soldadas fundiéndolas y agregando un material conocido como material de aporte el mismo que tiene un punto de fusión inferior al del material base, consiguiendo así un baño de metal fundido que al enfriarse se convierte en una unión estable y fija, adicionalmente se usan procesos que involucran presión o calor para producir la misma. (Kalpakjian y Schmid 2002).

Es un proceso en el que generalmente un material termoplástico o un material metálico queda adherido a otro con similares propiedades debido al uso de un material de aporte conocido como electrodo que al ser sometido a las altas temperaturas producidas por el arco eléctrico formado entre este y el material base y que al fundirse el charco producido favorece la unión entre las piezas. Se pueden utilizar diferentes fuentes de energía para la soldadura las cuales incluyen una llama de gas, arco eléctrico, laser, rayo de electrones y procesos de fricción o de ultrasonido. (Kalpakjian y Schmid 2002)

1.5.3.1 Tipos de procesos de Soldadura

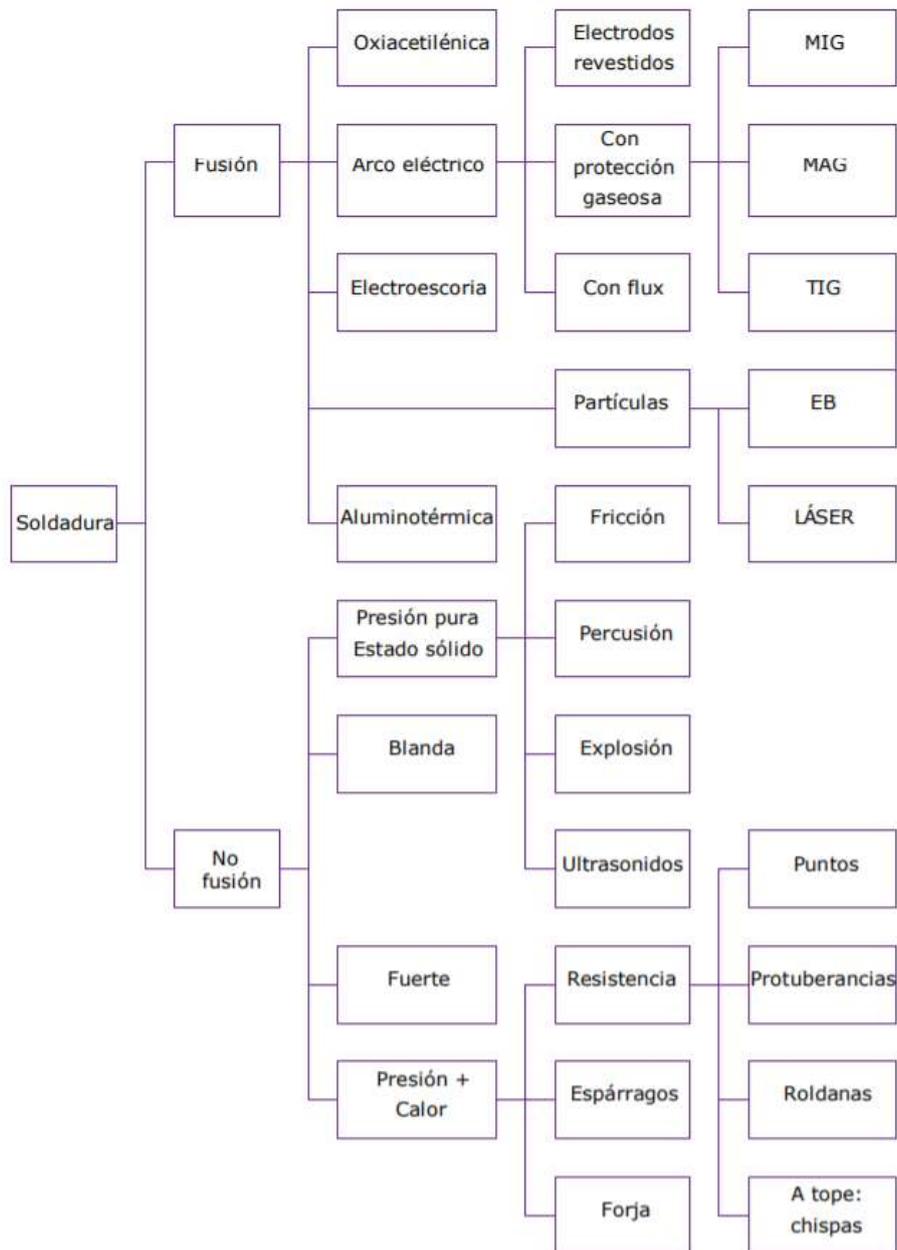


Gráfico 1-1: Tipos de procesos de soldadura

Fuente: (Pina 2012)

En la actualidad existen diferentes métodos y procesos de soldadura que dependen del tipo de material a soldar, las condiciones en las que se va a trabajar, el tipo de energía con la que se desea trabajar entre otros, los procesos de soldadura mas importantes son:

- Soldadura de Arco eléctrico

El arco eléctrico es producido al cerrar un circuito eléctrico a través del aire caliente entre dos puntos con un diferencial de potencial entre si dicho arco produce una gran cantidad de calor el cual es utilizado para fundir el material de aporte y/o la pieza a soldar. La soldadura con electrodo

revestido ayuda a la protección del cordón de los óxidos formados por la combustión del material de aporte. (Kalpakjian y Schmid 2002)

- Soldadura de Resistencia eléctrica

Este tipo de soldadura es un proceso termoeléctrico que es realizado por el calentamiento que se presenta en los metales, debido al flujo de corriente eléctrica a través de éstos, es un tipo de soldadura autógena la cual no necesita de un material de aporte en donde los electrodos se colocan en las piezas a soldar que irán juntas para que circule la corriente eléctrica a su alrededor para dar paso a la formación del cordón de soldadura por la disolución del material base (Villegas 2004).

- Soldadura por Plasma

La soldadura por plasma o también conocida como PAW (*Plasma Arc Welding*) se basa en el mismo principio que la soldadura GTAW por lo que es considerada como un sub proceso de este último, con la diferencia que el estado de plasma requiere de temperaturas mucho más elevadas que las alcanzadas en el proceso GTAW (Arriaga, y otros, 2008).

- Soldadura en Estado Sólido

En este proceso la fusión de los materiales metálicos se da por la aplicación de presión o una combinación entre presión y calor, además de no requerirse un material de aporte la temperatura del metal base se encuentra mucho más baja que su temperatura de fusión, al aplicarse presión bajo una temperatura elevada los materiales quedan unidas (Santiago et al. 2005).

El presente trabajo de investigación está enfocado a los procesos de Arco eléctrico, estos a su vez se descomponen en diferentes procesos que se utilizan para la unión de materiales metálicos.

1.5.3.2 Equipo de Soldadura por Arco Eléctrico

El equipo para soldadura por arco eléctrico consiste en dispositivos mecánicos y eléctricos que nos ayudan a realizar la unión de dos materiales, esto se logra realizar debido a la adecuada aplicación de calor y un material de aporte, la más desarrollada es sin duda la soldadura por arco eléctrico, que consiste en aportar el calor necesario para fundir el material de aporte o el material base a través de la formación de un arco eléctrico, estas pueden ser de tres tipos: manual, semiautomática y automática. (Fox 1983, pp.75-80).

Existen diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico y cada uno de estos requiere el uso de un equipo adecuado, debido a esto se puede clasificar estos equipos según su fuente de energía:

- Equipo de soldadura tipo transformador de AC
- Equipo de soldadura tipo transformador – rectificador AC/DC
- Equipo de soldadura tipo generador AC/DC
- Equipo de soldadura tipo inversor DC

1.5.3.3 Ventajas del Proceso de soldadura

Los procesos de soldadura presentan diferentes ventajas frente a los procesos antiguamente utilizados tanto a nivel industrial como a nivel comercial entre sus principales ventajas podemos encontrar las siguientes:

- Es muy eficaz y maximiza los tiempos de preparación respecto a otros tipos de juntas
- Las uniones resultantes no se deforman con facilidad
- El cordón de soldadura resultante tiene un realce visual
- Existen diferentes métodos de soldadura que pueden ser aplicados según los requerimientos y las necesidades del proceso o de los materiales a unir.
- Es un proceso muy versátil que puede ser utilizado en todos los niveles de la industria

1.6 La Soldabilidad

El concepto de soldabilidad hace referencia con la capacidad que un metal posee para ser unido con otro mediante cualquier proceso de soldadura conservando su naturaleza y sin presentar daños en su microestructura (Lippold y others 2015; Lippold y Kotecki 2005). Esta capacidad depende del punto de vista y de acuerdo a esto se debe considerar tres tipos de soldabilidad:

- Soldabilidad Metalúrgica

También es conocida como soldabilidad local y es la capacidad que tiene un material para no presentar cambios en sus propiedades físicas o en sus propiedades físico – químicas como resultado de las operaciones de soldeo.

- Soldabilidad Constructiva

También conocida como soldabilidad global, estudia las propiedades obtenidas como resultado de una operación de soldeo y que manifiesta la tendencia del material hacia el agrietamiento del mismo.

- Soldabilidad Operatoria

Es la propiedad que estudia las condiciones a las cuales se debe realizar un proceso de soldadura para que en su estructura no se de la aparición de defectos tales como: porosidades, fisuras, inclusiones, agrietamientos, etc. Diferentes factores intervienen en la soldabilidad de materiales metálicos los mas importantes son:

- Espesor y tipo del material base
- Elementos aleantes
- Tipo de procedimiento de soldadura y de junta
- Velocidad de enfriamiento
- Tipo de energía utilizada como fuente de calor
- Precalentamiento en la pieza a soldar

1.7 El Arco Eléctrico

Se conoce como arco eléctrico a la descarga que se produce entre dos materiales con un diferencial de potencial entre si en medio de una atmósfera bajo condiciones normales. El arco eléctrico fue descubierto en el año 1800 por Humphry Davy, la descarga que se produce debido a los electrones que fluyen desde un electrodo con carga positiva a otro con carga negativa, la fricción producida entre los electrones genera una gran cantidad de calor. Bajo condiciones normales el electrodo conectado al polo positivo puede alcanzar una temperatura de hasta 3500 °C, temperatura suficiente para provocar la fusión del electrodo y/o material de aporte utilizado en el proceso de soldadura (Compton 1923; Linnert 1967).

El arco eléctrico tiene diferentes usos y aplicaciones en la actualidad, siendo empleado como fuente de luz en la bombilla eléctrica, en la industria cinematográfica, además de esto la cantidad de calor desprendida por el arco eléctrico se ha convertido en la fuente principal de energía para la industria de la soldadura de metales debido a su alta temperatura alcanzada. (Cooper 1974; Proctor et al. 2000)

1.7.1 Procesos de Soldadura por Arco Eléctrico

Este proceso de soldadura es un sistema que requiere una fuente de calor (arco eléctrico) así como también de un medio gaseoso que es producido por la combustión del recubrimiento del

electrodo, la fusión entre el material de aporte y el material base es posible, esto genera una pieza muy resistente a diferentes esfuerzos mecánicos (Alting y Boothroyd 1990).

Para este tipo de proceso la energía se obtiene de una máquina alimentada por corriente continua (CC) o por corriente alterna (CA) la misma que a través de los cables conductores forma un corto circuito entre el electrodo y la pieza. La temperatura que se genera es alrededor de 4000 °C la cual genera la combustión del material que recubre al electrodo, cuando este material se convierte en gas tiene diferentes funciones como: proteger el cordón de impurezas existentes en el medio, facilitar el flujo de corriente y su función principal es proteger el material fundido de toda presencia de impurezas y elementos ajenos al proceso que se encuentren en el medio. Este proceso se caracteriza por ser sencillo de aplicar, muy eficiente y que además se lo puede utilizar en diferentes procesos industriales a gran y pequeña escala.

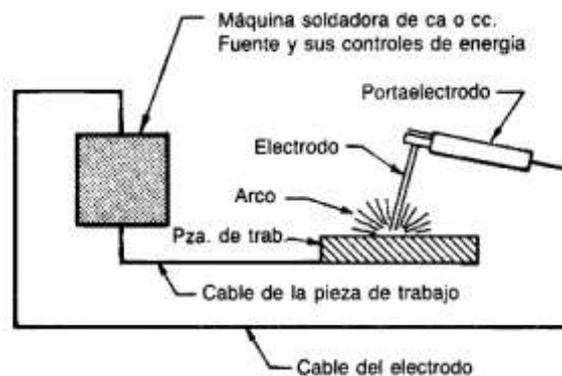


Figura 2-1: Esquema básico de soldadura por arco

Fuente: (Lincoln Electric 2019)

1.7.2 El Cordón de Soldadura

Se conoce como cordón de soldadura al depósito de metal fundido que resulta del avance longitudinal de un proceso de soldadura aplicado a una junta (Giachino y Weeks 1996), está definido por tres partes diferenciadas por completo como se muestra en la figura 3-1:

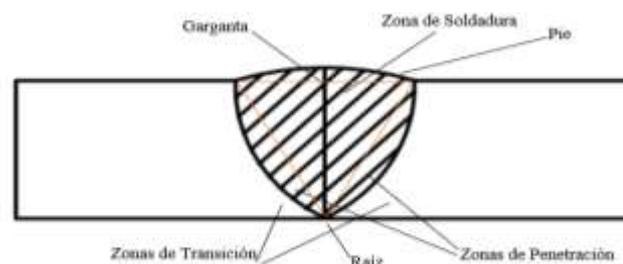


Figura 3-1: Partes de un Cordón de Soldadura

Fuente: (Asta 2012)

- a) **Zona de Soldadura:** Es la zona céntrica formada principalmente por el material de aporte.
- b) **Zona de penetración:** Parte de las piezas que han sido fundidas por el electrodo, una mayor o menor profundidad define la penetración de la soldadura
- c) **Zona de Transición:** Es la zona más Próxima a la zona de penetración

1.7.3 Los Electroodos

Un electrodo es un tipo de varilla metálica recubierto con diferentes materiales combinados que varían según la aplicación, la función principal del electrodo es ser la fuente generadora del arco eléctrico para la soldadura o la de material fundente para el proceso (Jeffus 2009), en su superficie ocurren reacciones químicas de oxidación y reducción. Los electrodos destinados para la soldadura por arco eléctrico se clasifican según las propiedades del material de aporte estudiadas por la AWS (*American Welding Society*) y la ASME (*American Society Mechanical Engineers*) es así como los electrodos empleados se determinan en función del material base a soldar. Las características de un electrodo se deben al recubrimiento de este, la normativa correspondiente para la clasificación de los electrodos es la AWS A5.1 (Zvanut y Sierdzinski 1980)

1.8 Tipos de procesos de Arco Eléctrico

Existen diferentes procesos de soldadura que basan su funcionamiento en el proceso de soldadura por arco eléctrico, entre los principales tenemos los siguientes:

1.8.1 Soldadura por arco con electrodo de metal revestido

Este proceso de soldadura al cual la AWS denomina como SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) es uno de los procesos de soldadura más antiguos y data del siglo XIV (Rodríguez, 2016), hasta que en 1097 cuando Oscar Kjellberg desarrolló el método de soldadura por arco que se produce entre un electrodo revestido y un metal base, en donde el arco eléctrico producido alcanza una temperatura cercana a los 3500°C en el electrodo, siendo esta superior a la temperatura requerida para fundir la mayoría de los metales. En este proceso el calor producido funde el metal base y al electrodo, generando así un baño de fusión el mismo que se va solidificando al mover el electrodo a lo largo de la junta. En este tipo de soldadura el amperaje con el que se debe trabajar está definido por el

diámetro del electrodo (Flores 2009). Los tipos de electrodo permitidos para este proceso son los siguientes:

- Celulósicos
- Rutílicos
- Bajo Hidrógeno
- Aceros Inoxidables y Fundición de Hierro
- Bronce, Cobre y Aluminio

Este tipo de soldadura se lo puede realizar con el uso de corriente continua como también de corriente alterna, la principal diferencia entre el uso de estos tipos de corrientes está en el arco producido, ya que al usar corriente continua el arco es mucho más estable, así como también las salpicaduras producidas por la combustión del recubrimiento (escoria) son muy poco frecuentes, sin embargo el uso de corriente continua o alterna limita la posibilidad de soldar piezas de un gran espesor, debido a esto se ha podido determinar que la intensidad de corriente dentro de este proceso rodea los 10 y 500 amperios.

La principal característica de este proceso es su simplicidad, su bajo costo y su versatilidad debido a la gran cantidad de aplicaciones que se le puede dar, sin embargo este procedimiento no puede ser automatizado o semi automatizado lo que lo vuelve un procedimiento netamente manual que se lo utiliza principalmente a pequeña escala. (Jeffus, 2009)

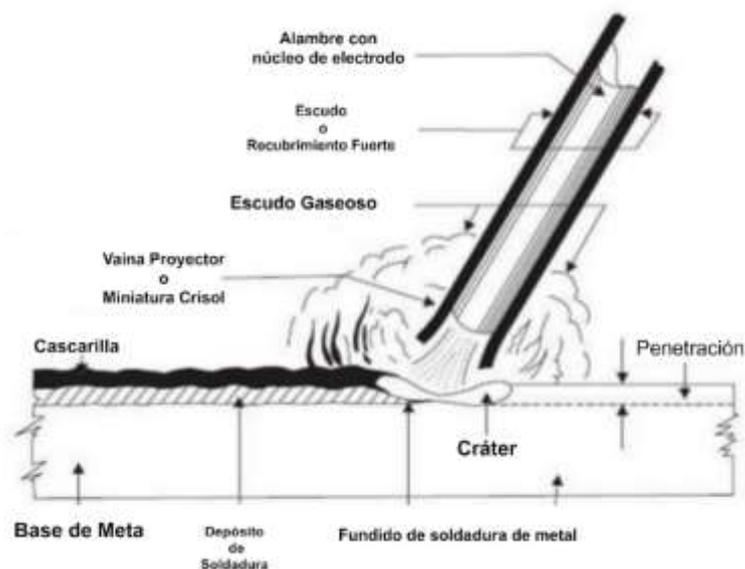


Figura 4-1: Esquema Proceso de Soldadura con electrodo de metal revestido

Fuente: (ESAB 2019)

1.8.2 Soldadura por electrodo no consumible protegido

La soldadura por electrodo no consumible o también llamada soldadura GTAW por sus siglas en inglés (*Gas Tungsten Arc Welding*) se distingue por el uso de un electrodo no consumible que generalmente es de tungsteno (Jeffus 2008), de ahí su nombre, para realizar este tipo de soldadura se requiere un medio de gas como protección que impida la contaminación de la junta soldada, los gases más utilizados para aislar la junta soldada son el argón, el helio (Olivares, Díaz, & Alvarez, 2012), y combinaciones de ambos, este método de soldadura fue descubierto y patentado en 1930 sin embargo, su uso fue generalizado 10 años después debido a su alto costo y complejidad (BestConcept 2019), en este proceso el metal para formar el cordón de soldadura es añadido de manera externa, el metal de aporte debe tener la misma composición o al menos similar a la del material base.

Este tipo de soldadura trabaja tanto con corriente continua como con corriente alterna; el uso de estos dos tipos de corriente cambia ciertas características del proceso, siendo estas: el uso de corriente continua permite trabajar dentro de un rango de amperaje mucho más amplio que va desde los 50 hasta los 500A. (Jeffus 2008, pp.75-83).

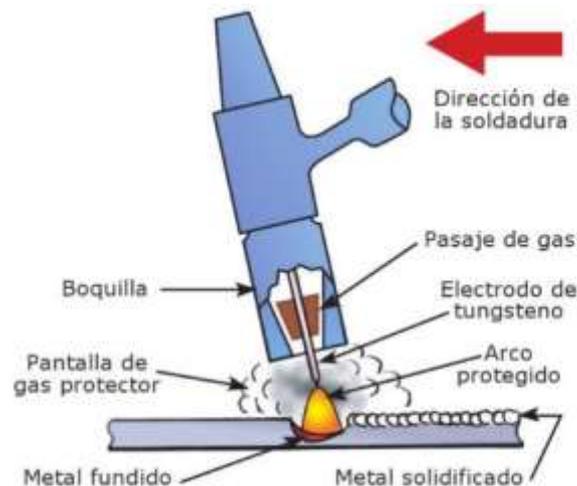


Figura 5-1: Esquema del Proceso de Soldadura GTAW

Fuente: (Rodríguez 2006)

1.8.3 Soldadura por electrodo consumible protegido

Este proceso de soldadura tiene gran similitud con el GTAW ya que también requiere de una atmósfera de gas protector para proteger la zona de soldadura y se divide en dos procesos con características propias los cuales son: el proceso MIG (*Metal Inert Gas*) y el Proceso MAG (*Metal Active Gas*), también es conocido como un proceso de soldadura por arco semiautomático debido

a que el cordón de soldadura es alimentado de manera automática con una velocidad previamente establecida o determinada (Suban y Tušek 2001). En el caso del proceso de soldadura MIG el gas no tiene participación alguna en la reacción de soldadura, por lo que su única función es la de protección, mientras que los gases utilizados son los mismos que en el proceso GTAW. En cambio, el proceso MAG se distingue del proceso MIG debido a que el gas protector participa activamente en la soldadura, esto se debe a que su zona de soldadura puede cambiar su forma pudiendo ser oxidante o reductora (Weman y Lindén 2006).

Debido a los cambios que se dieron en el gas protector la AWS denominó este proceso como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) las ventajas que este proceso presenta con respecto a los convencionales son numerosas, entre estas tenemos: fácil de aprender, produce soldaduras de mejor calidad, se puede utilizar bajas corrientes (Jara Delgado, Rojas, Bolívar, & Riofrío Guillín, 2007).

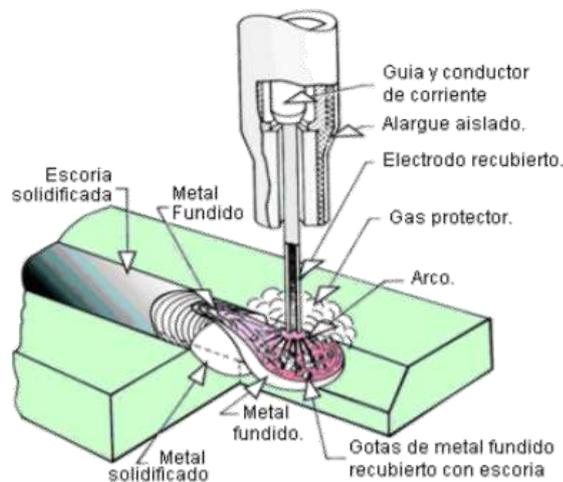


Figura 6-1: Esquema de soldadura GMAW

Fuente: (Rodríguez 2006)

1.8.4 Soldadura por arco sumergido

El proceso de soldadura por arco sumergido o también conocido como proceso SAW por sus siglas en inglés (Submerged Arc Welding) consiste en la fusión de un electrodo macizo protegido por la escoria que genera un flux ya sea granulado o en polvo (Wen et al. 2001). El flux tiene por función proteger el arco y la zona de fusión del medio circundante permaneciendo estos dos invisibles durante todo el proceso, este proceso de soldadura permite depositar un gran volumen de metal de fundición con una excelente calidad con un bajo costo y disponible para una amplia gama de aplicaciones, como por ejemplo recubrimientos, (Cho et al. 2013), producción de tuberías (Fujimori et al. 1981).

Este sistema es completamente automático, permitiendo así obtener grandes rendimientos en producción, además también puede ser utilizado como un proceso semiautomático. El arco eléctrico se produce entre la pieza a soldar y el electrodo metálico. Es utilizado para unir aceros al carbono de baja aleación, aleaciones de níquel y aceros inoxidable, además es utilizado para el revestimiento de materiales y aumentar la resistencia de estos a la corrosión, a temperaturas elevadas y al desgaste (Marín Pérez, 2017).

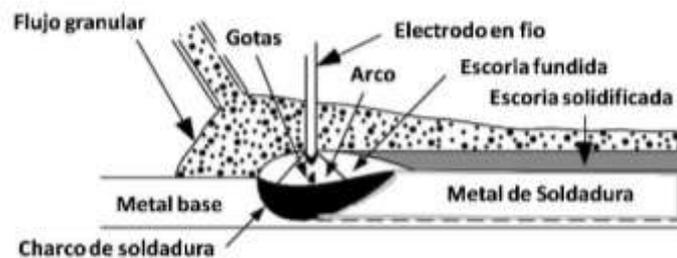


Figura 7-1: Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido

Fuente: (Costa et al. 2015)

1.9 Aleación de Aluminio A1200

La aleación de aluminio A1200 es del tipo industrial puro, con un alto nivel de plasticidad, resistencia a la corrosión y conductividad térmica, tiene una pequeña densidad y se la puede reforzar agregando elementos aleantes a su composición como, por ejemplo: zinc, cobre, magnesio, silicio, litio, escandio y otros elementos. Además, tiene una buena resistencia a la corrosión y conductividad térmica, a bajas temperaturas su resistencia y plasticidad aumentan, eso hace que pueda ser sometido a temple que aumenten esas propiedades. (Dalian, Highland Metals Co. 2019). Estos tratamientos superficiales nos ayudan a representar las aleaciones de aluminio en base a los diferentes procesos utilizados para su obtención (Molera Solá 1991). Entre estos tenemos: F (Condición de Fabricado), O (Recocido, recristalizado), H (Endurecido por deformación), H1 (Endurecido por deformación solamente) y T (tratado térmicamente) (Kaufman 2000). El tratamiento al que la aleación seleccionada para el trabajo fue sometida antes de su comercialización fue el H14 y nos indica que este material fue endurecido por deformación solamente (Laminado) y que el grado de dureza alcanzado por este es de nivel medio, sabiendo que 8 representa un máximo grado de dureza y 2 representa un mínimo grado de dureza.

1.9.1 Composición Química de la aleación de Aluminio ASTM A1200 - H14

La Serie 1XXX de las aleaciones de aluminio nos indica que el grado de pureza del material es del 99% en su composición, es decir, que el 1% restante lo conforman los elementos aleantes, es así que la composición química de la aleación A1200 – H14 se muestra en la tabla 1-1:

Tabla 1- 1: Composición química de la aleación de aluminio A1200 - H14

Elemento	Cantidad (%)
Silicio	0,57
Hierro	0,24
Cobre	0,03
Manganeso	0,025
Magnesio	0,01
Cromo	-
Zinc	0,047
Titanio	0,01

Fuente: (INEN 2017)

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

1.9.2 Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio A1200

Tabla 2-1: Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio A1200 – H14

Designación Aleación		Temple Designación	Espesor e	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de Fluencia (Mpa)	Alargamiento en 50 mm (%)
ISO	ASTM	ISO(ASTM)	(mm)	mínimo	mínimo	mínimo
Al 99,0	1200	M(H112)	$2,5 < e \leq 3$	75	25	18

Fuente: (INEN 2017)

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

1.10 Soldadura de Aluminio

El aluminio puro es el segundo metal de mayor abundancia en la superficie terrestre y se caracteriza por sus propiedades mecánicas muy convenientes y distinguidas como son: ser ligero, blando y dúctil, entre estas se destaca su baja resistencia mecánica (Jeffus 2009). Para poder incrementar esta propiedad se desarrollaron disoluciones con diferentes elementos de aleación

para así obtener el duraluminio, que hace referencia a diferentes aleaciones que experimentaron un envejecimiento a temperatura ambiente lo cual provoca un incremento considerable en su resistencia mecánica.

Actualmente el uso de las diferentes aleaciones de aluminio se ha incrementado y es utilizado en diferentes industrias como la aeronáutica, petroquímica, automotriz, entre otras. Las primeras aleaciones que empezaron a soldarse fueron las utilizadas en la industria aeronáutica empleando el método FSW (*Friction Stir Welding*) en los ejes de las turbinas, mientras que el proceso GTAW se utilizaba en componentes inoxidable (Meseguer-Valdenebro José et al. 2017).

1.10.1 Principales métodos de Soldeo por arco eléctrico para Aluminio

Los principales procesos de soldadura por arco eléctrico aplicables a aleaciones de aluminio son los procesos GTAW, GMAW y SMAW.

El proceso GTAW es el más utilizado en las aleaciones de aluminio, este procedimiento permite controlar la potencia que se aporta en el proceso manteniendo constante la intensidad de corriente con un voltaje variable. Frecuentemente se utiliza corriente pulsada de onda cuadrada a fin de poder eliminar con mayor facilidad la capa de alúmina que presenta el aluminio, sin embargo, esto requiere de un sistema de refrigeración en la boquilla de la pistola. (Li *et al.*, 2013b; Yang *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2013)

1.10.2 Características del Proceso GTAW aplicado a la unión de Aluminio

El proceso GTAW aplicado a la unión de materiales cuyo material base es aluminio o aluminio puro presenta ciertas características que deben ser tomadas en cuenta antes de realizar la unión de este material por dicho proceso. Se debe tomar en cuenta el material con el que se desea trabajar y de acuerdo a este se van a elegir los parámetros de soldadura adecuados como, por ejemplo: el equipo a utilizar (AC ó DC), el voltaje y la intensidad de corriente a utilizar, el espesor del material, el tipo de gas de protección, y el material de aporte. Se pueden evaluar muchas de las características de una unión soldada en un proceso de inspección algunas se relacionan con las dimensiones, otras se refieren a las discontinuidades presentes en el cordón de soldadura, de igual manera el tamaño de una junta es de gran importancia ya que este se relaciona directamente con la resistencia mecánica de la junta.

Existen diferentes razones por las cuales se deben realizar la inspección de una junta soldada, siendo la más importante verificar la calidad de dicha junta para su posterior aplicación. Los criterios para la aceptación de la calidad provienen de diferentes criterios, códigos y normas que han sido desarrollados basándose en la fabricación de juntas soldadas. Dentro de estos aspectos se encuentran métodos recomendados y estandarizados por la AWS que generalmente son los más utilizados, entre estos tenemos Inspección visual, ensayos de Tintas Penetrantes e Inspección visual. (Septiembre y Tig 2012)

1.10.3 Electrodo no consumibles para Soldadura GTAW

Inicialmente los electrodos fueron únicamente de Tungsteno, sin embargo, posteriormente se comprobó que al fusionar este metal con óxidos de torio o de zirconio la emisividad del electrodo se incrementaba favoreciendo así al flujo de electrones, el encendido, reencendido del arco y consecuentemente la estabilidad del proceso. La simbología de los electrodos de tungsteno se basa de acuerdo con su composición química y van de acuerdo con la normativa AWS-A5.12 correspondiente a los electrodos destinados para el proceso GTAW (American Welding Society 2009).

La única función que tiene el electrodo en este proceso es la de asilar el arco eléctrico y mantenerlo sin aportar material al baño de fusión, debido a esto se requiere que el electrodo posea una elevada temperatura de fusión, generalmente se emplean tres tipos diferentes de electrodos que cumplen con este requerimiento y se clasifican según su composición en:

- Tungsteno Puro

Este tipo de electrodo se utiliza principalmente con corriente alterna en el soldeo de aluminio, con el uso de este tipo de corriente la punta del electrodo permanece en buenas condiciones con una buena estabilidad.

- Tungsteno aleado con torio

Son utilizados con corriente continua para el soldeo de aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobre, titanio, etc. No se pueden utilizar con corriente alterna debido a lo complicado que se vuelve mantener estable la punta del electrodo.

- Tungsteno aleado con zirconio

Se pueden utilizar con ambos tipos de corriente, pero su uso es más común con corriente alterna debido a que combinan las características del Tungsteno y del Torio, se utilizan para soldar materiales ligeros como Aluminio y Magnesio.

Tabla 3-1: Clasificación de los Electrodo de Tungsteno

Clasificación de la AWS	Color Elemento	Elemento Aleado	Óxido amalgamante	% de Óxido
EWP	Verde	----	----	----
EWCe-2	Naranja	Cerio	CeO ₂	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La ₂ O ₃	1
EWLa-1.5	Dorado	Lantano	La ₂ O ₃	1,5
EWLa-2	Azul	Lantano	La ₂ O ₃	2
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO ₂	1
EWTh2	Rojo	Torio	ThO ₂	2
EWZr-1	Café	Zirconio	ZrO ₂	0,25
EWG	Gris	No Especificado	---	---

Fuente: (SOLDEXA 2017)

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Tabla 4-1: Clasificación de los electrodos de tungsteno para soldadura GTAW

Clasificación		Composición Oxido %	Color	Corriente	Para Soldar
WP	PURO		Verde	AC	Aluminio, Magnesio
WT 10	1% Torio	0,9...1,20 TO ₂	Amarillo	DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre
WT 20	2% Torio	1,80...2,20 TO ₂	Rojo	DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre
WT 30	3% Torio	2,80...3,2 TO ₂	Morado	DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre
WT 40	4% Torio	3,8...4,2 TO ₂	Naranja	DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre
WZ 8	0,8 % Zirconio	0,7...0,9 ZrO ₂	Blanco	AC	Aluminio, Magnesio
WL 10	1% Lantano	0,9...1,2 LaO ₂	Negro	AC/DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre, Aluminio
WL 20	2% Lantano	1,8...2,2 LaO ₂	Azul	AC/DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre, Aluminio
WC 20	2% Cerio	1,8...2,2 CeO ₂	Gris	AC/DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre, Aluminio
WS 2	Tierras Raras		Turquesa	AC/DC	Aceros, Niquel, Titanio, Cobre, Aluminio

Fuente: (American Welding Society 2009)

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

1.11 Inspección de soldadura según AWS

El proceso de inspección consiste en examinar, verificar e informar sobre un trabajo de soldadura en base a normas y códigos determinados por la AWS, estos criterios ayudan al proceso de evaluación del cordón de soldadura. En el proceso de inspección se relaciona la dimensión, el tamaño, las discontinuidades presentes en el cordón, se lo conoce así porque fija procedimientos con los que se podrán verificar la calidad del cordón, para esto se disponen de ensayos tanto destructivos y no destructivos entre estos métodos de inspección se destaca la Inspección Visual

del cordón de soldadura, tintas penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido. (American Welding Society 2014)

1.11.1 Ensayos No Destructivos

Se conoce como ensayo no destructivo a cualquier prueba realizada sobre un material sin que esta sufra una afectación permanente en sus propiedades ya que este tipo de ensayos afectan de manera imperceptible o nula sus propiedades y composición. Este tipo de pruebas se conocen comúnmente con las siglas END (Ensayos No Destructivos). Estos ensayos proporcionan información de la o las variables a ser evaluadas con la aplicación de ensayos destructivos, sin embargo, debido a su bajo costo, facilidad de aplicación y al no requerir que la pieza a analizar sea destruida son una opción muy eficaz para analizar la homogeneidad y continuidad de un material. La clasificación de estas pruebas depende del lugar en donde se van a analizar las discontinuidades en el material y se clasifican en:

- Inspección Visual
- Líquidos Penetrantes
- Partículas Magnéticas

Ensayo de Inspección Visual

La inspección visual es una cadena de operaciones realizadas a lo largo de un proceso de producción cuyo fin es asegurar la continuidad y la calidad de las uniones soldadas, para esto la AWS ha designado la norma D1.2 como el reglamento que se debe seguir al momento de analizar juntas soldadas, en esta norma se destacan diferentes parámetros que deben ser analizados por el inspector, los rangos permisibles de discontinuidades y el procedimiento que se ha de seguir para la evaluación de la pieza desde la recepción del material hasta que se completa el informe de inspección en donde se entregan los resultados obtenidos posteriores al análisis realizado. (American Welding Society) Las ventajas y desventajas de este método de inspección son las siguientes:

Tabla 5-1: Ventajas y Desventajas de la Inspección Visual

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil aplicación • Se lo puede aplicar en áreas donde otros métodos son impracticables 	<ul style="list-style-type: none"> • La fiabilidad de los resultados depende de la experiencia del inspector • Requiere accesibilidad para la visibilidad directa de la zona.

Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2019

Ensayo de Líquidos Penetrantes



Figura 8-1: Ensayo de Líquidos Penetrantes en cordones de Soldadura

Fuente: (Técnica Test 2019)

Este tipo de ensayos requieren la aplicación de un líquido sobre la superficie del elemento o pieza a analizar, este penetra por capilaridad en las imperfecciones del cordón de soldadura, este procedimiento se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM E165 la que abarca los procedimientos para la examinación de materiales para constatar así la presencia de discontinuidades que se presentan en las superficies como grietas, vetas, tumultos, goteos directos o falta de fusión.

En este ensayo se utiliza un líquido penetrante que puede ser un material visible o un material fluorescente que se aplica de manera uniforme en la superficie el elemento a analizar, este líquido entra en las discontinuidades que pudieran existir en el material y una vez que se remueva el exceso de este líquido en la superficie a analizar se aplica un líquido revelador que volverá evidente el líquido que se encuentre acumulado en las grietas existentes en el cordón de soldadura. El procedimiento, parámetros y consideraciones a realizarse se demuestra en el siguiente diagrama (ANÓN. 2011).

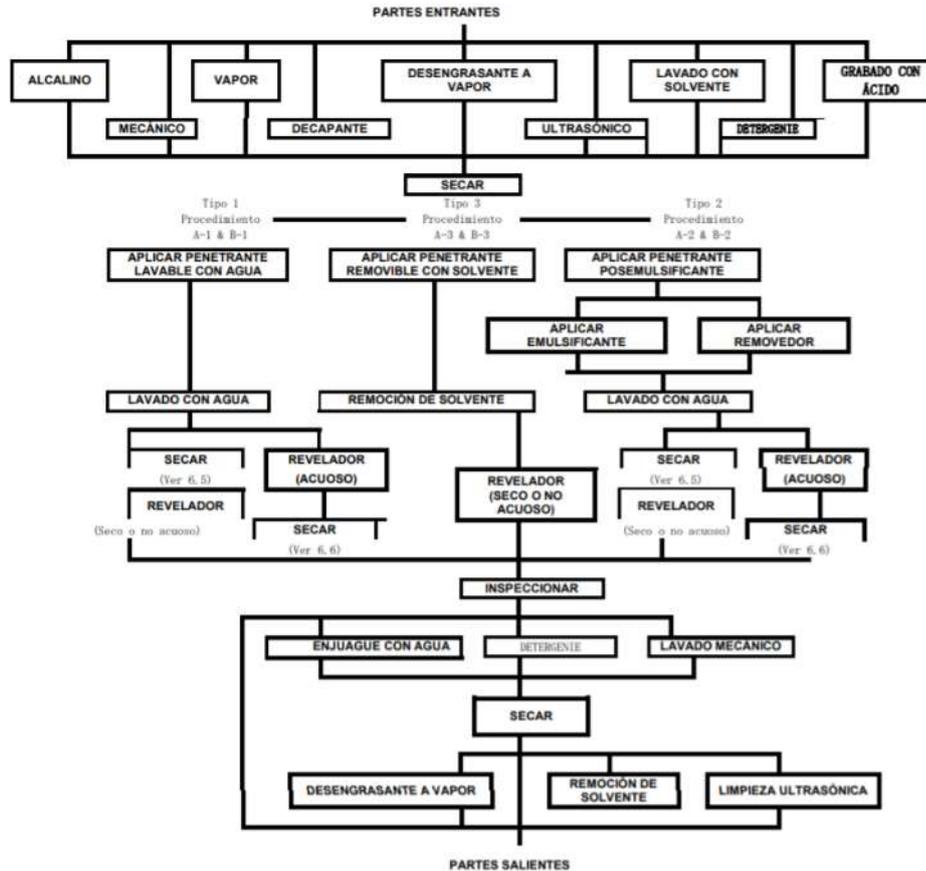


Gráfico 2-1: Procedimiento para realizar el análisis con Líquidos Penetrantes

Fuente: (INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE 2017)

1.11.2 Ensayos Destructivos o Ensayos Mecánicos

Un ensayo destructivo es todo aquel que produce un daño permanente a la pieza sometida al ensayo y que trata de averiguar el comportamiento que tendrá el material frente a requerimientos mecánicos (propiedades mecánicas) como son la dureza, esfuerzos de tracción, compresión, etc. Dentro de estos ensayos se encuentran los más conocidos como ensayos mecánicos, dentro de estos, los que contempla la norma INEN 2250 son: Ensayo de Tracción, Ensayo de Impacto, además de estos también están los ensayos de dureza que complementan la información requerida acerca de las propiedades del material de aluminio.

Estos ensayos han de entregar información valiosa sobre la resistencia, tenacidad, ductilidad, tenacidad, dureza, etc. Que en conjunto con el análisis del comportamiento mecánico son de suma importancia en situaciones de diseño de cualquier elemento, máquina o estructura. Por medio de estos análisis podremos comparar los resultados obtenidos en el material después de ser sometido

al proceso de soldeo. Cada ensayo está normalizado de acuerdo con una norma específica la cual nos entrega las pautas y el procedimiento a seguir para su correcta realización.

1.11.2.1 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es de tipo estático y consiste en aplicar a una probeta una fuerza con dirección axial, generando un esfuerzo de tracción que producirá la fractura del material a fin de determinar sus características mecánicas, principalmente su esfuerzo máximo de fluencia y así establecer cuando el material deja de ser elástico y pasa a tener un comportamiento de tipo plástico. Con esta información podremos construir la curva esfuerzo – deformación la misma que es de gran importancia en el análisis de materiales para ingeniería.

Este ensayo se lo realiza en una máquina universal, y a nivel nacional la norma respectiva es la NTE INEN 109:2009, para el presente trabajo se consideró utilizar la norma ASTM E8 debido a que la INEN basa su normativa en la ASTM en la cual se especifica el método para aplicar el ensayo de tracción a productos de acero con sección transversal constante, las dimensiones de las probetas según su espesor y la característica principal a analizar será el tipo de fractura que sufrió el material al pasar de la zona elástica a la zona plástica. Las probetas que se van a utilizar serán construidas de acuerdo con la normativa vigente en cada país, las principales propiedades a obtener con este ensayo serán:

- El esfuerzo de Cedencia
- Esfuerzo a Tensión
- Módulo Elástico
- Porcentaje de Elongación
- Porcentaje de reducción de área

Para calcular el esfuerzo a tracción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 1- 1: Ecuación para calcular el Esfuerzo a Tracción

Fuente: (Budynas y Nisbett 2012)

1.11.2.2 Ensayo de Dureza

Este ensayo también es del tipo estático y consiste en determinar la capacidad que tiene un material metálico para evitar que este sea penetrado por una pieza de un material distinto, existen diferentes métodos para medir la dureza, sin embargo, el más utilizado por su facilidad de ser aplicado es el método Brinell, este método consiste en usar como indentador una esfera de acero templado con una elevada dureza con un diámetro que va desde el 1 mm hasta los 10 mm al que se le aplica una carga de 3000 kgf por un tiempo aproximado de 15 segundos (INEN 1977).

1.11.2.3 Ensayo de Micro dureza Vickers

Este ensayo destructivo enfoca su estudio en la relación carga/área, este proceso es similar a los procesos con los cuales se calculan otros tipos de dureza, con la diferencia de que el tamaño de la herramienta con la que se marca la huella sobre el material a ensayar es muy pequeño. En este ensayo el material penetrador tiene la forma de una pirámide regular de cuatro caras las cuales forman un ángulo de 136° , para poder determinar cuál es el valor de la longitud de las diagonales es necesario realizar la medición de estas debido a que las características propias del material provocan que la huella se distorsione levemente, entonces se medirán sus diagonales y se procederá con el cálculo para encontrar la dureza del material ensayado, para esto se hará uso de la siguiente ecuación:

$$HV = \frac{\text{Carga de Ensayo (kgf)}}{\text{Superficie de indentación (mm}^2\text{)}}$$

$$HV = \frac{2F \sin(\theta/2)}{d^2} \times 1000$$

$$HV = \frac{1854F}{d^2}$$

Ecuación 2-1: Ecuación para determinar micro dureza Vickers

Fuente: (Arroyave 1985)

Dónde:

HV es la dureza Vickers calculada

F es la carga de ensayo aplicada [gf]

d es la media aritmética de las dos diagonales medidas [μm]

θ es el ángulo entre las caras opuestas al vértice del indentador en forma de pirámide (136°)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Estudio de los parámetros de soldadura del proceso GTAW

Para el estudio de los parámetros de soldadura se ha seleccionado realizar un análisis bibliográfico de cada una de las posibles variaciones que se pueden dar en los parámetros de soldadura, por lo que es necesario la revisión de varias fuentes bibliográficas en donde se estudió el efecto que tiene un proceso de soldadura sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de materiales compuestos por aluminio o aleaciones de aluminio. Estas variables serán relacionadas por medio de ensayos repetitivos en donde se irá variando de manera ordenada parámetros de soldadura como voltaje, intensidad de corriente, flujo de gas de protección y temperatura de precalentamiento. Al realizar este procedimiento se podrá conocer de mejor manera cual es el comportamiento de la aleación de aluminio A1200 frente a este proceso.

El análisis de que sucede con las propiedades antes mencionadas después de aplicar un proceso de unión a juntas de aluminio es de vital importancia debido a que a nivel industrial este material se relaciona directamente con dichas propiedades y sus posibles aplicaciones y usos van de la mano de todos los beneficios que se puedan obtener de este análisis. El procedimiento para este estudio inicia con de la selección de diferentes fuentes bibliográficas o manuales de soldadura GTAW que entreguen datos iniciales para comenzar con pruebas en donde se podrán determinar y validar la información obtenida, para que así se pueda descartar toda la información que no sea relevante en la investigación.

Con el estudio realizado se podrán realizar pruebas que posteriormente serán validadas mediante ensayos destructivos y no destructivos para los diferentes materiales resultantes, logrando así verificar los beneficios que resultan de aplicar este proceso de unión para materiales de Aluminio. Además, se podrán analizar los resultados obtenidos, verificar e interpretar cual fue el comportamiento del material frente al proceso de unión por soldadura, la variación que tuvo a nivel microestructural y la manera en que el proceso afectó la dureza, la resistencia a la tracción del material base.

2.2 Definición de los parámetros del proceso de soldadura GTAW a controlar

Para lograr los objetivos deseados en esta investigación el primer punto a estudiar son las variables o parámetros de soldadura que están involucrados en el proceso de soldadura GTAW. Gracias a la investigación bibliográfica realizada se logró determinar con certeza que estos parámetros son los siguientes:

Voltaje

Por medio de la investigación correspondiente se logró determinar que el voltaje debe ser uno de los principales parámetros a controlar dentro del proceso de soldadura GTAW, debido al amplio rango de variación con el que se puede trabajar dentro de este proceso el voltaje requiere gran cuidado al momento de elegir el rango concreto con el cual trabajar, además, se debe aclarar que un incremento en el voltaje provocará un incremento en la potencia requerida por el equipo a utilizar, por lo que el equipo seleccionado debe ser capaz de regular y controlar este parámetro para que el proceso sea lo más estable posible.

Intensidad de corriente

La intensidad de corriente es otro de los parámetros que determinan los resultados obtenidos del proceso GTAW, debido a que de éste depende tanto el material a utilizar como también el rango de variación de este, es decir, el espesor y tipo del material a unir por medio de este proceso determina el rango de variación para este parámetro, es así, que al aumentar el espesor del material se requiere una intensidad de corriente mucho más alta que para materiales con un menor espesor.

Flujo de Gas de Protección

Debido a la naturaleza del proceso de soldadura GTAW y, al ser este un proceso que trabaja con una atmósfera de protección la cual utiliza un gas inerte, se requiere conocer con una gran exactitud cuales son los diferentes tipos de gases que pueden realizar esta función y cuál es la relación que cada uno de estos tiene con el efecto en el material después de aplicar el proceso de soldadura. Gracias a la revisión bibliográfica se llegó a determinar que los gases recomendados para la protección del cordón de soldadura en el proceso GTAW son: Argón, Helio, Argón – Helio o Argón – Hidrógeno.

Temperatura de Pre calentamiento

Con el estudio realizado se logró determinar que el realizar un pre calentamiento de la pieza a unir mediante un proceso de soldadura se beneficia a la formación del cordón de soldadura, la correcta circulación de los electrones y una adecuada combinación entre el material base y el material de

aporte, además este precalentamiento beneficia al encendido y reencendido del arco, evitando así la aparición de discontinuidades en el cordón de soldadura producto del encendido del arco.

Con el correcto análisis, selección y combinación de cada uno de los parámetros anteriormente mencionados serán obtenidas las juntas soldadas de aluminio a ensayar para verificar cual fue la influencia del proceso de soldadura en el material resultante.

2.2.1 Estudio y Definición del Equipo de Soldadura a utilizar

La relación de los parámetros de soldadura se logrará con la selección y uso correctos de un equipo de soldadura adecuado, para esto además de poder definir los rangos de variación de los parámetros de se tendrá que determinar cuál es el equipo a utilizar en el proceso, consecuentemente al análisis bibliográfico de diferentes fuentes de información como: ensayos científicos, publicaciones de revistas especializadas en materiales, proyectos técnicos de investigación se determinó que el equipo a utilizar debe ser el siguiente:

- a) Máquina soldadora con arco y cables

El equipo necesario para poder realizar el proceso de soldadura GTAW aplicado a la unión de juntas de aluminio se lo debe seleccionar de acuerdo con las necesidades del proceso estudiadas en el Capítulo I, es por eso que de acuerdo con la documentación se ha logrado determinar que el equipo necesario debe cumplir con las siguientes características:

- Contar con un Control de Voltaje
- Trabajar con Corriente alterna de Alta Frecuencia
- Permitir modificar el Tipo de Conexión

Debido a las características del proceso GTAW el equipo debe contar con un sistema que controle y regule los niveles de voltaje y los mantenga constantes durante el proceso, para poder conseguir cordones de soldadura más duraderos, con un mejor aspecto visual y sin la presencia de imperfecciones o fallas. Dentro de la documentación revisada los manuales de soldadura GTAW requieren que se trabaje con corriente alterna de alta frecuencia, este es uno de los requerimientos indispensables del proceso. Debido a ensayos realizados se determinó que al utilizar corriente continua con una conexión de electrodo inverso el proceso se lo puede realizar, sin embargo, las características del cordón de soldadura resultante son muy malas y la penetración de este sobre el material base no se da de manera constante. Debido a este análisis se determinó que el material elegido para la realización debe tener dichas características.



Figura 1-2: Equipo Básico para proceso GTAW

Fuente: (The Lincoln Electric 2019)

- b) Suministro de gas de aislamiento que conste de: mangueras, reguladores, conectores

Cuando hablamos respecto al gas de protección para el proceso GTAW debemos considerar tres opciones diferentes, estas son las analizadas en 2.1, debido a la facilidad que representa la adquisición y el uso del Argón como gas agente encargado de la protección del cordón de soldadura.



Figura 2-2: Suministro de Gas inerte Argón para proceso GTAW

Fuente: (INDURA)

En caso de que el soplete lo requiera se debe tener disponible un suministro de agua.

Electrodos no consumibles de Tungsteno

Los electrodos utilizados en el proceso GTAW son no consumibles, siempre y cuando el proceso sea realizado correctamente debido a que estos no se derriten ni transmiten la soldadura, su función es ser una de las terminales eléctricas que generarán el arco necesario para el proceso. Debido a que la temperatura de fusión del tungsteno está alrededor de los 3410°C al llegar a este punto es una fuente abundante de electrones, para su selección se consideran cinco factores fundamentales: forma, tamaño, composición, mandriles y boquillas. Los electrodos utilizados en el proceso GTAW están bajo la norma AWS A5.12, son fabricados con tungsteno o aleaciones de este, volviéndolo un electrodo no consumible debido a su alto punto de fusión, en conjunto con bajos porcentajes de torio se obtiene una mejor estabilidad en el arco y una mayor capacidad de corriente. Se los identifica según el color en su extremo y los diámetros más utilizados son de 1.6 mm, 2.4 mm y 3.2 mm (American Welding Society 2009).

Tabla 1- 2: Tipos y Clasificación de Electroodos

Tipos de Electroodos	Identificación	AWS
Tungsteno Puro	Punto Verde	EWP
Tungsteno – Torio (1% Th)	Punto amarillo	EWTh-1
Tungsteno – Torio (2% Th)	Punto rojo	EWTh-2
Tungsteno – Zirconio	Punto café	EWZr

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

- c) Un soplete o antorcha GTAW en el que se han de conectar todos los dispositivos anteriores

Esta antorcha debe ser capaz de albergar cada uno de los elementos mencionados con anterioridad para su correcta combinación.



Figura 3-2: Soplete para soldadura GTAW

Fuente: (Linde Ecuador)

Adicionalmente el soplete puede constar de un interruptor que controle todos los sistemas que se encuentren conectados al soplete que ayudará a controlar completamente el proceso en caso de emergencia.

2.2.2. Energía eléctrica utilizada

La energía eléctrica utilizada en este proceso es de gran importancia y depende del material que se desee soldar, en el caso de aceros al carbono y aceros inoxidable se recomienda utilizar corriente continua (DC), al trabajar con materiales metálicos como aluminio o titanio es recomendable utilizar corriente alterna (AC) (GUTIÉRREZ y ORTEGA 2017), estas a su vez pueden trabajar ya sea con polaridad directa o con polaridad inversa. Esto a su vez hace que el proceso se desarrolle de manera diferente, aumentando o disminuyendo el calor generado, el voltaje y/o amperaje utilizados en el proceso.

Si el electrodo está siendo utilizado con polaridad negativa y la pieza con polaridad positiva o directa los electrones parten del electrodo hacia el metal base lo que provoca una reducción de la energía total que se ve reflejada en el calor generado en el metal base, la penetración del material tiene la siguiente configuración:



Figura 4-2: Penetración con corriente continua y polaridad inversa

Fuente: (SOLDEXA 2017)

Si el electrodo es utilizado con polaridad positiva y la pieza con negativa se conoce como polaridad inversa, en este caso la distribución del calor generado por el arco eléctrico es

aproximadamente de un 66% en el electrodo y el 34% en el material base. En este caso se requiere un electrodo mucho mayor que el utilizado en el proceso con polaridad directa entonces la penetración de la soldadura en el material base tendrá la siguiente configuración:

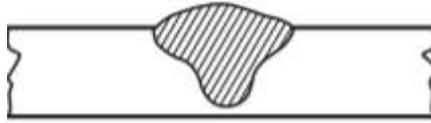


Figura 5-2: Penetración de la soldadura con polaridad directa

Fuente: (SOLDEXA 2017)

2.2.3 Equipo de Control de Velocidad para antorcha GTAW

El equipo mencionado en 2.2.2 se utiliza generalmente para la aplicación manual de este proceso de soldadura, y debido a que el trabajo de investigación requiere controlar la velocidad de avance de la antorcha GTAW se debe optar por el uso de un equipo que realice esta función, para lo cual se utilizó el equipo desarrollado en el proyecto de titulación de la Escuela de Ingeniería Mecánica denominado “*Relación, Microestructura/Propiedad en la Soldadura Gtaw entre Aceros Inoxidables y Aceros al Carbono*” (Villavicencio Cevallos 2010) que nos ayuda a controlar la velocidad de avance de la antorcha, este equipo consta de dos partes que deben ser calibradas de manera que el funcionamiento sea el adecuado, es así que encontramos un dispositivo electrónico que es el encargado de combinar y coordinar el movimiento de diferentes motores y servo motores que en conjunto regulan la velocidad de avance y retorno del equipo de control de velocidad a su posición original.

El control de velocidad en un proceso de soldadura influye en la integridad del cordón obtenido en el proceso, debido a que al realizar procesos similares de manera manual se pueden tener diferentes inconvenientes al realizar el cordón de soldadura, esto depende en mayor parte depende de la experiencia de la persona encargada de realizar el proceso de manera manual

2.2.3.1 Clasificación de los electrodos de Tungsteno

Según la norma AWS A5.12 los electrodos de tungsteno se clasifican en base a su composición química, para su mayor distinción la AWS también hace uso de un sistema de colores que ayuda a la clasificación de los electrodos según el componente químico con el cual están fabricados, cada electrodo requiere de una composición química diferente, esta composición y escala de colores se encuentran en el siguiente gráfico:

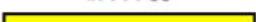
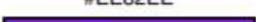
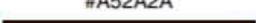
Classification symbol (ISO 6848 Classification)	Chemical composition requirements			Tungsten, mass percent	Colour code, RGB colour value and colour sample ^a
	Oxide addition Principal oxide	Mass percent	Impurities, mass percent		
EWP (WP)	None	N.A. ^b	0.5 max.	99.5 min.	Green #008000 
EWCe-2 (WCe 20)	CeO ₂	1.8 to 2.2	0.5 max.	Balance	Grey (formerly orange) #808080 
EWLa-1 (WLa 10)	La ₂ O ₂	0.8 to 1.2	0.5 max.	Balance	Black #000000 
EWLa-1.5 (WLa 15)	La ₂ O ₂	1.3 to 1.7	0.5 max.	Balance	Gold #FFD700 
EWLa-2 (WLa 20)	La ₂ O ₂	1.8 to 2.2	0.5 max.	Balance	Blue #0000FF 
EWTh-1 (WTh 10)	ThO ₂	0.8 to 1.2	0.5 max.	Balance	Yellow #FFFF00 
EWTh-2 (WTh 20)	ThO ₂	1.7 to 2.2	0.5 max.	Balance	Red #FF0000 
(WTh 30)	ThO ₂	2.8 to 3.2	0.5 max.	Balance	Violet #EE82EE 
EWZr-1 (WZr 3)	ZrO ₂	0.15 to 0.50	0.5 max.	Balance	Brown #A52A2A 
EWZr-8 (WZr 8)	ZrO ₂	0.7 to 0.9	0.5 max.	Balance	White #FFFFFF 
EWG	<i>The manufacturer must identify all additions.</i>	<i>The manufacturer must state the nominal quantity of each addition.</i>	0.5 max.	Balance	<i>The manufacturer may select any color not already in use.</i>

Gráfico 1-2: Composición química requerida para los electrodos de Tungsteno

Fuente: (American Welding Society 2009)

Según la norma AWS A5.12 los electrodos de Tungsteno tienen la siguiente denominación:

Electrodo Tipo: EWXN, dónde:

E es electrodo de tipo no consumible

W es Tungsteno (Wolframio)

X es Elemento de aleación

N es Composición del elemento aleación

Tabla 2- 2: Tipos de electrodos de Tungsteno para proceso GTAW

Tipos de Electroodos	Identificación	AWS
Tungsteno Puro	Punto Verde	EWP
Tungsteno – Torio (1% Th)	Punto amarillo	EWTh-1
Tungsteno – Torio (2% Th)	Punto rojo	EWTh-2
Tungsteno – Zirconio	Punto café	EWZr

Fuente: (American Welding Society 2009)

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

2.2.4 Gas de Protección

La optimización del proceso depende entonces de parámetros sumamente importantes como es el flujo de gas de protección, es por eso por lo que se la conductividad térmica de los gases de protección afecta de manera importante al cordón de soldadura y a la velocidad de soldeo, entonces es posible regular la velocidad de soldeo mediante la adición de gas protector. En el proceso GTAW la protección del baño de fusión, así como también del electrodo se consigue mediante la adición de gases inertes como el Argón, Helio o combinaciones de estos, el uso de diferentes gases de protección en el proceso tiene una gran incidencia en el arco eléctrico producido.



Figura 6-2: Arco eléctrico proceso GTAW gas de protección Argón

Diseñado por Freepik.es

Fuente: https://www.freepik.es/fotos-premium/soldadura-inoxidable-proceso-gtaw_2155105.htm#query=GTAW%20welding&position=0



Figura 7-2: Arco eléctrico proceso GTAW gas de protección Argón
Diseñado por Freepik.es

Fuente: https://www.freepik.es/fotos-premium/soldadura-inoxidable-proceso-gtaw_2155104.htm#query=GTAW%20welding&position=4

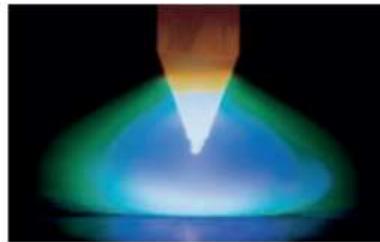


Figura 8-2: Arco eléctrico proceso GTAW gas de protección Helio

Fuente: Suministros industriales del Tajo S.A.

2.2.5 El Proceso GTAW Aplicado a la Unión de Aluminio

El aluminio es un metal muy ligero, tiene una buena ductilidad, conductividad eléctrica y térmica, es fácil de fabricar y mecanizar, debido a su alta conductividad térmica en comparación con el acero, este necesita una gran cantidad de calor para su fusión en el proceso de soldeo, es así como los materiales con un espesor considerable requieren del precalentamiento de la pieza a soldar. La elevada densidad de corriente eléctrica producida hace posible soldar a mayores velocidades y obtener una mayor penetración que otros tipos de soldadura con electrodos revestidos. Procesos de soldadura. (2002).

Las principales variables que se deben considerar en el proceso GTAW para la unión de elementos o piezas de aluminio son:

- Intensidad de Corriente eléctrica

La intensidad de corriente en este proceso depende directamente del diámetro del electrodo a utilizar, es decir, mientras más grande sea el electrodo el proceso requerirá una mayor intensidad de corriente. En la tabla 2.2 se puede apreciar el nivel de amperaje recomendado para el procedimiento de soldadura en función al diámetro del electrodo.

Tabla 3- 2: Intensidad de Corriente en función del diámetro de electrodo

CA-AF Argón amperaje	Diámetro del electrodo mm
20 a 70	1,01
50 a 125	1,58
100 a 160	2,38
150 a 160	3,17

Fuente: *Procesos de soldadura*, Instituto Politécnico Nacional, 2002.

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

- Tipo de Corriente

EL tipo de corriente utilizada en el proceso puede ser de tres tipos: corriente alterna, corriente directa de polaridad y corriente directa con polaridad inversa.

Corriente continua y polaridad inversa: La circulación de electrones se produce desde la pieza de trabajo hacia el electrodo (positivo al electrodo), originando un fuerte calentamiento en este último. Este calentamiento tiende a fundir el extremo del electrodo provocando contaminación al cordón de soldadura. Para evitar esto la polaridad inversa requiere del empleo de electrodos de mayor diámetro que los empleados en polaridad directa, a la misma intensidad. Con electrodos adecuados la polaridad inversa origina sobre la superficie del metal base un efecto de limpieza. La polaridad también afecta la forma del cordón. La polaridad inversa produce cordones anchos y de poca penetración. Es por eso por lo que este tipo de corriente no se utiliza en el proceso GTAW debido a las características que presenta el cordón de soldadura.

Corriente continua y polaridad directa: Es la que permite obtener mejores resultados. Se obtiene al conectar el electrodo al polo negativo de la máquina, pasando los electrones a través del arco hacia el metal base y originando que se acumule un 70% del calor del arco en el metal base para ayudar a la fusión y a la penetración. Sin embargo, no se consigue levantar el óxido, dando como resultado un arco errático. Puesto que la mayor concentración de calor se consigue en la pieza, la soldadura es más rápida y hay menos deformación del metal base y el baño de fusión es más estrecho y profundo que cuando se usa polaridad invertida. Además, como la mayor parte del calor se genera en el baño de fusión, pueden emplearse electrodos de menor diámetro.

Para la selección adecuada de la corriente a utilizar en el proceso nos podemos ayudar del siguiente gráfico:

<i>Metal a soldar</i>	<i>CA Alta frecuencia</i>	<i>CC-PD</i>	<i>CCPI</i>
Acero suave (3-7 mm)	R	E	N
Acero suave (7-3 mm)	N	E	N
Acero duro (3-7 mm)	R	E	N
Acero inoxidable (1.5 mm máx.)	E	R	N
Acero inoxidable 1.5 mm	R	E	N
Aluminio hasta 2 mm	E	N	R
Aluminio más de 2 mm	E	N	N
Cobre	N	E	N
Hierro colado	R	E	N
Latón	R	E	N
Magnesio hasta 3 mm	E	N	R
Magnesio mas de 3 mm	E	N	N

E: Excelentes resultados, R: Regulares resultados, N: No recomendable

Gráfico 2-2. Tipo de corriente recomendada según material a soldar en GTAW

Fuente: (Arriaga Segundo et al. 2008)

- Preparación del metal Base y Material de Aporte

Materiales con espesores superiores a 20 mm no son recomendables para la aplicación de este proceso ya que la operación resultaría muy lenta y costosa, es por eso que este proceso es el adecuado para trabajar con materiales de espesores menores a 12 mm. Generalmente, en este proceso no se requiere el uso de un material de aporte, sin embargo, para el relleno de la junta esto se vuelve necesario, por lo que el material de aporte debe ser de la misma composición del metal base. Para el proceso GTAW se pueden utilizar varillas específicas para este proceso.

- Gas de Protección

El gas utilizado en este proceso produce una atmósfera libre de cualquier agente contaminante y a su vez proporciona una vía para la formación del arco eléctrico, el gas en conjunto con el tipo de corriente ayuda a mantener la limpieza sobre el material base para este proceso en general se emplean como gas protector: argón, helio, hidrógeno y CO₂. Entre todos estos el gas con mayor preferencia es el Argón por formar un arco más estable y ser más económico frente a los otros gases. El Helio es el segundo gas de importancia para la protección del arco en el proceso GTAW debido a que su costo es más elevado que el Argón, además también se puede seleccionar el gas a utilizar en función del material a soldar y el espesor de este.

Tabla 4- 2: Sugerencia de Gas y corriente para diferentes materiales y espesores

Metal	Espesor	Gas y tipo de corriente
Aluminio	Menos de 1/8"	Ar (ca-af)
Aluminio	Más de 1/8"	Ar (ca-af)
Acero	Menos de 1/8"	Ar(cd-pd)
Acero	Más de 1/8"	Ar(cd-pd)
Cobre	Menos de 1/8"	Ar-He(cd-pd)(He-75%)
Cobre	Más de 1/8"	He(cd-pd)
Acero Inoxidable	Menos de 1/8"	Ar(cd-pd)
Acero Inoxidable	Más de 1/8"	Ar-He(cd-pd)(He-75%)
Niquel	Menos de 1/8"	Ar(cd-pd)
Niquel	Más de 1/8"	Ar-He(cd-pd)(He-75%)

Fuente: (Arriaga Segundo et al. 2008)

Realizado por: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

- Diámetro de la boquilla

El diámetro de la boquilla tiene que estar de acuerdo con varios parámetros, tener suficiente diámetro para dar protección al ancho del cordón, debe estar de acuerdo con el electrodo considerado que según el electrodo de tungsteno tendremos un rango de corrientes y por tanto un ancho de cordón (Marcos 2017).

- Caudal de Gas

El caudal requerido de gas de protección depende de la configuración y del diámetro de la tobera de la antorcha, del baño de fusión y además del movimiento e intensidad del aire circundante en la zona. Los rangos aconsejables del caudal de Gas son:

Argón 7 a 16 *L/min*

Helio 14 a 24 *L/min*

Fuente: Cueto, Martos, José. Soldadura TIG de aluminio y aleaciones

- Varilla de alambre para Proceso GTAW

Para seleccionar el tipo de electrodo a utilizar se siguieron las recomendaciones de Linde Ecuador este alambre está diseñado para poder cumplir con los requisitos de las aleaciones de aluminio soldadas por procesos con gas inerte *GTAW*, este alambre se caracteriza por una alta calidad formada en los cordones de soldadura, es de uso continuo y principalmente se trabaja con argón y helio, la alta conductividad térmica de este material hace recomendable el precalentamiento de la pieza a soldar. Las propiedades de este electrodo se muestran a continuación:

Composición química (típica) del alambre: (valores individuales son maximos salvo indicación contraria)			
Mn 0,05-0,20%; Si 0,25%; Cr 0,05-0,20%; Ti 0,06-0,20%; Mg 4,5-5,5%; Zn 0,10%; Fe 0,40%; Al balance			
Amperajes recomendados:			
Diámetro mm	Amperaje		Voltaje, volts
	mín.	máx.	
1,2	100	250	18-23

Gráfico 3- 2: Composición y parámetros recomendados del electrodo Er 5356

Fuente: (Linde Ecuador), (“INDURA Ecuador”)

2.2.6 Datos preliminares del proceso GTAW para soldadura de Aluminio

La bibliografía revisada en el marco teórico conceptual nos ha entregado diferentes parámetros que pueden ser utilizados para realizar este tipo de soldadura, adicionalmente estos serán combinados con una velocidad movimiento de antorcha y electrodo determinada por el equipo mecánico/electrónico utilizado en (Villavicencio Cevallos 2010).

Una vez realizadas las pruebas preliminares correspondientes al equipo se pudo verificar que estaba en correcto funcionamiento y por lo tanto se pudo comenzar con la recopilación de los datos a utilizar en el proceso. Estos datos fueron los siguientes:

Tabla 5- 2: Parámetros Iniciales de Soldadura Recopilados

Datos para regular en el proceso de soldadura		
Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Flujo de Gas (L/min)
12 - 17	95 - 200	10 – 16

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

PRUEBAS DE SOLDADURA REALIZADAS SOBRE JUNTAS DE ALUMINIO A1200 – H14

3.1 Calibración y Montaje del Equipo de Control de Velocidad

El equipo de control de velocidad utilizado en este proyecto de titulación fue el utilizado en el trabajo de titulación denominado “*Relación, Microestructura/Propiedad en la Soldadura Gtaw entre Aceros Inoxidables y Aceros al Carbono*” (Villavicencio Cevallos 2010), gracias al uso de este dispositivo electrónico se puede realizar el control de velocidad para la antorcha GTAW, para esto, el equipo de control de velocidad tuvo que ser sometido a pruebas que verifiquen su estado de funcionamiento, debido al periodo de tiempo que estuvo fuera de uso, fue necesario realizar diferentes tipos de mantenimiento tanto al equipo mecánico como al equipo electrónico, es decir, fue necesario aplicar métodos de mantenimiento correctivo y preventivo para poder corregir las fallas existentes en el equipo, así como también prevenir daños futuros al momento de trabajar con él.



Figura 1-3: Pruebas y calibración del equipo de control de velocidad

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

3.2 Montaje del Equipo de Control de Velocidad

Una vez verificado el correcto funcionamiento del equipo de control de velocidad, se debía continuar con el montaje de la antorcha en este, además, fue necesario ubicar una base de soporte para las placas a soldar, el montaje del equipo es muy sencillo, basta con ubicar la antorcha en el soporte lateral ubicado junto al tornillo sin fin como se muestra en la figura 2-3.



Figura 2-3: Antorcha GTAW montada en el equipo de control de velocidad de avance

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

3.3 Calibración del Equipo de Soldadura y Pruebas Iniciales

Las pruebas iniciales para este proyecto son de vital importancia debido a que la realización de este se basa en un método de ensayo error, para así poder encontrar los mejores parámetros de soldadura para el material utilizado en base a los iniciales determinados en el capítulo II, por lo que antes de realizar la soldadura se efectuaron pruebas de funcionamiento, tanto para el gas de protección utilizado, el medidor de flujo de gas, el estado del electrodo ubicado en la antorcha y el material de aporte utilizado.

El equipo utilizado fue el Syncrowave 180SD GTAW, equipo de suma importancia ya que para que el aluminio pueda ser soldado por este proceso se requiere un equipo de alta frecuencia como el utilizado, en este se puede controlar tanto el voltaje como la intensidad de corriente a utilizar en el proceso mediante el panel electrónico del que consta este, esto se lo puede ver de mejor manera en la figura 3-3.



Figura 3-3: Equipo de alta frecuencia para soldadura GTAW

Fuente: (Miller Electric Mfg 2019)

3.3.1 Ensayos de Soldadura en Juntas de Aluminio

Las pruebas para este procedimiento fueron realizadas con juntas de aluminio con un espesor de 3 mm, para realizar la soldadura sobre las placas se tomó como decisión inicial en base a las recomendaciones de la bibliografía revisada realizar un precalentamiento a las juntas para que el proceso sea mucho más eficiente.

En primer lugar, es necesario realizar una limpieza del material, para esto debemos utilizar un paño limpio libre de cualquier impureza y humedecerlo con thinner acrílico, con el paño proceder a retirar la cubierta de la lámina de aluminio y limpiar su superficie hasta retirar toda la grasa y residuos de los elementos utilizados para adherir el recubrimiento de protección al aluminio, este procedimiento se muestra en la figura 4-3.

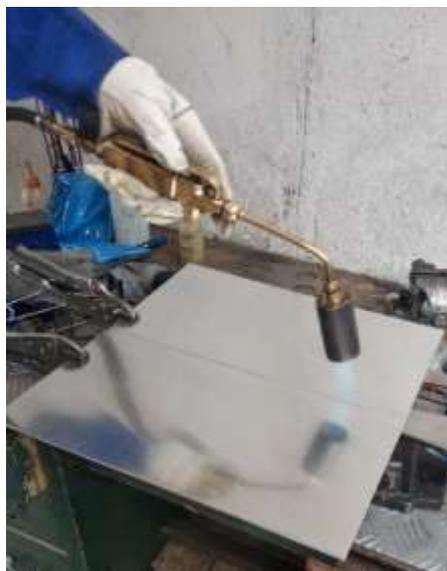


Figura 4-3: Limpieza y Precalentamiento de las juntas de aluminio

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Una vez limpias las juntas se las montó y aseguró sobre la base para poder ser soldadas sin que estas sufran de algún deslizamiento o movimiento que perjudique al trabajo realizado, las juntas a realizarse son tipo sin bisel, el cordón tiene una sola pasada y la soldadura será realizada a tope como lo muestra la figura 5.3.

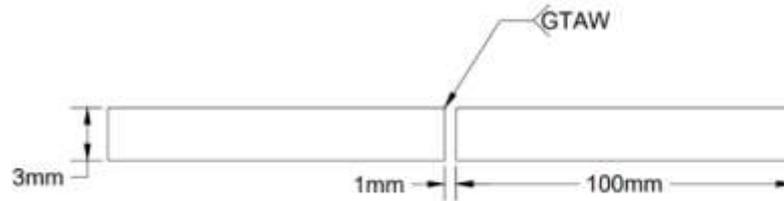


Figura 5-3: Esquema del tipo de soldadura a realizar
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

3.3.2. Ensayos de Soldadura Iniciales

- Junta N°1

Para la junta N°1 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 1-3

Tabla 1-3: Parámetros de Soldadura para la Junta N°1

Voltaje (V)	70
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	50
Intensidad de Corriente (A)	70
Flujo de Gas de Protección (L/min)	12

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020



Figura 6-3: Montaje del equipo de soldadura y las placas de aluminio

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Una vez realizado el proceso de soldadura a las juntas se obtuvo el siguiente resultado:



Figura 7-3: Junta soldada N°1

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Los parámetros de soldadura seleccionados para esta junta no fueron los adecuados debido a que en primera instancia el material solamente logró fundirse más la unión de las placas base no fue posible, por lo cual se incrementó el amperaje hasta los 90A, evidenciándose así una mejora en el cordón de soldadura, sin embargo, la penetración del material de aporte no fue la adecuada por lo que fue necesario un nuevo incremento en el amperaje hasta los 120A con lo que se logró evidenciar un cordón mucho más uniforme y con una mayor penetración.

- Junta N°2

Para la junta N°2 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 2-3

Tabla 2- 3: Parámetros de soldadura para la junta N°2

Voltaje (V)	15.1
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	70
Intensidad de Corriente (A)	117
Flujo de Gas de Protección (L/min)	20

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian , 2020

Una vez aplicado el proceso de soldadura a las juntas se obtuvo el siguiente resultado:



Figura 8-3: Junta Soldada N°2

Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila, 2020

En esta junta se produjo una mancha resultado de la combustión del oxígeno en la zona de soldadura provocada por un exceso de flujo de gas de protección a su alrededor, además el punto inicial de contacto para la soldadura provocó una falla en el cordón de soldadura generado, por lo que fue necesario reemplazar el electrodo de tungsteno debido a la combustión producida.

- Junta N°3

Para la junta N°3 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 3-3

Tabla 3- 3: Parámetros de Soldadura para la junta N°3

Voltaje (V)	17
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	70
Intensidad de Corriente (A)	70
Flujo de Gas de Protección (L/min)	25

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian , 2020



Figura 9-3: Junta Soldada N°3

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian , 2020

En esta junta el flujo de gas de protección también fue excesivo por lo que al igual que en la 70 N°2 se produjo una mancha producto de la combustión entre el gas y el oxígeno en la zona de soldadura, en este caso para continuar con la soldadura del material base se pudo utilizar un cepillo de acero de uso único para aluminio ya que cualquier partícula de un material distinto que entre en contacto con el aluminio lo contaminará y el proceso no será válido.

- Junta N°4

Para la junta N°4 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 4-3

Tabla 4- 3: Parámetros de Soldadura para la Junta N°4

Voltaje (V)	19
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	70
Intensidad de Corriente (A)	120
Flujo de Gas de Protección (L/min)	12

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian , 2020



Figura 10-3: Junta Soldada N°4

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En esta junta se presentaron problemas con el electrodo de tungsteno en la antorcha, debido a que el flujo de gas de protección fue cortado, entonces al igual que en las juntas 2 y 3 el electrodo se vio afectado de manera que comenzó a desgastarse a lo largo del proceso, esto hizo necesario que la parte dañada del electrodo sea retirada y el éste sea nuevamente afilado para que no afecte la integridad del cordón de soldadura.



Figura 11-3: Electrodo para Aluminio y Acero Inoxidable

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Junta N°5

Para la junta N°5 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 5-3

Tabla 5- 3: Parámetros de Soldadura para la Junta N°5

Voltaje (V)	19
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	70
Intensidad de Corriente (A)	120
Flujo de Gas de Protección (L/min)	12

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian , 2020



Figura 12-3: Junta Soldada N°5

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Los parámetros seleccionados para esta junta presentaron un mejor resultado que los anteriores, esto fue un buen indicio, aunque el cordón presenta ciertas discontinuidades que se han de verificar mediante ensayos no destructivos y se plantea mejorar para las juntas posteriores.

- Junta N°6

Para la junta N°6 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 6-3

Tabla 6- 3: Parámetros de Soldadura para la junta N°6

Voltaje (V)	19
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	79
Intensidad de Corriente (A)	120
Flujo de Gas de Protección (L/min)	14

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020



Figura 13-3: Junta Soldada N°6

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En este caso el avance del electrodo no fue uniforme a lo largo de todo el proceso, por lo que se puede evidenciar a lo largo del cordón de soldadura discontinuidades producto de esta falla, cabe recalcar que los defectos tanto al inicio como al final de la junta se deben a la calibración del equipo de control de velocidad que se utilizó.

- Junta N°7

Para la junta N°6 fueron seleccionados los parámetros que se muestran en la tabla 7-3

Tabla 7- 3: Parámetros de Soldadura Junta N°7

Voltaje (V)	19
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	79
Intensidad de Corriente (A)	120
Flujo de Gas de Protección (L/min)	14

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

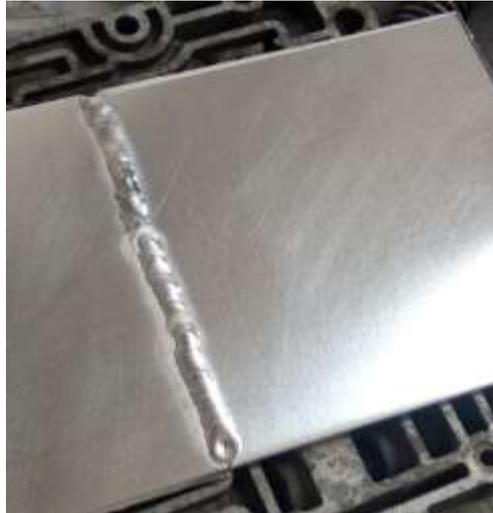


Figura 14-3: Junta Soldada N°7

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

3.4. Parámetros de Soldadura para la Aleación de Aluminio A1200 H14

Al finalizar el proceso de soldadura para cada una de las juntas anteriores, se pudo notar que los parámetros correctos se reflejaban en un cordón de soldadura mucho más uniforme, continuo y con mayor penetración, por lo que después de realizar esta cantidad determinada de ensayos podemos determinar los parámetros adecuados para la aleación de aluminio utilizada, obteniendo así los siguientes valores mostrados en la tabla 8-3.

Tabla 8- 3: Parámetros Determinados para la aleación A1200- H14

Voltaje (V)	25
Temperatura de Pre calentamiento (°C)	70
Intensidad de Corriente (A)	120
Flujo de Gas de Protección (L/min)	12
Velocidad de avance de antorcha (mm/s)	2.38 mm/s

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

3.5 Soldadura semiautomática de la aleación de Aluminio A1200 -H14

Para determinar los parámetros con los que esta aleación debía ser soldada mediante el proceso GTAW fueron necesarios la realización de 9 ensayos de prueba error para determinar mediante

ensayos no destructivos la continuidad e integridad de la junta soldada, finalmente se repitió el proceso mencionado en 3.3.1, esta vez las dimensiones de las placas fueron de 200x2000 mm, dimensiones necesarias para su posterior mecanizado.

- Pre calentamiento del Material Base



Figura 15-3: Pre calentamiento de las juntas para soldar

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Montaje del Material Base



Figura 16-3: Montaje de las placas a soldar

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Ingreso de Datos en el Equipo



Figura 17-3: Datos ingresados en el equipo de control de velocidad

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Formación del Cordón de Soldadura

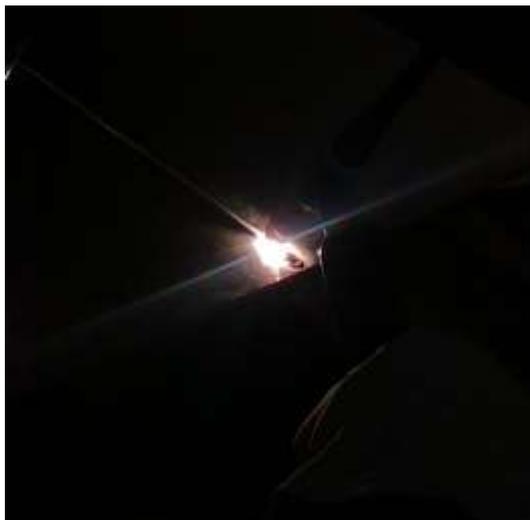


Figura 18-3: Cordón de soldadura formado en el material base

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Junta Final Soldada



Figura 19-3: Junta de aluminio soldada

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

3.6 Ensayos no Destructivos realizados en las juntas soldadas

La realización de los ensayos no destructivos es de gran importancia en cualquier proceso de soldadura, gracias a estos ensayos las juntas soldadas pueden ser evaluadas de forma rápida y sencilla, evaluando así su continuidad y forma. Para el presente proyecto se han realizado dos tipos de ensayo no destructivo a las juntas de aluminio soldadas, estos dos tipos de ensayos son: inspección visual y ensayos de tintas penetrantes.

Las normas que rigen estos ensayos son la AWS D1.1 2015 y la ASTM 165 respectivamente, con la aplicación de estas normas los ensayos son regulados para que los resultados puedan ser interpretados de la mejor manera y verificar su eficacia. Para las probetas ensayadas los ensayos de tintas penetrantes serán realizados para cada una de las juntas obtenidas.

3.6.1 Ensayo de Inspección visual

Para la correcta realización de estos ensayos es necesario conocer los datos con los cuales las probetas fueron soldadas, es por eso que cada junta irá acompañada de su respectiva hoja denominada especificación de procedimiento de soldadura (WPS) de acuerdo con la norma AWS D1.1-2006. Gracias a este análisis se podrán determinar los posibles defectos o problemas

existentes en el proceso de soldadura, cada una de las juntas soldadas fueron revisadas y las conclusiones fueron las siguientes:

- Junta N°1



Figura 20-3: Junta soldada N°1

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Junta N°2



Figura 21-3: Junta soldada N°2

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

3.6.2 Ensayos de Tintas Penetrantes

Este ensayo requiere que el lugar en el que sea realizado esté libre de impurezas o partículas que puedan alterar sus resultados, para esto nos hemos ayudado de los laboratorios de Materiales existentes en la ESPOCH, mientras que los materiales que se utilizarán son:

De acuerdo con el procedimiento mencionado este ensayo fue aplicado a cada una de las juntas soldadas, los materiales utilizadas para este ensayo fueron los siguientes:

- Limpiador, Tinta penetrante y Revelador



Figura 22-3: Líquidos Penetrantes Karl Deutsch para ensayos no Destructivos

Fuente: (Técnica Test 2019)

- Paño para Limpieza de las juntas

El procedimiento que se realizará en cada una de las placas es el mismo y se resume de la siguiente manera:

- Preparación del material a ensayar



Figura 23-3: Preparación de las juntas a ensayar

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Aplicar el líquido penetrante sobre el material y dejar que este se expanda por toda la superficie



Figura 24-3: Aplicación del líquido penetrante Karl Deutsch

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Eliminar el exceso de líquido penetrante de la superficie a ensayar



Figura 25-3: Limpieza del exceso de líquido penetrante

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Aplicar el revelador



Figura 26-3: Revelador aplicado sobre las juntas

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

- Permitir que el revelador actúe por el tiempo determinado

Para poder obtener los resultados deseados en cada uno de los ensayos realizados se debe permitir que el líquido penetrante y el revelador actúen durante al menos 5 minutos para que estos puedan ingresar en las imperfecciones del cordón de soldadura y/o material base.

- Inspección e interpretación de los resultados obtenidos

Una vez transcurrido el tiempo necesario el material ensayado tendrá un color blanco y las imperfecciones dentro del cordón de soldadura se han de mostrar con un color rojo, para este caso los resultados obtenidos fueron los siguientes:



Figura 27-3: Resultado del ensayo en las juntas N° 1 y 2

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

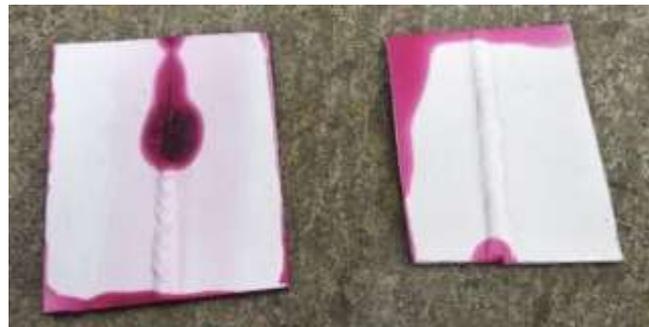


Figura 28-3: Resultado del ensayo en las juntas N° 3 y 4

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian



Figura 29-3: Resultado del ensayo en las juntas N° 5 y 6

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian



Figura 30-3: Resultado del ensayo en las juntas N° 7 y 8

Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

Al realizar el ensayo no destructivo de tintas penetrantes en cada una de las juntas se logró comprobar que las características de los cordones de soldadura realizados son muy buenas, ya que ninguno de estos mostró mayores inconvenientes o defectos, con la excepción de los puntos de interrupción del cordón y al inicio o final de este, los resultados obtenidos pueden ser visualizados en las figuras 27-3, 28-3, 29-3 y 30-3.

3.7 Caracterización del material

Con el material obtenido después de realizar la verificación del cordón de soldadura se puede continuar con su caracterización, es decir, analizar de manera microscópica como el proceso afectó a la microestructura del material base, para lograr esto se ha realizado un análisis metalográfico con el que se ha preparado la superficie que va a ser analizada, las especificaciones y recomendaciones del proceso se establecen en la norma ASTM E3-95.

En esta norma se establece el procedimiento adecuado que se debe seguir para realizar un análisis metalográfico, y una vez concluido este proceso en cada una de las probetas serán llevadas al microscopio óptico para su visualización a diferentes aumentos, esto nos permitirá encontrar las diferencias provocadas por el proceso en el material base, zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura, finalmente podremos compararlos con las condiciones iniciales del material.

Este procedimiento inicialmente requiere la preparación de pequeñas probetas obtenidas del material soldado, esto fue realizado en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica, en la figura 31-3 se muestra el equipo utilizado.



Figura 31-3: Preparación de las probetas para análisis metalográfico

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Las probetas obtenidas fueron llevadas a los bancos de lijas para preparar su superficie y dejarla lista para realizar el ataque químico y posteriormente su análisis microestructural. La figura 32-3 muestra el procedimiento realizado.



Figura 32: Desbaste de la superficie a analizar

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

El químico a la superficie de análisis de las probetas de aluminio soldadas se lo realiza con la sustancia llamada *Kellers* que dentro de su composición química tiene tres elementos: agua 96%, Ácido Nítrico 2.35%, Ácido Clorhídrico 1.65%. Esta sustancia se encuentra disponible en el laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Mecánica en la ESPOCH.

3.7.1 Estudio de la Microestructura del material

Realizar el análisis de las imágenes obtenidas en el microscopio es fundamental en este proceso ya que en ellas se podrán encontrar parámetros de gran importancia que afectan o modifican la

microestructura de un material tales como: inclusiones, defectos, diferentes tamaños de grano, entre otros. Para poder analizar los efectos que el procedimiento aplicado causó a la microestructura fue necesario observarlos mediante instrumentos que nos permitan visualizar tanto la microestructura del material base como también del cordón de soldadura, estos equipos fueron el Microscopio óptico y el Microscopio Electrónico de barrido, equipos que facilitan la visualización de estas zonas a diferentes aumentos.

3.8 Ensayos Mecánicos

Los ensayos mecánicos realizados en este proyecto de investigación nos ayudarán a conocer la dureza del material y su límite elástico que son propiedades de gran importancia en la industria carrocera. En este caso y debido al tamaño de las probetas obtenidas se ha decidido realizar ensayos de microdureza Vickers, la norma utilizada para este proceso es la ASTM E384, donde se detalla el procedimiento para realizar ensayos de microindentación en materiales.

3.8.1 Ensayo de Microdureza Vickers

Analizar la dureza para este material base de gran importancia debido a que al ser sometido al proceso de soldadura la dureza de este será afectada, es así como debido a las condiciones de este material y las dimensiones de las juntas soldadas, hemos procedido a elegir el ensayo de microdureza Vickers mismo que ha sido estudiado en el capítulo I del presente, gracias a la ecuación 2-1 podremos encontrar la dureza del material tanto en el material base como en el pozo de soldadura.

El ensayo fue realizado en los laboratorios de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, el equipo utilizado fue el micrómetro como se muestra en la figura 33-3 la carga del equipo está AJUSTADA en 200 gf (gramos Fuerza).



Figura 33-3: Micrómetro para ensayo de dureza Vickers

Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

Para poder determinar la dureza del material, debemos aplicar el procedimiento mencionado en el capítulo 1, a continuación, se muestran los resultados de las indentaciones realizadas en cada una de las probetas, los valores obtenidos en la medición se muestran en la tabla 9-3

Tabla 9- 3: Diagonales de indentación medidas en el cordón de soldadura

Probeta N°	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio (μm)
1	60,5	59,5	60
2	45	44	44,5
3	56	58	57
4	44,5	45	44,75
5	96	95	95,5
6	76,5	76,5	76,5
7	98	96,5	97,25
8	103,5	102	102,75

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Determinación de la Dureza en el Cordón de Soldadura

Tabla 10- 3: Dureza Vickers en el cordón de soldadura

Probeta N°	Diagonal Promedio	Carga Aplicada (gf)	Dureza Vickers
1	60	200	103
2	44,5	200	187,25
3	57	200	114,13
4	44,75	200	185,16
5	95,5	200	40,66
6	76,5	200	63,36
7	97,25	200	39,2
8	102,75	200	35,1

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Las diagonales de la indentación fuera del cordón de soldadura fueron medidas en base al mismo procedimiento y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 11- 3: Diagonales de indentación medidas en el material base

Probeta N°	Diagonal 1	Diagonal 2	Promedio (μm)
1	116	114	115
2	104	106	105
3	103	102,5	102,75
4	102	99,5	100,75
5	109	107,5	108,25
6	109	106	107,5
7	98	99	98,5
8	103,5	104	103,75

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Teniendo ya determinada la longitud de las diagonales producto de la indentación, se procederá a calcular el valor de la dureza utilizando la ecuación 1.1 del capítulo I, obteniendo como resultado los siguientes valores de dureza para el cordón de soldadura y el material base, el resumen de los valores encontrados se presentan en la tabla 12-3.

Tabla 12- 3: Dureza Vickers determinada sobre el material base

Probeta N°	Diagonal Promedio	Carga Aplicada (gf)	Dureza Vickers
1	115	200	28,04
2	105	200	33,63
3	102,75	200	35,12
4	100,75	200	36,53
5	108,25	200	31,64
6	107,5	200	32,08
7	98,5	200	38,22
8	103,75	200	34,45

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Para poder analizar la variación de la dureza que tiene el material obtenido respecto al material base se procede a comparar estos valores con la ayuda de la tabla 13-3

Tabla 13- 3: Resumen de dureza Vickers obtenidas

Probeta N°	Dureza Vickers	
	Material Base	Cordón De Soldadura
1	28,04	103
2	33,63	187,25
3	35,12	114,13
4	36,53	185,16
5	31,64	40,66
6	32,08	63,36
7	38,22	39,2
8	34,45	35,1

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

En el gráfico 3-1 se puede observar la variación entre la dureza que se da en el material obtenido medida desde el centro del cordón de soldadura hacia el extremo de la misma, se puede notar claramente que la dureza es máxima en el centro del cordón, mientras que la dureza mínima del material se la puede encontrar al finalizar este. De esta manera se vuelve necesario realizar un análisis del efecto que se obtuvo en dicha zona de la soldadura.

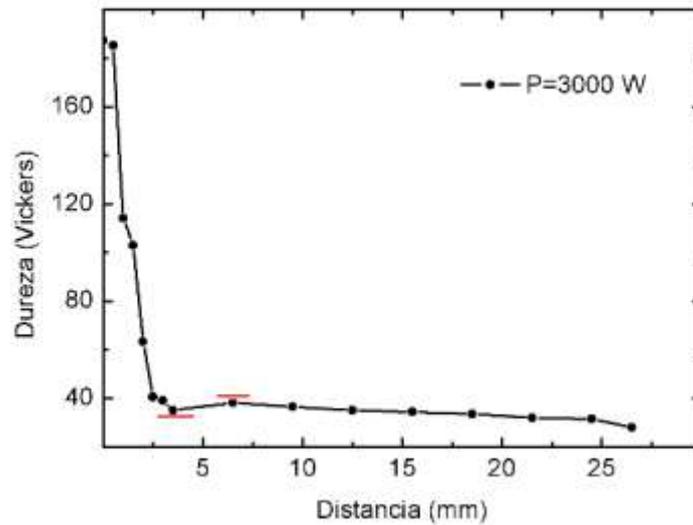


Gráfico 1- 3: Variación de dureza vickers en función a la distancia

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

El análisis de la curva obtenida de la relación distancia vs Dureza Vickers en el material debido a que el aluminio presenta una pequeña desventaja al ser unido por medio de un proceso de soldadura, y es que como se puede notar en la figura la dureza de la zona de transición es menor a la dureza obtenida en material base, siendo estos valores 34.45 y 35.12 respectivamente, por lo que ese punto se convierte en uno de los que mayor tendencia a fallar presenta.

3.8.2 Ensayo de Tracción

Los parámetros que rigen el ensayo de tracción en materiales metálicos se lo revisó en el capítulo 1 de este documento, bajo la norma AWS D1.2 existen dos diferentes aspectos que considerar antes de definir las dimensiones para las probetas a construir, estos son: La forma del material (cilíndrico, rectangular) y el espesor del material en el caso de ser rectangular, este apartado tiene una subdivisión en donde se clasifican materiales como tipo Placa con un espesor menor o igual a 25mm y mayores a 25mm, de acuerdo con esto las dimensiones de nuestras probetas serán las siguientes:

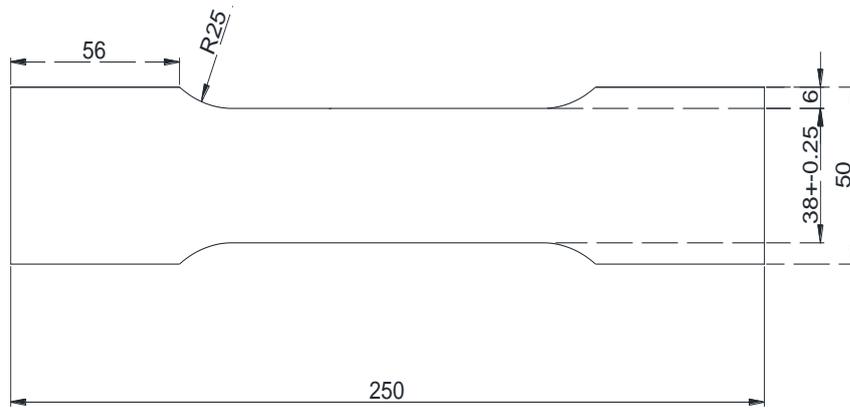


Figura 34- 3: Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción

Fuente: AWS D1.2

Los ensayos de tracción con los que se evalúan el límite de Fluencia del material obtenido serán realizados en las instalaciones del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero de la ciudad de Ambato. Con este ensayo se podrán determinar tanto la deformación como el esfuerzo de fluencia y la carga máximos a tracción con la que el material obtenido puede trabajar.

Para poder lograr esto las probetas del material fueron mecanizadas de acuerdo con la norma AWS D1.2 obteniendo como resultado final las probetas con las siguientes características como se indica en la figura 35-3

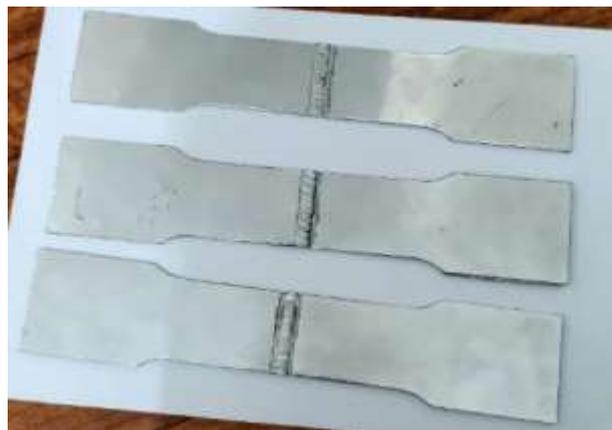


Figura 35-3: Probetas para ensayos de tracción

Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

El equipo utilizado para realizar los ensayos de tracción se muestra en la figura 36-3



Figura 36-3: Equipo utilizado para ensayos de tracción
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Los datos con los cuales el ensayo de tracción fue realizado y sus resultados se muestran en la tabla 14-3

Tabla 14- 3: Parámetros del ensayo de tracción

Precarga	0	N
Caída %	100	
Retorno Automático	0	
Límite Fuerza	1500000	N
Límite Desplazamiento	500	mm
Stop Ext	500	mm

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

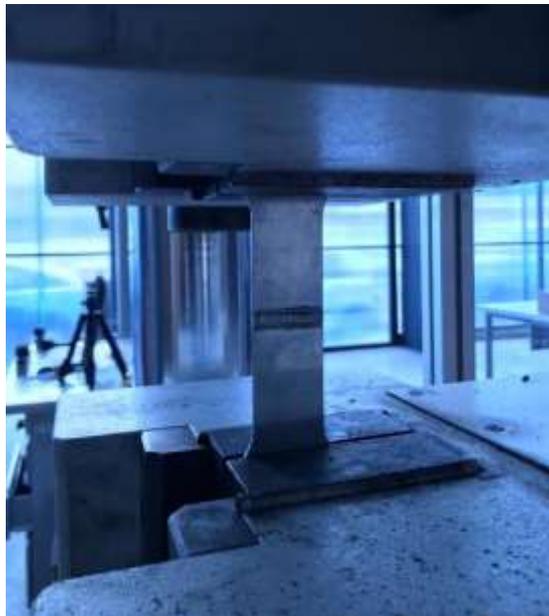


Figura 37-3: Ensayo de tracción realizado
Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

El equipo utilizado para realizar el ensayo mecánico nos entrega una información como son las curvas del comportamiento del material, en la gráfica 3-1 se presentan las curvas Fuerza – Desplazamiento de las probetas ensayadas, gracias a estas curvas se puede observar el comportamiento del material obtenido, y así poder conocer cuál será el esfuerzo máximo al cual puede ser sometido.

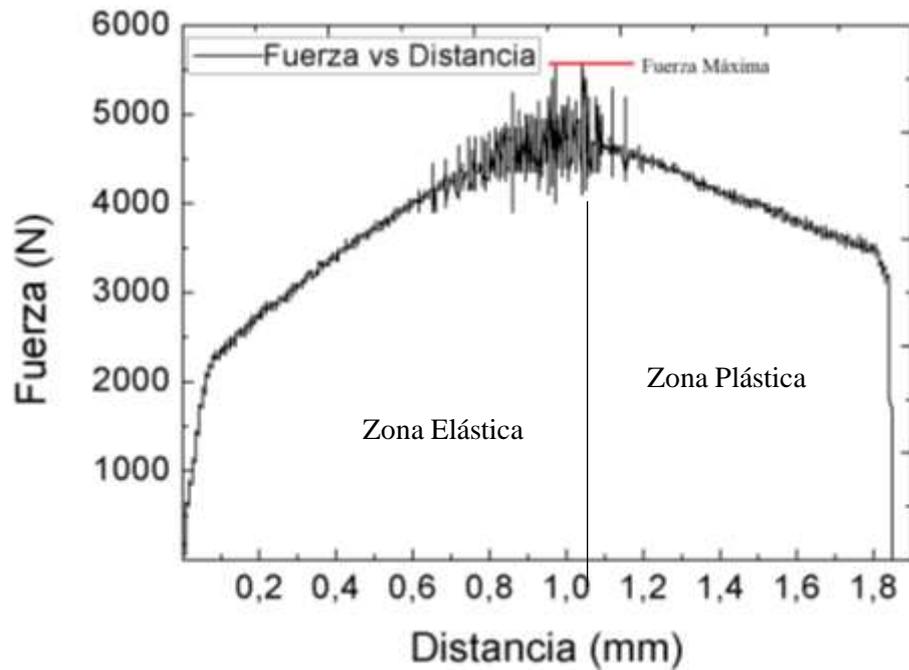


Gráfico 2- 3: Curva Fuerza vs Distancia Probeta Tracción 1
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

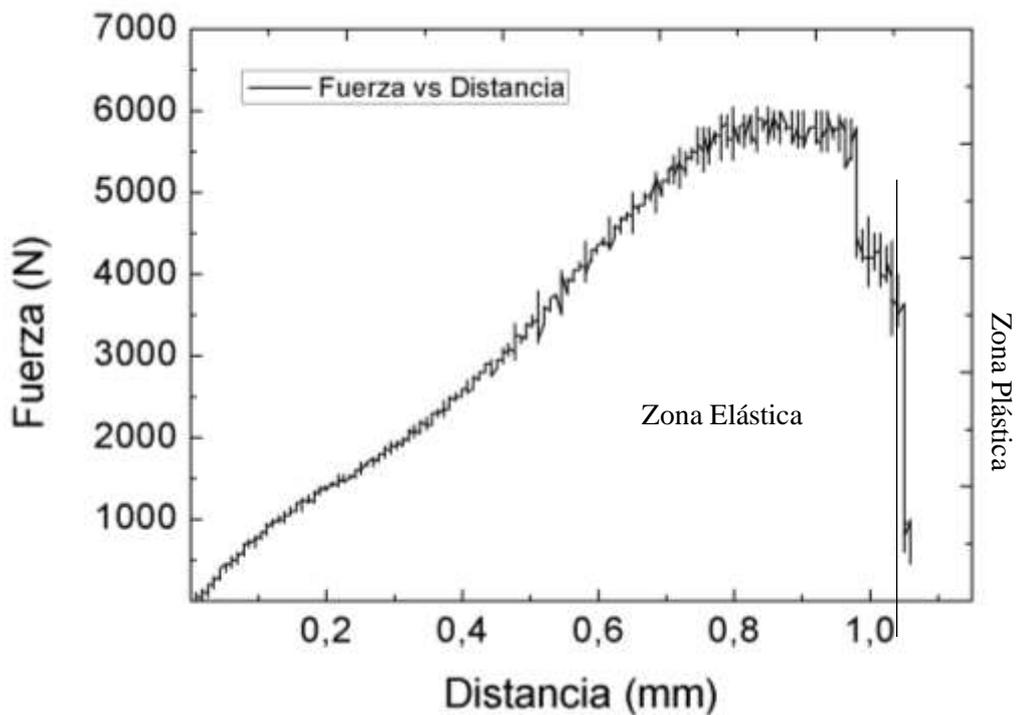


Gráfico 3- 3: Curva Fuerza vs Distancia Probeta Tracción 2
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

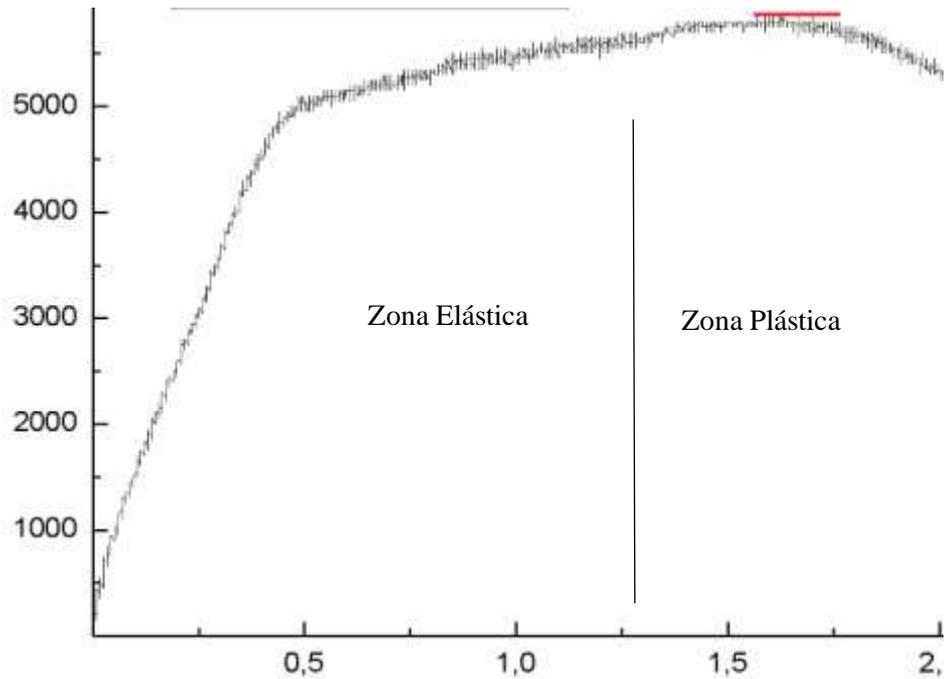


Gráfico 4- 3: Curva Fuerza vs Distancia Probeta Tracción 3

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Los Resultados obtenidos en los ensayos de tracción sobre el material obtenido se presentan en la tabla 15-3.

Tabla 15- 3: Resultados Obbttenidos en los Ensayos de Tracción

Probeta		Fmáx	Cmáx
Ensayada		[N]	[Mpa]
1		5550	45,14
2		6050	50,49
3		5850	48,61

Realizado por: Fiallos Avila Jhoe Sebastian, 2020

Los Esfuerzos Normales correspondientes para estas cargas se calculan mediante la ecuación del esfuerzo normal, y serán los siguientes:

Probeta N°1

El esfuerzo Normal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{5550N}{(38mm)(3mm)} = 48.68 \text{ Mpa}$$

Error porcentual en la medición:

$$E\% = \frac{48.68 - 45.14}{48.68} \times 100\% = 7.272\%$$

Probeta N°2

El esfuerzo Normal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\sigma = \frac{6050N}{(38mm)(3mm)} = 53.07Mpa$$

Error porcentual en la medición:

$$E\% = \frac{53.07 - 50.49}{53.07} \times 100\% = 7.272\%$$

Probeta N°3

El esfuerzo Normal:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\sigma = \frac{5850N}{(38mm)(3mm)} = 51.31 Mpa$$

Error porcentual en la medición:

$$E\% = \frac{51.31 - 48.61}{51.31} \times 100\% = 5.272\%$$

3.9 Análisis Metalográfico del Material Obtenido

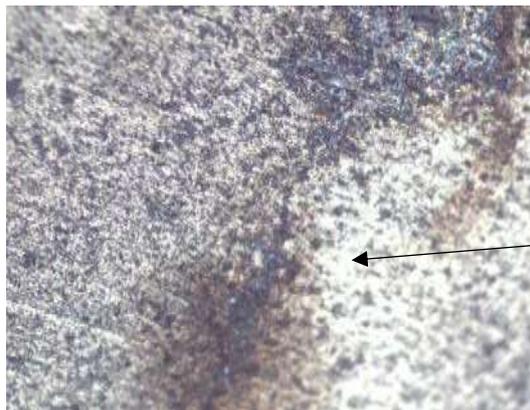
Para poder conocer como fue afectado el material base a nivel microscópico es necesario realizar un análisis metalográfico que nos pueda entregar información detallada de todos los cambios que sucedieron de manera interna en el material. Para esto, se procedió con la toma de imágenes por medio del microscopio óptico y del microscopio óptico de barrido disponibles en el laboratorio de Metalurgia de la ESPOCH. Los resultados van a tener una presentación muy diferente entre si debido a los parámetros de soldadura con el que fueron unidas cada una de las placas, es por eso, que los puntos más importantes para este análisis serán el cordón de soldadura y la diferencia que existe con el material base. Con este análisis se espera conseguir toda la información referente a la procedencia del material base y cuál fue el cambio que sufrió. Las imágenes fueron tomadas con diferentes aumentos para poder diferenciar con mejor claridad si el material consta de impurezas, inclusiones o defectos tanto en el cordón de soldadura como en el material base.

A continuación, se muestran las diferentes microestructuras obtenidas mediante el análisis metalográfico realizado:



Figura 38-3: Microscopio óptico Nikon E200

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian



Grieta en el Cordón de Soldadura

Figura 39-3: Defecto en cordón de soldadura N°1 aumento 100x

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 39-3 muestra una pequeña grieta formada entre el cordón de soldadura (lado izquierdo) y el material base (lado derecho), además de esta imperfección se puede visualizar también una marca que muestra un exceso de flujo de gas en el proceso.

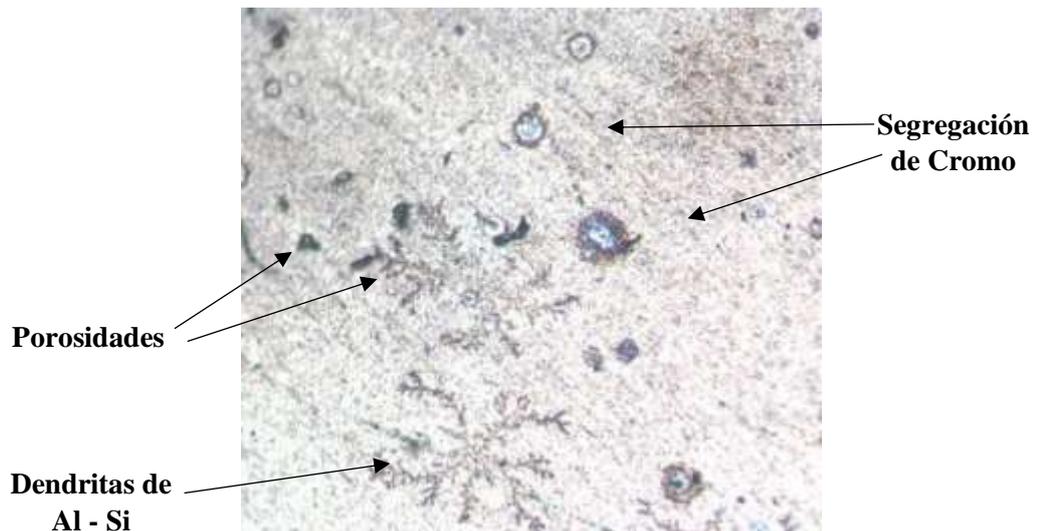


Figura 40-3: Microestructura Junta N°1 aumento 100x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 40-3 se puede observar la microestructura resultante del proceso de soldadura en la zona afectada por el calor, en donde podemos observar claramente varias imperfecciones y segregaciones de Cromo en el material, así como también pequeños defectos producidos por el proceso de soldadura, además de esto se puede observar la formación de las dendritas con base Al – Si, típicas de este proceso.

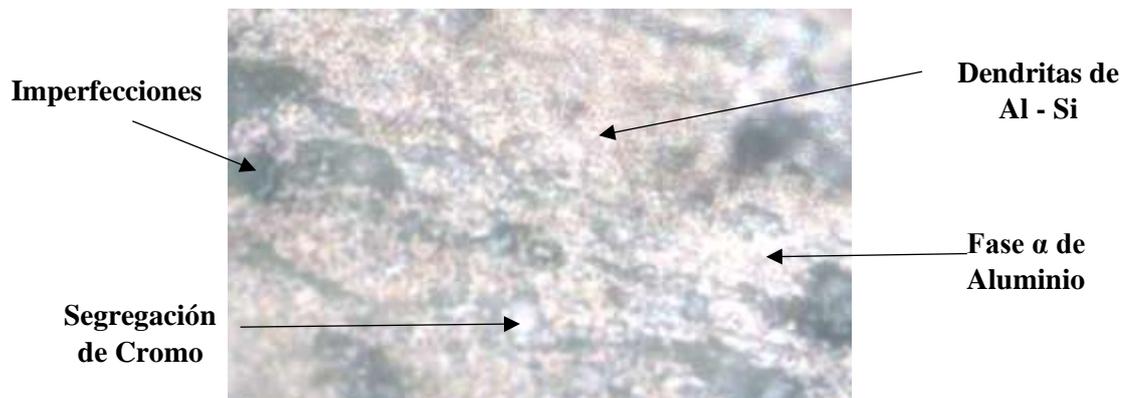


Figura 41-3: Microestructura Junta N°1 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 41-3 se observa la microestructura obtenida con un aumento de 400x en donde se puede apreciar la distribución característica del aluminio al ser sometido a un proceso de soldadura GTAW que es del tipo interdendrítico, en donde las dendritas tienen una composición base de Al – Si provenientes del material base y sus elementos aleantes. Las dendritas resultantes de una reacción eutéctica entre las dos fases que constituyen la base de la microestructura del aluminio y son las fases α y β .

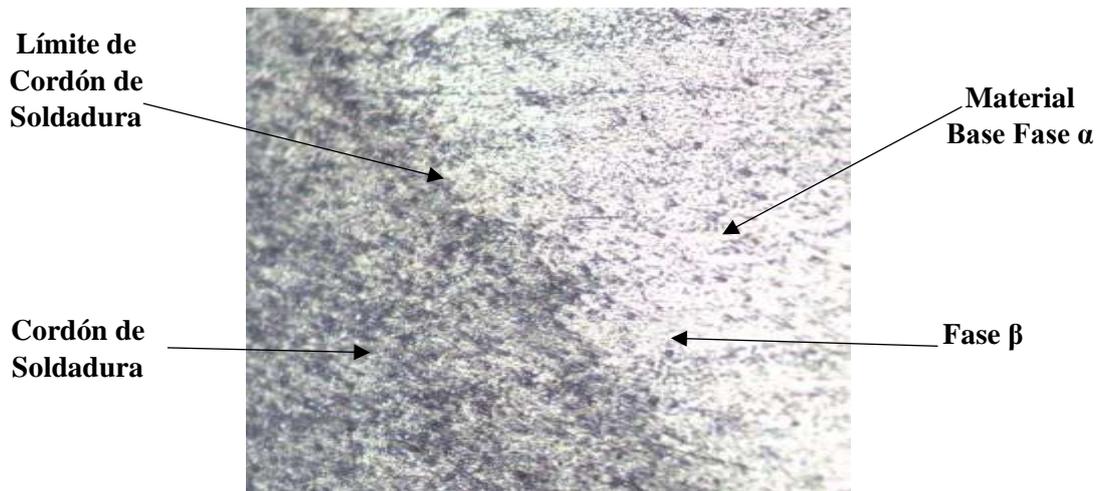


Figura 42-3: Microestructura junta soldada N°2 aumento 100x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Para la junta N°2 mostrada en la figura 42-3 podemos observar claramente la diferencia que existe entre el cordón de soldadura (lado izquierdo) y el material base (lado derecho) y como se combinan a lo largo del cordón de soldadura, se puede notar que en esta junta el número de imperfecciones visibles ha disminuido considerablemente y eso se debe a la variación de los parámetros de soldadura utilizados en este caso.

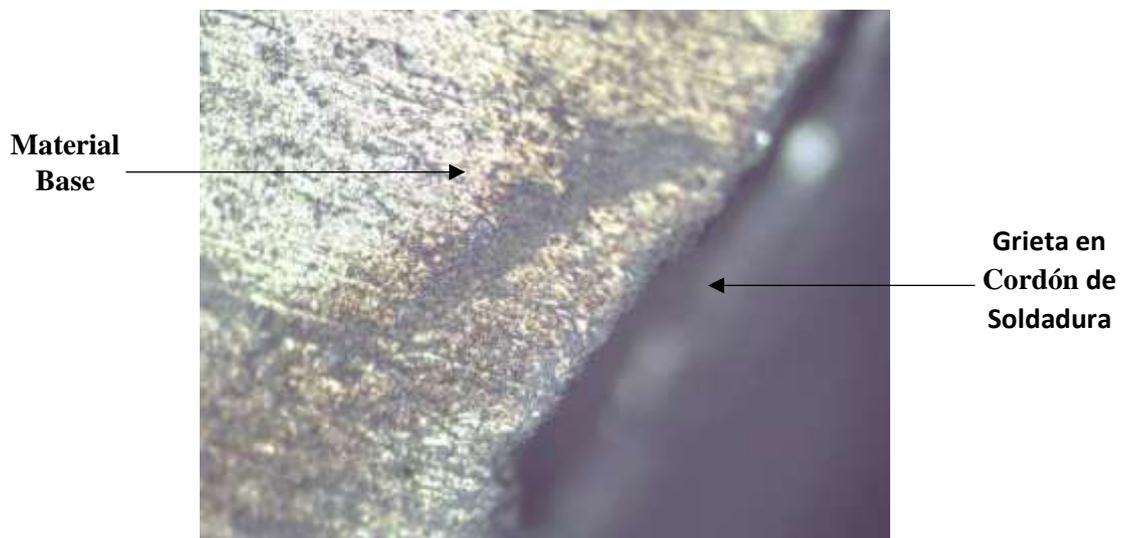


Figura 43-3: Grieta en cordón de soldadura junta N°2 aumento 100x
Fuente: Jhoe Sebastian Fiallos Avila

En la figura 43-3 se puede observar además de la combinación del material base y el cordón de soldadura, una pequeña fisura en el cordón de soldadura (lado derecho) provocada por una imperfección en el proceso y que va a dar lugar a la falla del cordón de soldadura y posteriormente al material obtenido.

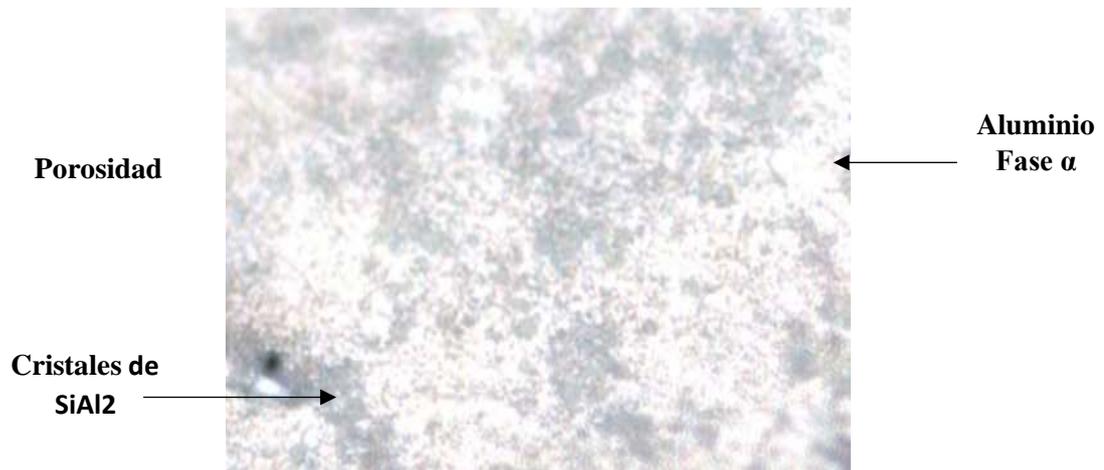


Figura 44-3: Junta soldada N°2 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Con un aumento de 400x se visualizó la microestructura del material resultante obtenido después de realizar el proceso de soldadura, compuesto específicamente por una combinación de cristales de Aluminio y Silicio provenientes de una reacción eutéctica efecto del proceso de soldadura, que se convierten en dendritas (zona gris) y que coexisten dentro de la fase α (zona blanca).

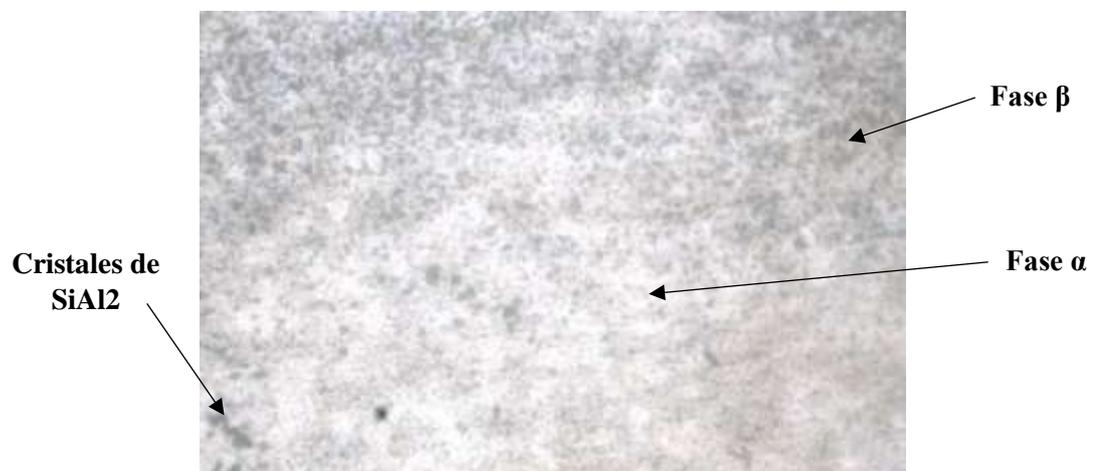


Figura 45- 3: Junta soldada N°3 aumento 400X
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 45-3 se puede observar una distribución similar en la microestructura a la obtenida en las juntas 1 y 2 en donde se puede observar cristales de SiAl₂ como su principal composición, además de una pequeña imperfección del material que se presenta en la imagen como una pequeña discontinuidad de color negro.

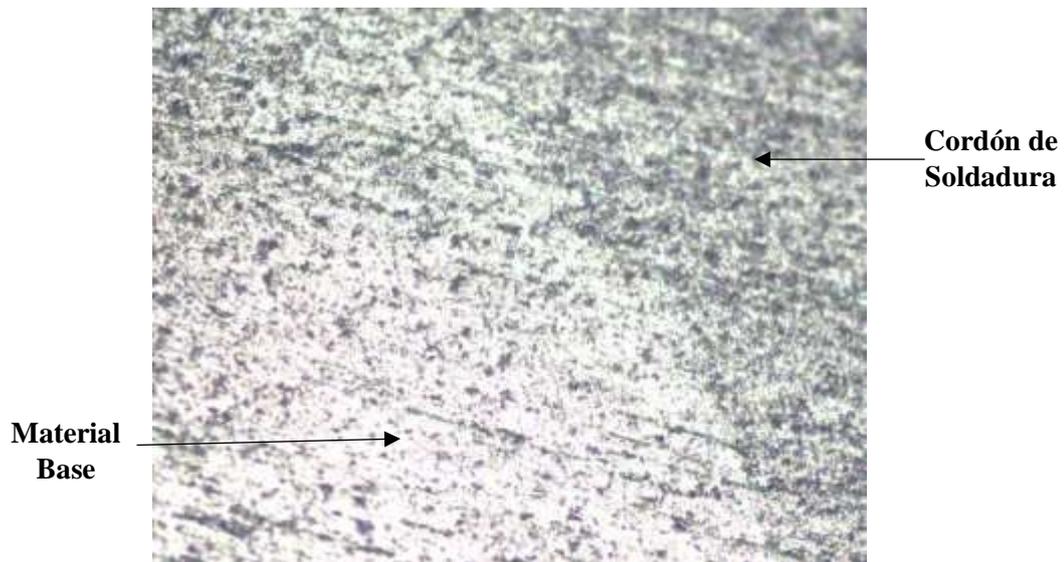


Figura 46-3: Junta soldada N°4 aumento 100X
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 46-3 nos muestra la microestructura obtenida en la zona de transición entre el cordón de soldadura y el material base, se puede observar un ordenamiento similar al obtenido en las juntas 1, 2 y 3.

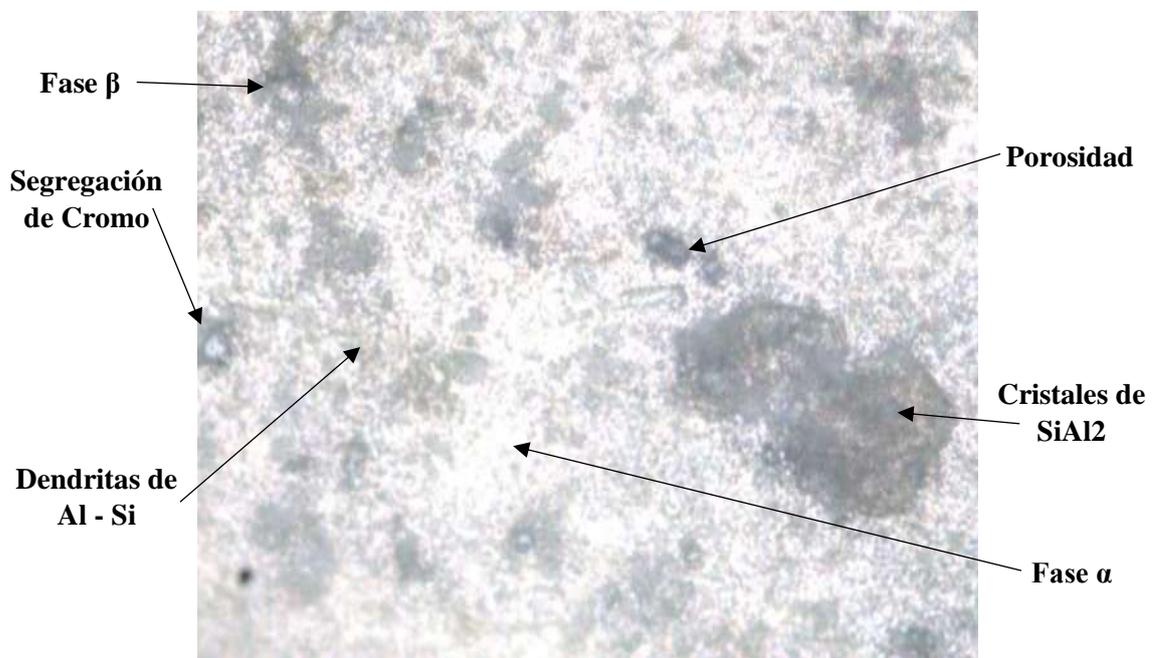


Figura 47-3: Microestructura junta soldada N°4 aumento 400X
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

Con un aumento de 400x en la figura 47-3 se puede observar claramente las imperfecciones del material base, una segregación de Cromo (borde izquierdo) debido al proceso de soldadura y la distribución interdendrítica típica el proceso GTAW aplicado a la unión de aluminio.

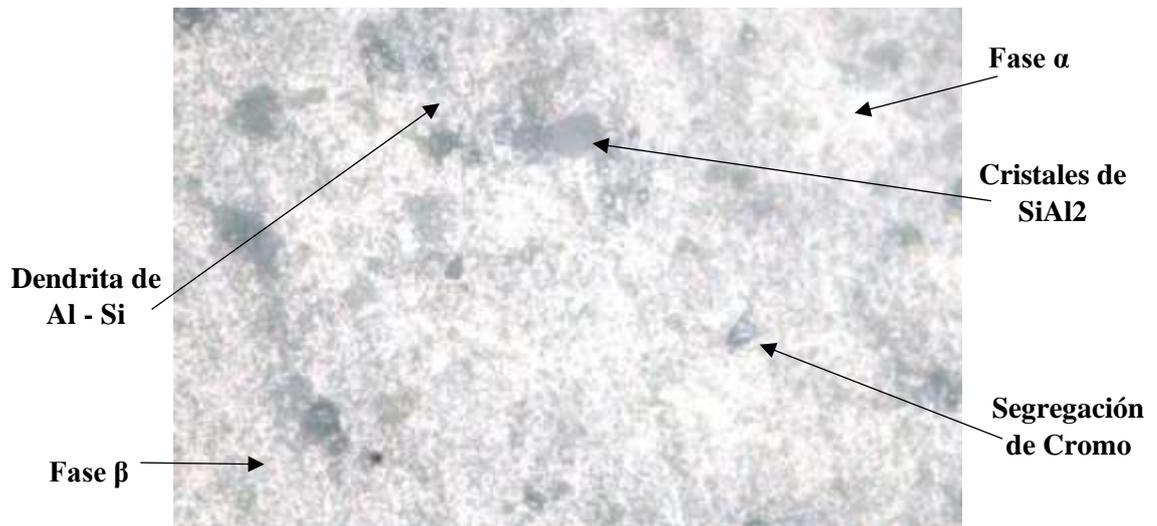


Figura 48- 3: Microestructura junta soldada N°4 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 48-3 observamos al igual que en las probetas analizadas una combinación de las fases α y β distribuidas a lo largo de la imagen, en donde también se puede apreciar una pequeña segregación de cromo (derecha).



Figura 49- 3: Microestructura junta soldada N°5 aumento 100x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 49-3 de forma similar a las juntas analizadas anteriormente muestra la distribución de la microestructura que se tendrá en el material resultante al aplicar el proceso de soldadura GTAW con un aumento de 100X.

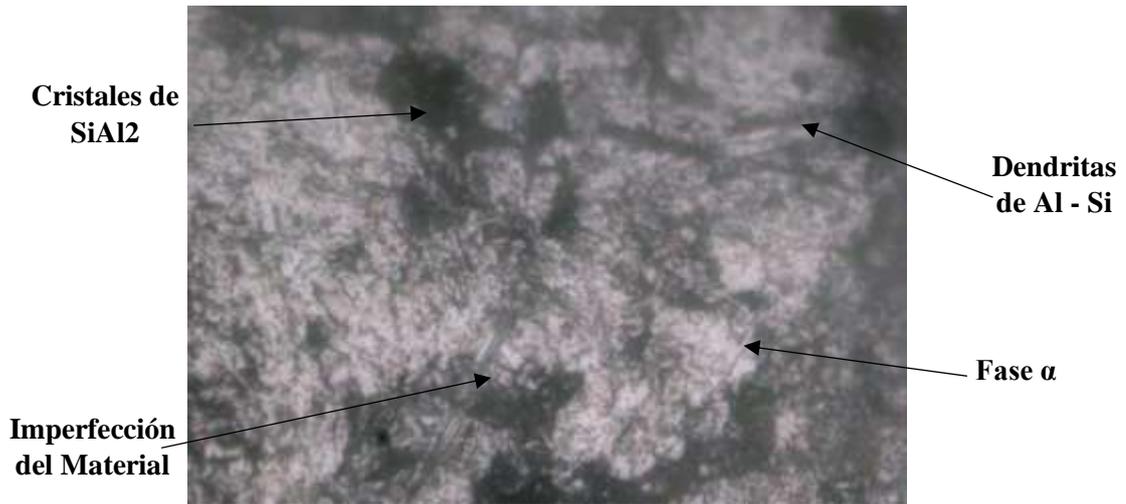


Figura 50- 3: Microestructura junta joldada N°5 aumento 400X
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 50-3 nos muestra de manera mucho más clara las dendritas formadas en la microestructura del material resultante del proceso, además de las porosidades presentes (zonas negras semi redondas) donde se distingue claramente la presencia de la fase resultante de una reacción eutéctica compuesta principalmente de Al – Si.

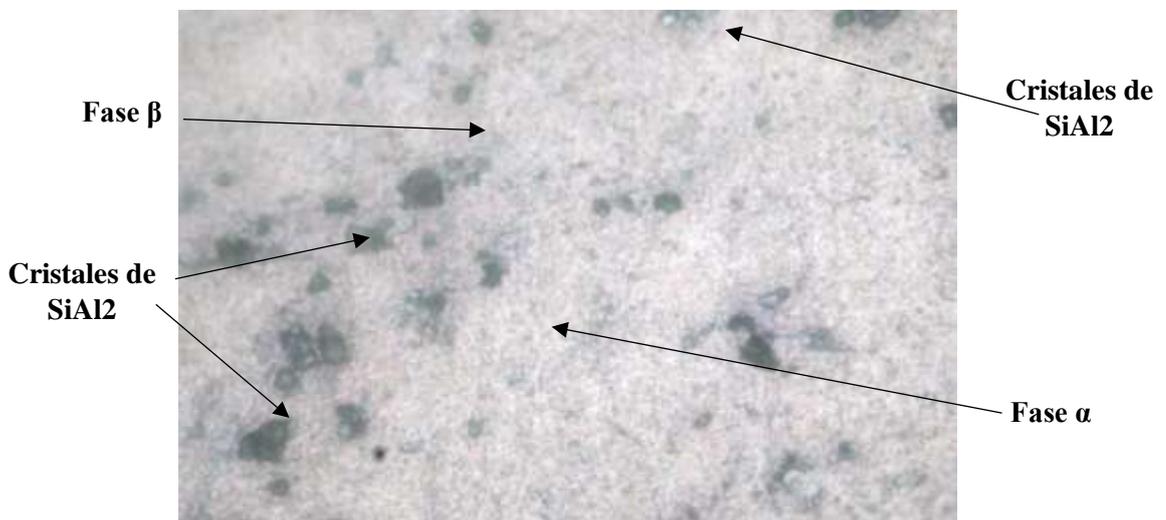


Figura 51- 3: Junta soldada N° 5 aumento 400X
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 51-3 la microestructura presentada corresponde al material resultante, donde se puede observar los elementos hasta ahora encontrados en la microestructura de todas las juntas soldadas, como son picaduras, segregaciones de cromo y Cristales de SiAl2(zonas grises).



**Discontinuidad
y Grieta en el
cordón de
Soldadura**

Figura 52- 3: Junta soldada N°6 aumento 100x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 52-3 nos muestra el inicio de una pequeña fisura en el material base debido a la interrupción del formado del cordón de soldadura, esto a su vez provocó una fisura que se prolonga longitudinalmente en el cordón de soldadura (zona superior).

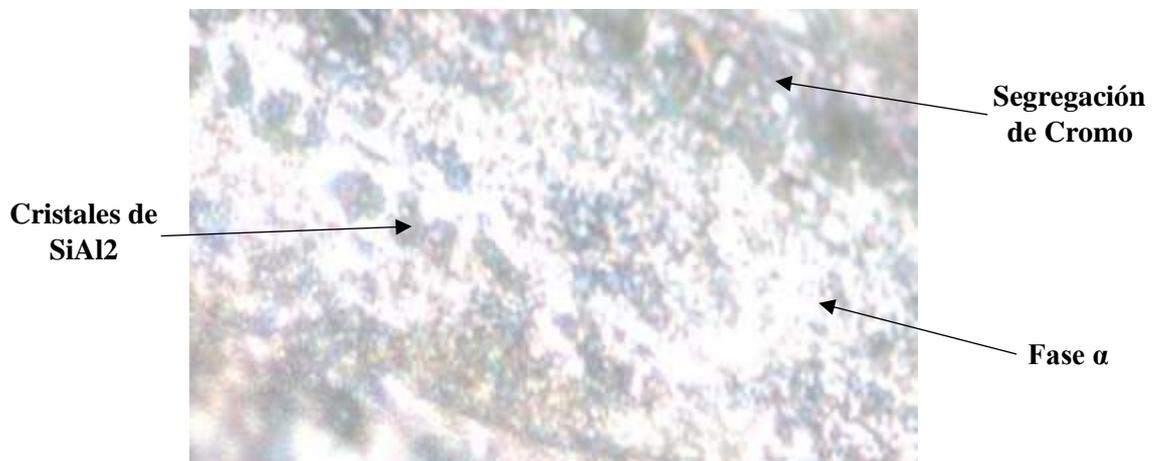


Figura 53- 3: Junta soldada N°6 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 53-3 nos muestra claramente la distribución y el ordenamiento de la microestructura resultante con un aumento de 400X que se obtiene después de realizar el proceso de soldadura,

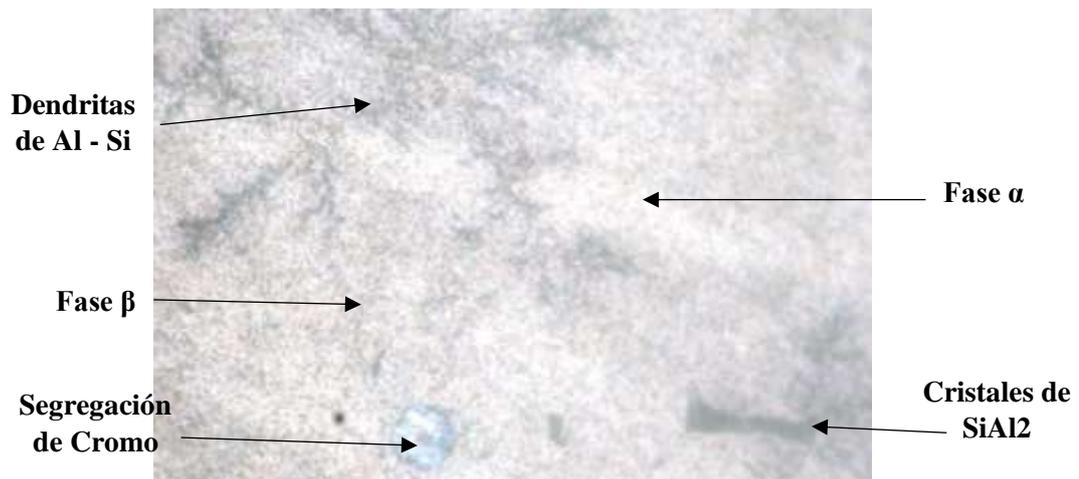


Figura 54- 3: Junta soldada N° 7 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La junta N°7 analizada muestra una microestructura similar a la encontrada en la junta N°1 lo que nos da indicios de que los parámetros entre estos procesos fueron muy similares dando paso así a la aparición de una dendrita, además también se puede apreciar la aparición de una pequeña segregación de cromo (zona inferior), siendo estos los resultados obtenidos generalmente al aplicar un proceso de soldadura a una aleación de aluminio.

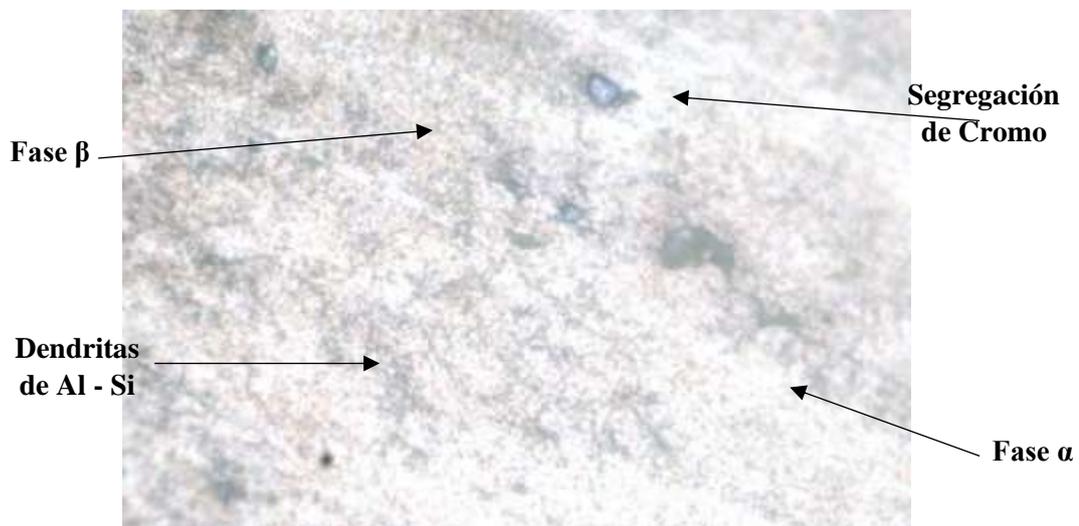


Figura 55- 3: Junta soldada N°7 aumento 400x
Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 55-3 se puede apreciar la aparición de una segregación de cromo (parte superior), la formación de nuevas dendritas resultado del proceso de soldadura aplicado al aluminio, así como también porosidades (parte inferior y central) además de las zonas típicas α y β vistos bajo un aumento de 400X.

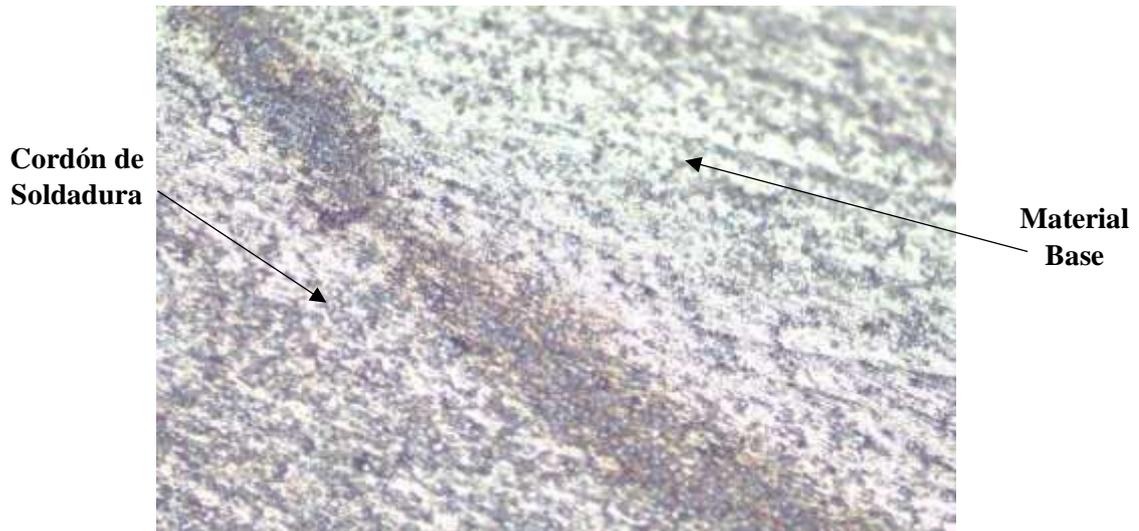


Figura 56- 3: Junta soldada N°8 aumento 100x

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

En la figura 56-3 se puede apreciar la zona de transición o borde del cordón de soldadura realizado lado izquierdo), también se pueden diferenciar una pequeña segregación de cromo (parte superior y ciertas imperfecciones ubicadas cerca del cordón de soldadura).

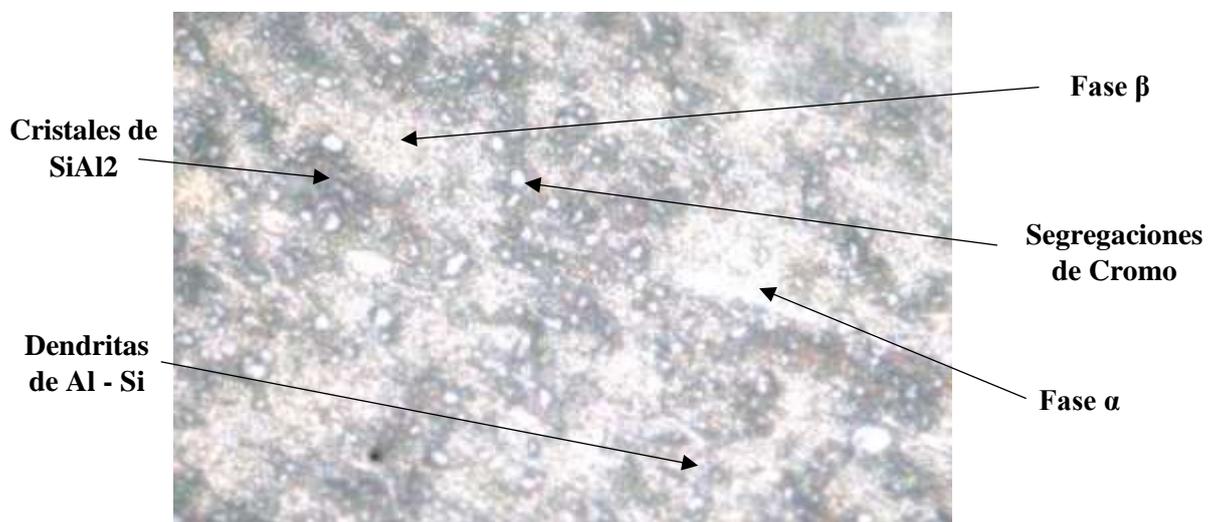


Figura 57- 3: Junta soldada N°8 aumento 400x

Fuente: Fiallos Avila Jhoe Sebastian

La figura 57-3 nos muestra con claridad que esta junta sufrió de una segregación de cromo excesiva debido a la gran presencia de cromo en la imagen, además de este elemento también se puede notar la presencia de dendritas formadas por Aluminio y Silicio que coexisten en la base de la microestructura analizada.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Después de la investigación realizada se ha llegado a las siguientes conclusiones:

El uso de parámetros de soldadura adecuados modifica los resultados del proceso, gracias a los ensayos realizados se logró determinar los parámetros adecuados para aplicar en el proceso de soldadura GTAW a la unión de juntas de aluminio; los parámetros determinados fueron: Diferencial de Voltaje de 25V, intensidad de corriente de 120 A, Flujo de gas Argón para protección 12 *L/min*, Temperatura de precalentamiento para las juntas 70°C y velocidad de avance de antorcha GTAW 2.38 *mm/s* mejorando los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, es por eso que la investigación bibliográfica en combinación con la experimentación realizada fueron fundamentales para poder lograr aplicar el proceso de soldadura semiautomático GTAW a la unión de juntas soldadas de Aluminio A1200 – H14.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados se observa que el cordón de soldadura obtenido del proceso semiautomático GTAW no presenta discontinuidades que puedan afectar la integridad de este y provocar la falla del material, la dureza del material varía de acuerdo a la longitud del cordón de soldadura y la zona analizada de este, mientras que los valores mostrados en las gráficas 2-3, 3-3 y 4-3, nos muestran la variación que se presentó en la resistencia a la tracción del material que tuvo una reducción en esta propiedad debido al proceso realizado.

El proceso de soldadura aplicado a la unión de juntas de Aluminio realizado provocó varios cambios a nivel microestructural como también en la dureza y resistencia a la tracción del material obtenido, el material obtenido sufrió cambios considerables dentro del cordón de soldadura como fuera de este, aumentando la dureza en el cordón hasta un valor de 187 Vickers, mientras que el valor más bajo se lo puede encontrar en la zona de transición entre el borde del cordón de soldadura y el material base con un valor de 35.4 Vickers, evidenciando así el efecto típico de la soldadura aplicada a la unión de aluminio (De Salazar et al. 1998).

El efecto del control de velocidad de avance de la antorcha GTAW afecta directamente a la penetración del material base a lo largo del cordón de soldadura realizado, debido a que el equipo utilizado para el control de velocidad de avance de la antorcha presenta ciertas condiciones que deben ser consideradas al mejorar el proceso en una investigación posterior, como por ejemplo la velocidad de desplazamiento horizontal con un valor de de 2.38 *mm/s*, hace que la penetración del material de aporte sea lenta, que en conjunto con las dimensiones del equipo y la carencia de un sistema de protección ante elevados niveles de corriente hacen que se encuentren ciertas

limitaciones al momento de utilizarlo para semiautomatizar el proceso, además, debido a las dimensiones que posee no se podrán unir juntas que superen dichos valores, limitando así la investigación hasta un nivel determinado.

Debido al comportamiento típico del aluminio frente a un proceso de soldadura (De Salazar et al. 1998), el aumento de su dureza, la reducción de su resistencia a la tracción y la fragilización del material base debido al calentamiento del mismo por el arco eléctrico las probetas mecanizadas para ensayos de tracción sufrieron una reducción en su resistencia a la tracción pasando de tener un límite de Tracción mínimo de 75 Mpa, mientras que el esfuerzo máximo alcanzado durante los ensayos fue de 51.48 Mpa. Lo que nos indica que esta propiedad se vio claramente afectada, siendo necesario encontrar una solución con la que se pueda minimizar dicho efecto, que generalmente se consigue con realizar un tratamiento térmico posterior al proceso de soldadura.

Recomendaciones

Las recomendaciones que se pueden hacer para que la investigación realizada tuviera más resultados favorables son las siguientes:

Se recomienda el diseño y construcción de un nuevo equipo de control de velocidad de avance para la antorcha GTAW que conste con un sistema de control de velocidad para realizar el proceso de unión con materiales con un mayor espesor, además de la instalación de un elemento de protección al circuito electrónico de control del equipo que debido a los altos niveles de intensidad de corriente presentes en el proceso provoca que el equipo se detenga, interrumpiendo así la unión del material afectando a la integridad del cordón de soldadura obtenido.

Se recomienda que el material reciba un proceso de limpieza antes de que el proceso de soldadura sea realizado debido a que cualquier impureza existente en este puede causar la contaminación del proceso de soldadura que pueda comprometer la integridad del cordón de soldadura realizado y esto a su vez provocará porosidades e imperfecciones que se convertirán en concentradores de esfuerzos en donde el material será más susceptible a fallar.

Se recomienda precalentar las juntas antes de ser sometidas al proceso de soldadura para que la circulación de los electrones a través de este sea mucho más sencilla, además de favorecer la fusión del electrodo y del material base que lleve a realizar una mezcla homogénea de estos, los rangos de temperatura de precalentamiento deben ir dentro del intervalo de 70 – 80 °C ya que dentro de este rango la aleación de aluminio tiene un mejor comportamiento y la formación de la estructura interdendrítica se dio en las juntas que fueron precalentadas con valores dentro de este intervalo.

Se recomienda realizar un tratamiento posterior al proceso de soldadura, que ayude a evitar o amortigüe los efectos de ablandamiento presentados en la zona de transición del cordón de soldadura y el material base, donde se tiene una dureza más baja en el cordón de soldadura que en el material base, el tratamiento a realizar puede ser un revenido realizado a temperatura ambiente, en donde se puede aliviar las tensiones sufridas en el material base producto del calentamiento del arco eléctrico formado.

Se recomienda analizar la composición química del material resultante debido a la presencia de puntos de cromo resultantes de una segregación de este, estas pequeñas segregaciones se deben a la presencia de cromo en el material resultante, ya que el material base originalmente no tenía un porcentaje significativo de este elemento en su composición, es necesario determinar cuál es la fuente del cromo en el proceso de soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

ALTING, Leo & BOOTHROYD Geoffrey. *Procesos para ingeniería de manufactura.* Alfaomega.ISBN 9586223000. México, 1990, pp.75-92

AMERICAN WELDING SOCIETY. *Specification Oxide for Tungsten and Tungsten Dispersed Electrodes for Arc Welding and Cutting.* ISBN 9780871717474, 2009.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *Structural Welding Code - Aluminum.* 2009, ISBN 978-0-87171-840-2, p.173.

ARIAS CÁCERES, Hilda Pamela & MANTILLA GUAMÁN María Esther. *Proceso de soldadura de aluminio mediante arco eléctrico por pulsos con protección de gas inerte y electrodo continuo (GMAW-P).* B.m. QUITO/EPN. 2010.

ARRIAGA Segundo; et al. *Procesos de soldadura.* México: IPN, 2008.

ARROYAVE, Carlos. "EL ENSAYO DE MICRODUREZA". *Revista Facultad de Ingeniería.* 2, (1985), pp.119–126.

ASTA, Eduardo. *Fundamentos de Soldadura por arco Eléctrico.* México: editoriales Noriega, 2012, p.75.

BAUMEISTER, J, J BANHART & M1 WEBER. "Aluminium foams for transport industry" *Materials & design.* Elsevier, 18(4–6), (1997), pp.217–220.

BERTRAM, Marlen, Kenneth J MARTCHEK & Georg ROMBACH. "Material flow analysis in the aluminum industry". *Journal of Industrial Ecology.* 13, (2009), (USA). Blackwell Publishing Inc Malden, (5), pp. 650–654.

BESTCONCEPT, Group,. *FERREPRO* 2019 [en línea] [consultado. 2019-10-21]. Disponible en: <http://ferrepro.mx/soldadura-tig-una-progresion-historica/>

BUDYNAS, Richard G & J Keith NISBETT. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* B.m.: McGraw-Hill Interamericana, 2012, pp.315-345 .

CHO, Dae-Won, Woo-Hyun SONG, Min-Hyun CHO & Suck-Joo NA. "Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations". *Journal of Materials Processing Technology.* Elsevier, 213(12), (2013), pp.2278–2291.

COMPTON, K T. Theory of the electric arc. *Physical Review,* APS, 21(3), 1923, p.266.

COOPER, J. *Superheated electric arc steam generator.* 1974. B.m.: Google Patents.

COSTA, Patricia Sheilla, REYES-VALDÉS Felipe Arturo, SALDAÑA-GARCÉS Rocio, GONZÁLEZ-GONZÁLEZ David Salvador & DELGADO-ALBAVERA Erick Rafael, . "Optimización de los Parámetros de Soldadura por Arco Sumergido en Acero HSLA: una Aplicación para Manufactura de Tuberías de Conducción de Hidrocarburos". *Soldagem & Inspeção*. B.m.: SciELO, **20**(4), (2015), (Brasil) pp.456–466.

DALIAN, HIGHLAND METALS CO., Ltd, 2019. Propiedades de la aleación de aluminio A1200 y propiedades mecánicas. 26 Marzo [en línea]. Disponible en: <http://m.dl-aluminum.com/info/a1200-aluminum-alloy-properties-and-mechanical-34177216.html>

DE SALAZAR, J M Gomez, A UREÑA, E VILLLAURIZ, S MANZANEDO & BARRENA I. "Soldadura TIG y MIG de las aleaciones de aluminio 6061 y 7020. Estudios microestructurales y de propiedades mecánicas". *Revista de Metalurgia*. **34**, (1998), pp.276–280.

ELANGO VAN, K & V BALASUBRAMANIAN. "Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints". *Materials characterization*. B.m.: Elsevier, **59**(9), (2008), pp.1168–1177.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LA SOLDADURA INTRODUCCIÓN. 2011 [en línea]. [consultado. 2019-05-05]. Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8259.pdf>

ESAB, 2019. *Proceso de Soldadura - SMAW* [en línea]. Disponible en: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>

FAHIMPOUR, V., S. K. SADRNEZHAAD & F. KARIMZADEH. "Corrosion behavior of aluminum 6061 alloy joined by friction stir welding and gas tungsten arc welding methods". *Materials and Design* [en línea]. B.m.: Elsevier Ltd, **39**, (2012) pp.329–333. ISSN 02641275. Disponible en: doi:10.1016/j.matdes.2012.02.043

FAN, Chongjian, Fenglin LV & Shanben CHEN. "Visual sensing and penetration control in aluminum alloy pulsed GTA welding". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. B.m.: Springer, **42**(1–2), (2009) pp.126–137.

FLORES, Carlos Eliseo. Soldadura al Arco Eléctrico SMAW. 2009 [en línea]. (08), 12. Disponible en: http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_08_MEC01.pdf

FOX, Richard W. *Welding cable and equipment*. 1983. B.m.: Google Patents.

FUJIMORI, Shigeo, Tohru SAITO, Kozaburo OTANI & Taizi NAGATANI. *Welding process for production of a steel pipe*. 1981. B.m.: Google Patents.

GÁLVEZ, Cristóbal López & Francisco Ramón Orozco ROLDÁN. *Montaje*. B.m.: Ediciones Paraninfo, SA. 2015

GIACHINO, Joseph W & William WEEKS. *Técnica y práctica de la soldadura.* B.m.: Reverté, 1996.

GUTIÉRREZ, JUAN SEBASTIÁN OSORIO y DAVID LÓPEZ ORTEGA, 2017. ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO CON SOLDADURA TIG PARA LA EMPRESA INGENIAR INOXIDABLES, PEREIRA.

HUFNAGEL, Waldemar. *Manual del aluminio.* 1992. Reverté.

INDURA Ecuador [en línea] [consultado. 2019b-09-18]. Disponible en: <http://www.indura.com.ec/web/ec>

INDURA. *Indura, Grup Air Products* [en línea] [consultado. 2019-10-27]. Disponible en: <https://www.indura.com.ec/Web/EC/11/argon>

INEN, 1977. NTE INEN0124. **0124.**

INEN, 2017. Ecuatoriana Nte Inen 2207.

Instituto Mexicano Del Transporte, 2017. Método de Prueba. pp.1–10.

IRANZO, Picazo. *MEDIOS DE UNIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS* [en línea]. [consultado. 2019-08-22]. Disponible en: <http://oa.upm.es/3786/1/Picazo-E15.pdf>

JARA DELGADO, Jaime Fernando, OCHOA ROJAS, Ángel Bolívar & RIOFRÍO GUILLÍN Víctor Manuel. *Análisis y evaluación de los procesos de soldadura del sector industrial de la ciudad de Loja, caso práctico proceso Mig-Mag.* 2007.

JEFFUS, Larry, 2008. *Manual de soldadura GTAW (TIG).* B.m.: Editorial Paraninfo.

JEFFUS, Larry, 2009. *Soldadura: principios y aplicaciones.* B.m.: Editorial Paraninfo.

KALPAKJIAN, Serope y Steven R SCHMID, 2002. *Manufactura, ingeniería y tecnología.* B.m.: Pearson Educación.

KAUFMAN, J Gilbert. *Introduction to aluminum alloys and tempers.* 2000, ASM international.

KHAN, Md Ibrahim. *Welding science and technology.* 2007, New Age International.

KOU, Sindo. *Welding metallurgy.* New Jersey, USA. 2003, pp.431–446.

LAKSHMINARAYANAN, A K, V BALASUBRAMANIAN & K ELANGO VAN. "Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* B.m.: Springer, **40**(3–4) 2009. pp.286–296.

LINCOLN ELECTRIC, Company, 2019. *Lincoln Electric* [en línea] [consultado. 2019-10-19]. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/arc->

welding-detail.aspx

Linde Ecuador, un miembro de *The Linde Group* [en línea] [consultado. 2019-09-18]. Disponible en: <http://www.linde.ec/es/index.html>

LINNERT, George E., *Welding metallurgy*. B.m.: American Welding Society Miami, Florida 1967.

LIPPOLD, John C & Damian J KOTECKI. "Welding metallurgy and weldability of stainless steels". *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, by John C. Lippold, Damian J. Kotecki, pp. 376. ISBN 0-471-47379-0. Wiley-VCH, March 2005. 376.

LIPPOLD, John C & OTHERS, 2015. *Welding metallurgy and weldability*. B.m.: Wiley Online Library.

LIU, Yao, Wenjing WANG, Jijia XIE, Shouguang SUN, Liang WANG, Ye QIAN, Yuan MENG & Yujie WEI, "Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding". *Materials Science and Engineering: A*. B.m.: Elsevier, **549**, (2012), pp.7–13.

MALARVIZHI, S & V BALASUBRAMANIAN. "Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. B.m.: Elsevier, **21**(5) (2011) pp. 962–973.

MANTI, Rajesh, D K DWIVEDI & A AGARWAL. "Microstructure and hardness of Al-Mg-Si weldments produced by pulse GTA welding". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. B.m.: Springer, **36**(3–4), (2008) pp. 263–269.

MARÍN PÉREZ, Jonatan Emanuel. Evaluación de las soluciones en recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión en Chile. 2017, Universidad de Chile.

MARCOS, Carlos Alonso. *Soldadura con electrodos revestidos de chapas y perfiles de acero carbono con electrodos de rutilo*. B.m.: Ediciones Paraninfo, SA. 2017. pp.148-157

MESEGUER-VALDENEBROJOSÉ, Antonio PORTOLÉS & Eusebio MARTÍNEZ-CONESA. "Ciclo térmico y soldabilidad de las aleaciones de aluminio". *Revista de Metalurgia* [en línea]. 2017, p.53. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.103>

MILLER ELECTRIC MFG. *Miller - Welding Equipment - MIG/TIG/Stick Welders & Plasma Cutting* [en línea] [consultado. 2019-09-19]. Disponible en: <https://www.millerwelds.com/>

MILLER, W S, L ZHUANG, J BOTTEMA, A_J WITTEBROOD, P DE SMET, A HASZLER & Ai VIEREGGE. "Recent development in aluminium alloys for the automotive

industry". *Materials Science and Engineering: A*. B.m.: Elsevier, **280**(1), (2000), pp.37–49.

MOLERA SOLÁ, Pere. *Tratamientos térmicos de los metales*. 1991. Marcombo.

MORALES, Francisco José Mola. *Instalación y mantenimiento de aparatos sanitarios de uso doméstico*. IMAI0108. B.m.: IC Editorial 2018.

OLIVARES, Erick González, Victor Vergara DÍAZ & Abdón Espinosa ALVAREZ. CT 16- Soldadura GTAW automatizada aplicada em uniones a tope en acero inoxidable 316L. 2012

PALOMO, Jesus Nieto. *UF0409-Manipulación y ensamblaje de tuberías*. B.m.: Ediciones Paraninfo, SA. 2015.

PICAZO IRANZO, Alvaro. *Medios de unión de estructuras metálicas*. B.m.: UPM, EU. de Arquitectura Técnica 2007.

PINA, Cano. *Manual de soldadura por arco eléctrico*. España: SL Ediciones Cevsa. 2012

PROCTOR, D M, K A FEHLING, E C SHAY, J L WITTENBORN, J J GREEN, C AVENT, R D BIGHAM, M CONNOLLY, B LEE, T O SHEPKER & OTHERS. "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags". *Environmental Science & Technology*. B.m.: ACS Publications, **34**(8) (2000), pp.1576–1582.

RODRÍGUEZ, Alejandro García. *Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido*.

RODRIGUEZ, Pedro Claudio. *Manual de soldadura: Soldadura Oxiacetilénica o por gas*. B.m.: Alsina, 2006.

SANTIAGO, Diego, Guillermo LOMBERA, Anibal CASSANELLI, Santiago URQUIZA & L DE VEDIA. "Análisis térmico en soldadura por fricción". *Mecánica Computacional*. **24**, 2005, pp.2781–2793.

SEPTIEMBRE, Santiago & Proceso TIG. *Xornadas De Transporte E Mantemento De Vehiculos* 2012.

SIVASHANMUGAM, M, T KUMAR, C Jothi SHANMUGAM & M SATHISHKUMAR. "Investigation of microstructure and mechanical properties of GTAW and GMAW joints on AA7075 aluminum alloy". En: *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*, **2** (2010) pp. 241–246.

SOLDEXA. *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. 2017 [en línea]. Disponible en: https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.

pdf

SUBAN, Marjan & TUŠEK Janez. "Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used". *Journal of Materials Processing Technology*. B.m.: Elsevier, 2001, **119**(1–3), pp.185–192.

TÉCNICA TEST, S.A. *Líquidos Penetrantes para la Detección de Grietas Superficiales*, 2019 [en línea]. Disponible en: <https://www.tecnicatest.com/karl-deutsch-liquidos-penetrantes.html>

TEPARATRES. *Catalogo de Alambres* [en línea] [consultado. 2019-09-18]. Disponible en: <http://www.indura.com.ec/mobile/ec/1006567/alambre-mig-er-5356/4>

THE LINCOLN ELECTRIC, Company. *Lincoln Electric* 2019 [en línea] [consultado. 2019-10-27]. Disponible en: [https://www.lincolnelectric.com/en-us/Equipment/Pages/product.aspx?product=K5126-1\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/en-us/Equipment/Pages/product.aspx?product=K5126-1(LincolnElectric))

TOAPANTA BAUTISTA, Raúl Wladimir. *Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio*. Trabajo de Titulación 2015. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

VILLAVICENCIO CEVALLOS, Julio César. Relación, Microestructura/Propiedad en la Soldadura Gtaw entre Aceros Inoxidables y Aceros al Carbono. Trabajo de Titulación, Ingeniero Mecánico, 2010. [en línea]. [consultado. 2019-07-23]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/393>

VILLEGAS, Irene Fernández. *Análisis del proceso de soldadura por resistencia en materiales compuestos de matriz termoplástica de interés aeronáutico*. Maestría. 2004. Universidad Politécnica de Madrid.

WEMAN, Klas y Gunnar LINDÉN. *MIG welding guide*. 2006.: Woodhead Publishing.

WEN, S W, P HILTON & D C J FARRUGIA. "Finite element modelling of a submerged arc welding process". *Journal of Materials Processing Technology*. B.m.: Elsevier, **119**(1–3), 2001, pp. 203–209.

WILDE JR, Raymond S M. *Joint system for filament wound aluminum pipe*. 1976. B.m.: Google Patents.

YARMUCH, M A R & B M PATCHETT. Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminum. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*. **86**(7) , 2007, 1p.96.

ZHANG, Y M, C PAN & A T MALE. "Improved microstructure and properties of 6061 aluminum alloy weldments using a double-sided arc welding process". *Metallurgical and*

Materials Transactions A. B.m.: Springer, **31**(10), 2000, pp. 2537–2543.

ZVANUT, Albert J & Michael S SIERDZINSKI. *Mild steel, flux-cored electrode for arc welding*. 1980. B.m.: Google Patents.

ANEXOS



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 07/05/2020

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Jhoe Sebastian Fiallos Avila
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Mecánica
Carrera: Ingeniería Mecánica
Título a optar: Ingeniero Mecánico
f. Analista de Biblioteca responsable: