



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“INFLUENCIA DE LA ENERGÍA APORTADA A LA  
SOLDADURA GMAW DE LA ALEACIÓN 5086-H1116  
SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE RESISTENCIA Y DUREZA.”**

**CABRERA ESCOBAR JOSÉ OMAR**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2014**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**2014-01-17**

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**JOSÉ OMAR CABRERA ESCOBAR**

---

Titulada:

**“INFLUENCIA DE LA ENERGÍA APORTADA A LA SOLDADURA GMAW DE LA ALEACIÓN 5086-H116 SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE RESISTENCIA Y DUREZA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Marco Almendáriz Puente  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Raúl Cabrera Funes  
ASESOR DE TESIS

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** JOSÉ OMAR CABRERA ESCOBAR

**TÍTULO DE LA TESIS:** “INFLUENCIA DE LA ENERGÍA APORTADA A LA SOLDADURA GMAW DE LA ALEACIÓN 5086-H116 SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE RESISTENCIA Y DUREZA”

**Fecha de Examinación:** 2014-07-09

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Víctor Vásconez Velasco PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Marco Almendáriz Puente DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Raúl Cabrera Funes ASESOR			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Víctor Vásconez Velasco  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

José Omar Cabrera Escobar

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a mis Padres: Raúl y Martha que siempre me han incentivado a seguir el camino del conocimiento y el bien, a mi hermano Vinicio y mis hermanas Verónica y Paulina que han sido las personas que me han dado fortaleza para seguir cosechando triunfos, sobre todo a Dios.

**José Cabrera Escobar**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Mecánica que aportado mediante sus profesores conocimiento para que pueda cumplir con éxito esta meta.

A el Ing. Marco Almendáriz por su incondicional apoyo y a mi padre quien a sido la inspiración durante mi carrera.

A mi madre por su infinito cariño.

**José Cabrera Escobar**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Estado del arte.....	4
2.2 Aleaciones de aluminio.....	5
2.3 Designación de composición de las aleaciones de aluminio.....	6
2.3.1 <i>Designación de las aleaciones forjadas</i> .....	6
2.3.2 <i>Designación de las aleaciones fundidas</i> .....	7
2.4 Designación de temple para aleaciones de aluminio.....	7
2.5 Aleaciones aluminio magnesio (serie 5xxx).....	8
<b>3. SOLDADURA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO</b>	
3.1 Introducción.....	11
3.2 Procesos de soldadura para aluminio.....	12
3.2.1 <i>Soldadura al arco bajo atmósfera inerte con electrodo refractario o procedimiento TIG</i> .....	12
3.2.2 <i>Soldadura al arco bajo atmósfera inerte con electrodo consumible o procedimiento MIG</i> .....	14
3.3 Variables de la soldadura en general.....	16
3.3.1 <i>Diámetro del electrodo</i> .....	16
3.3.2 <i>Polaridad</i> .....	16
3.3.3 <i>Gas protector</i> .....	16
3.3.4 <i>Extensión del electrodo</i> .....	16
3.3.5 <i>Corriente de soldadura</i> .....	17
3.3.6 <i>Velocidad de recorrido</i> .....	17
3.4 Materiales de aporte para la soldadura del aluminio.....	17
3.5 Transformaciones microestructurales en la soldadura del aluminio.....	18
3.6 Influencia de la energía aportada en la soldadura del aluminio.....	20
3.6.1 <i>Efecto del calor aportado sobre el ZAC</i> .....	20
<b>4. EXPERIMENTACIÓN</b>	
4.1 Construcción de probetas.....	21
4.2 Especificación del proceso de soldadura (EPS).....	22
4.3 Soldadura de las probetas a diferentes velocidades.....	22
4.4 Ensayo de tracción.....	25
4.5 Pruebas de dureza en la zona afectada por la soldadura.....	29
4.6 Examen metalográfico.....	31
4.7 Determinación de la energía aportada a las diferentes velocidades de avance.....	32
<b>5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	

5.1	Análisis e interpretación de los resultados del ensayo de tracción.....	34
5.1.1	<i>Velocidad: 300 mm/min</i> .....	35
5.1.1.1	<i>Probeta 300-1</i> .....	35
5.1.1.2	<i>Probeta 300-2</i> .....	36
5.1.1.3	<i>Probeta 300-3</i> .....	37
5.1.2	<i>Velocidad: 400 mm/min</i> .....	39
5.1.2.1	<i>Probeta 400-1</i> .....	39
5.1.2.2	<i>Probeta 400-2</i> .....	40
5.1.2.3	<i>Probeta 400-3</i> .....	41
5.1.3	<i>Velocidad: 500 mm/min</i> .....	43
5.1.3.1	<i>Probeta 500- 1</i> .....	43
5.1.3.2	<i>Probeta 500-2</i> .....	44
5.1.3.3	<i>Probeta 500-3</i> .....	45
5.1.4	<i>Velocidad: 550 mm/min</i> .....	47
5.1.4.1	<i>Probeta 550-1</i> .....	47
5.1.4.2	<i>Probeta 550-2</i> .....	48
5.1.4.3	<i>Probeta 550-3</i> .....	49
5.1.5	<i>Velocidad: 600 mm/min</i> .....	51
5.1.5.1	<i>Probeta 600-1</i> .....	51
5.1.5.2	<i>Probeta 600-2</i> .....	52
5.1.5.3	<i>Probeta 600-3</i> .....	53
5.1.6	<i>Velocidad: 700 mm/min</i> .....	55
5.1.6.1	<i>Probeta 700-1</i> .....	55
5.1.6.2	<i>Probeta 700-2</i> .....	56
5.1.6.3	<i>Probeta 700-3</i> .....	57
5.2	Análisis e interpretación de los resultados de la medición de dureza.....	59
5.2.1	<i>Material base</i> .....	59
5.2.2	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 300 mm/min</i> .....	60
5.2.3	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 400 mm/min</i> .....	60
5.2.4	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 500 mm/min</i> .....	61
5.2.5	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 550 mm/min</i> .....	62
5.2.6	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 600 mm/min</i> .....	62
5.2.7	<i>Probeta soldada con velocidad de avance de 700 mm/min</i> .....	63
5.3	Análisis e interpretación de los resultados del análisis metalográfico.....	64
5.3.1	<i>Material base</i> .....	64
5.3.2	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 300 mm/min</i> .....	66
5.3.3	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 400 mm/min</i> .....	67
5.3.4	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 500 mm/min</i> .....	69
5.3.5	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 550 mm/min</i> .....	70
5.3.6	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 600 mm/min</i> .....	72
5.3.7	<i>Probeta soldada a una velocidad de avance de 700 mm/min</i> .....	74
5.4	Análisis y discusión de resultados.....	75
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones.....	77
6.2	Recomendaciones.....	77

**BIBLIOGRAFÍA**  
**ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1 Composición química de la aleación 5086-H116.....	9
2 Composición de las aleaciones de aluminio forjadas .....	17
3 Características dimensionales de las probetas utilizadas en el ensayo de tracción .....	28
4 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-1 .....	35
5 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-2.....	36
6 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-3.....	38
7 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400-1 .....	39
8 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400- 2.....	40
9 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400-3.....	42
10 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500-1 .....	43
11 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500- 2.....	44
12 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500-3.....	46
13 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-1 .....	47
14 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-2.....	48
15 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-3.....	50
16 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-2.....	52
17 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-3.....	54
18 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-1 .....	55
19 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-2.....	56
20 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-3.....	58
21 Características promedio de las probetas ensayadas a tracción. ....	59
22 Resumen de los resultados obtenidos .....	76

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
1 Diagrama esquemático del equipo TIG .....	13
2 Diagrama esquemático de la soldadura TIG .....	13
3 Diagrama esquemático de la soldadura MIG .....	14
4 Diagrama esquemático del equipo MIG .....	15
5 Diagrama de equilibrio aluminio-magnesio.....	18
6 Punteado previo de las probetas antes de la soldadura .....	23
7 Dial del pirotomo donde se regula la velocidad de avance.....	23
8 Probetas soldadas en las que se muestra su designación .....	24
9 Probetas soldadas donde se puede apreciar los cráteres al inicio y final .....	24
10 Esquema de una máquina para ensayos de Tracción.....	26
11 Esquema del Diagrama Esfuerzo-Deformación.....	26
12 Identificación de las probetas.....	27
13 Curva tensión deformación de la probeta 300-1 .....	35
14 Aspecto de la fractura de la probeta 300-1 .....	36
15 Curva tensión deformación de la probeta 300-2 .....	36
16 Aspecto de la fractura de la probeta 300-2 .....	37
17 Curva tensión deformación de la probeta 300-3 .....	37
18 Aspecto de la fractura de la probeta 300-3 .....	38
19 Curva tensión deformación de la probeta 400-1 .....	39
20 Aspecto de la fractura de la probeta 400-1 .....	40
21 Curva tensión deformación de la probeta 400-2 .....	40
22 Aspecto de la fractura de la probeta 400-2 .....	41
23 Curva tensión deformación de la probeta 400-3 .....	41
24 Aspecto de la fractura de la probeta 400-3 .....	42
25 Curva tensión deformación de la probeta 500-1 .....	43
26 Aspecto de la fractura de la probeta 500-1 .....	44
27 Curva tensión deformación de la probeta 500-2 .....	44
28 Aspecto de la fractura de la probeta 500-2 .....	45
29 Curva tensión deformación de la probeta 500-3 .....	45
30 Aspecto de la fractura de la probeta 500-3 .....	46
31 Curva tensión deformación de la probeta 550-1 .....	47
32 Aspecto de la fractura de la probeta 550-1 .....	48
33 Curva tensión deformación de la probeta 550-2 .....	48
34 Aspecto de la fractura de la probeta 550-2 .....	49
35 Curva tensión deformación de la probeta 550-3 .....	49
36 Aspecto de la fractura de la probeta 550-3 .....	50
37 Curva tensión deformación de la probeta 600-1 .....	51
38 Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-1 .....	51
39 Aspecto de la fractura de la probeta 600-1 .....	52

40	Curva tensión deformación de la probeta 600-2 .....	52
41	Aspecto de la fractura de la probeta 600-2 .....	53
42	Curva tensión deformación de la probeta 600-3 .....	53
43	Aspecto de la fractura de la probeta 600-3 .....	54
44	Curva tensión deformación de la probeta 700-1 .....	55
45	Aspecto de la fractura de la probeta 700-1 .....	56
46	Curva tensión deformación de la probeta 700-2 .....	56
47	Aspecto de la fractura de la probeta 700-2 .....	57
48	Curva tensión deformación de la probeta 700-3 .....	57
49	Aspecto de la fractura de la probeta 700-3 .....	58
50	Curva de dureza del material base.....	59
51	Curva de dureza de la probeta soldada a 300 mm/min.....	60
52	Curva de dureza de la probeta soldada a 400 mm/min.....	61
53	Curva de dureza de la probeta soldada a 500 mm/min.....	61
54	Curva de dureza de la probeta soldada a 550 mm/min.....	62
55	Curva de dureza de la probeta soldada a 600 mm/min.....	63
56	Curva de dureza de la probeta soldada a 700 mm/min.....	63
57	Microfotografía del material base obtenida a 500x atacada 15 s. con Keller. ....	64
58	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes del material base. ....	65
59	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 300 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	66
60	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 300 mm/min.....	67
61	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 400 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	68
62	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 400 mm/min.....	68
63	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 500 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	69
64	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 500 mm/min.....	70
65	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 550 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	71
66	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 550 mm/min.....	71
67	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 600 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	72
68	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 600 mm/min.....	73
69	Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 700 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.....	74
70	Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 700 mm/min.....	75

## SIMBOLOGÍA

HI	Aporte térmico	J/mm
$\beta$	Factor de aprovechamiento	
Vs	Velocidad de avance	mm/min
U	Voltaje	
A	Intensidad de corriente	
Lf	Longitud final	
Lo	Longitud inicial	
Af	Área final	
Ao	Área inicial	
$\sigma$	Esfuerzo	kg/mm <sup>2</sup>
F	Carga	kg
L	Longitud en cualquier lugar del estiramiento	
E	Módulo de elasticidad	kg/mm <sup>2</sup>
E	Deformación	
HV	Dureza Vickers	

## LISTA DE ABREVIACIONES

TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
GMAW	Gas-Metal Arc Welding(Soldadura de Arco Metálico Gaseoso)
ASM	American Society for Metals
ZAC	Zona Afectada por el Calor
AWS	American Welding Society
IPM	Inches Per Minute
CFH	Cubic Feet per Hour
EPS	Especificación del Proceso de Soldadura
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials( Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Standard Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum-And – Magnesium-Alloy Products (B557-84).
- B** Standard Test Method Vickers Hardness of Metallic Materials (E92-82).
- C** Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens (E3-95).

## RESUMEN

Esta investigación se realiza por la necesidad que tiene el País de construir tanques y recipientes de aleaciones de aluminio por sus grandes ventajas como resistencia a la corrosión y peso ligero.

Para la construcción de las probetas soldadas por el proceso GMAW de la aleación de aluminio 5086-H116, se utilizaron velocidades de avance 300, 400, 500, 550, 600 y 700 mm/min que están dentro del rango recomendado, las mismas que permitieron variar la energía aportada a la unión.

Se utilizó un pirotomo para garantizar la velocidad de avance constante posteriormente se evaluaron las características de la soldadura mediante los ensayos de tracción, dureza y el examen metalográfico permitiendo encontrar la velocidad de avance óptima para el proceso.

De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se determinó que la velocidad de avance de la soldadura más adecuada es 500 mm/min (con una energía aportada de 335,34 J/mm) ,esta energía es la que permitió obtener las mejores propiedades mecánicas en la soldadura de la aleación 5086-H116 a un amperaje de 148 A. A esta energía, se produce la menor pérdida de magnesio, el tamaño de las partículas de  $Al_3Mg_2$  es más fino y más fácilmente se distribuyen de manera uniforme en la matriz  $\alpha$ , lo que permite obtener las mejores propiedades mecánicas.

A velocidades menores, esto es 300 y 400 mm/min, la energía aportada es demasiado elevada produciendo una gran pérdida de Mg por evaporación, tanto en la solución sólida  $\alpha$ , como en la fase intermetálica  $Al_3Mg_2$ .

A velocidades mayores esto es, a 550, 600 y 700 mm, la energía aportada es insuficiente para disolver las partículas de  $Al_3Mg_2$  y conseguir una distribución uniforme en la matriz  $\alpha$ .

Entonces, es importante resaltar la influencia positiva sobre las propiedades mecánicas que tiene la cantidad, tamaño y distribución de las partículas intermetálicas de  $Al_3Mg_2$ . El proceso de soldadura se debe realizar bajo parámetros que permitan que las partículas de segunda fase se hallen en condiciones que brinden las mejores propiedades en la unión.

## SUMMARY

This research was conducted by the need for the country to build tanks and containers of aluminum alloys for its great advantages like corrosion resistance and light weight.

The construction of test tubes welded by GMAW(Gas Metal Arc Welding) process of aluminum alloy 5086-H116, forward speeds 300, 400, 500, 550, 600 and 700 mm/min are within the recommended range were used, the same which allowed vary the electric energy supplied welded joint.

A pirotomo was used to ensure constant forward speed subsequently welding characteristics were evaluated by tensile testing, hardness and metallographic examination allowing find optimum forward speed for the process.

The results obtained in various tests, determined that the forward speed of the most suitable welding is 500 mm/min (with an energy supplied of 335.34 J/mm), this energy allowed to obtain the best properties in mechanical welding of alloy 5086-H116 an amperage of 148 A. At this energy, the lowest loss of magnesium occurs the particle size of  $Al_3Mg_2$  is finest and more easily distributed uniformly in the matrix  $\alpha$ , which allows to obtain the best mechanical properties.

At lower speeds, this is 300 and 400 mm/min, the supplied energy is too high to produce a great loss of Mg by evaporation, both the solid solution  $\alpha$ , as in the intermetallic phase  $Al_3Mg_2$ .

At major speeds this is, 550, 600 and 700 mm, the energy supplied is insufficient to dissolve the particles of  $Al_3Mg_2$  and get uniform distribution in the matrix  $\alpha$ .

This is important to highlight the positive influence on the mechanical properties having the quantity, size and distribution of intermetallic particles  $Al_3Mg_2$ . The welding process should be realized under parameters that allow the second phase particles are in conditions to provide the best properties welded joint.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

A nivel mundial la mayoría de empresas dedicadas a la construcción de tanques y equipos de transporte a granel han realizado una serie de investigaciones, con el fin de mejorar la calidad constructiva de los mismos, llegando a la conclusión de que una de las alternativas para lograr este objetivo sería cambiar el material que se viene utilizando para la fabricación de este tipo de equipos, es decir acero por otro que sería el aluminio por sus múltiples ventajas como su baja densidad (HIDALGO, 2013).

El aluminio es conocido también por su resistencia a la corrosión frente al aire, agua, aceites, alimentos y muchos agentes químicos.

Esta resistencia se debe a la existencia de una capa de óxido de aluminio, llamada alúmina, que impide la corrosión del metal. Se trata de una capa refractaria, es decir, que posee una temperatura de fusión muy elevada por lo que se debe retirar antes o durante la operación de soldeo para permitir una buena fusión del metal base.

Es así, que empresas como TIEMAN INDUSTRIES Pty. Ltda. de Australia incrementó una nueva línea de producción denominada O.M.E.P.S. que tiene como objetivo principal la construcción de tanques, tanqueros y volquetes de aluminio, construyendo actualmente entre 500 y 600 unidades por año, que representan aproximadamente el 60% de la producción total de la empresa.

A nivel de América otra empresa que ha incursionado en la construcción de tanques y tanqueros de aluminio es TYTAL de México, la misma que empezó con este proceso apenas hace 5 años y actualmente debido a la gran calidad y grandes ventajas que los equipos construidos en este tipo de aleación representan, ha logrado posicionarse en el mercado de Estados Unidos y además ha empezado a exportar tanques y tanqueros a otros países del mundo.

En nuestro País al momento existen empresas dedicadas a la construcción de tanques, tanqueros y equipos de transporte de acero, pero cada vez se ha visto la necesidad de optimizar los mismos mediante el empleo de materiales más livianos como el aluminio, motivo por el cual es de interés para la industria de nuestro País investigar la soldabilidad de las aleaciones de aluminio con el fin de determinar los parámetros más adecuados que permitan obtener las mejores características en las soldaduras de este material.

De todo el amplio espectro de aleaciones de aluminio, sería interesante conocer la soldabilidad de la aleación 5086-H116, por sus múltiples aplicaciones en las industrias automotriz, criogénica, marina, tanques de almacenamiento y recipientes de presión, esto podría permitir la utilización más amplia de esta aleación, lo que sería sin lugar a dudas un aporte al desarrollo de nuestro País.

## **1.2 Justificación**

La tecnología de la soldadura del aluminio no es bien conocida en nuestro medio, por lo que su aplicación no está muy difundida, por los problemas que se producen como porosidad, agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo y agrietamiento por exfoliación en las zonas afectadas por el calor, adyacentes a las soldaduras en estructuras de componentes soldados.

Por otra parte, al tener el aluminio una temperatura de fusión inferior a otros metales, es más difícil el soldar, ya que se corre el riesgo de perforación si se aplica demasiado calor, lo cual está también relacionado con la velocidad de avance que debe ser superior a la de otros metales.

Pero si se controlan en forma adecuada parámetros como el amperaje y velocidad de avance, el aluminio y sus aleaciones pueden soldarse mediante la mayoría de los procesos de soldeo por fusión, así como por soldeo blando, fuerte y soldeo en estado sólido. El soldeo por fusión se puede realizar mediante TIG, MIG, por resistencia, plasma, láser y haz de electrones.

El conocimiento que se adquiera en esta investigación, será un aporte al cambio de la matriz productiva porque permitirá diversificar el uso de materiales en aplicaciones que al momento se las realiza solamente con acero.

### **1.3 Objetivos**

**1.3.1** *Objetivo general.* Determinar la influencia de la energía aportada a la soldadura GMAW de la aleación 5086-H116 sobre la microestructura y propiedades mecánicas de resistencia y dureza.

**1.3.2** *Objetivos específicos:*

Estudiar el efecto de la influencia de la energía aportada en la soldadura de aleaciones de aluminio.

Construir y preparar probetas que permitan realizar este estudio.

Soldar las probetas a diferentes velocidades manteniendo constante el amperaje.

Determinar las propiedades mecánicas de resistencia y dureza de las soldaduras en la aleación de aluminio 5086-H116.

Determinar los cambios microestructurales en las juntas soldadas y su efecto en las propiedades mecánicas de resistencia y dureza.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del arte

Estudios sobre la soldabilidad del aluminio se han realizado muy pocos tanto en nuestro País como fuera de el, se tiene conocimiento sobre la investigación realizada por Hilda Arias y María Mantilla a través de la tesis titulada "Proceso de soldadura de aluminio mediante arco eléctrico por pulsos con protección de gas inerte y electrodo continuo" que se realizó en Quito en la EPN en el año 2010. En este trabajo se realizó la soldadura de las aleaciones de aluminio 6063 y 1100, que generalmente son utilizadas en la industria carrocera y arquitectónica, para determinar parámetros de trabajo como tipo de corriente, voltaje, flujo de gas y otros.

También se tiene información disponible respecto a la "Caracterización del aluminio 5083 H116 soldado con el proceso GMAW pulsado" realizado en Colombia por los investigadores Alfredo Morales y Diana Aragón (2012) la aleación utilizada en esta investigación es similar a la que se va a utilizar, por lo que este estudio fue de gran utilidad para la investigación.

Sobre la soldabilidad de la aleación 5086-H116, no se contaba con ningún tipo de información hasta que en el año 2013, el Ingeniero Fredy Hidalgo realizó una investigación como tesis de maestría titulada "Estudio de la variación del amperaje al realizar soldaduras a tope mediante proceso GMAW aplicado a la aleación de aluminio 5086-H116 y su efecto en las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor" (HIDALGO, 2013).

Luego de la experimentación a diferentes amperajes y de los ensayos de verificación correspondientes, se llegó a demostrar que el amperaje óptimo era 148 amperios.

Al final de la investigación en sus recomendaciones plantea la importancia de continuar la investigación manteniendo constante el amperaje y variando la velocidad de avance

para determinar aquella que permita obtener las mejores características mecánicas en los cordones, esto motivo la ejecución de esta investigación.

## 2.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio tiene una densidad baja de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  comparándola con la del acero que es de  $7,9 \text{ g/cm}^3$ , a parte de su ventaja en peso el aluminio posee buenas propiedades de conductividad térmica y eléctrica como también de buena resistencia a la corrosión en muchos medio incluyendo el atmosférico

Se puede decir que el aluminio es muy reactivo lo que favorece esta propiedad anticorrosiva ya que si está en contacto con la atmósfera reacciona con el oxígeno atmosférico y forma una capa protectora de óxido de aluminio (Alúmina).

Se conoce que el aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre (ARTINAID, 2013), las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas a nivel mundial, después del acero la aleaciones de aluminio son las más utilizadas ya que son materiales muy versátiles y por su costo fáciles de adquirir, se lo puede utilizar en una gama amplia de productos tales como: recipientes para la industria, equipos médicos, aplicaciones domésticas, etc.

Donde más exigencias presentan estas aleaciones son en la industria aeroespacial, tienen una gran ventaja sobre el resto de aleaciones que es su buena relación peso-resistencia.

Para su mayor facilidad en el estudio las aleaciones de aluminio han sido divididas en dos categorías:

- Aleaciones de Aluminio fundidas. Son las aleaciones de aluminio que contienen elementos como el silicio que facilitan su fusión y permiten obtener piezas mediante el colado.
- Aleaciones de Aluminio para conformado (forjadas). Son las aleaciones de aluminio que se dan forma aplicando grandes presiones a través de procesos como la laminación, forja, trefilado y otros procesos.

Los productos obtenidos a través del conformado no desarrollan grietas ni porosidad y segregación por solidificación, como sí ocurre en el caso del moldeo. Sin embargo, el proceso de forja somete al aluminio a una gran tensión interna, que puede hacer al metal más frágil, para lo cual se debe someter a tratamientos de alivio de tensiones.

## 2.3 Designación de composición de las aleaciones de aluminio

Existen varias designaciones de las aleaciones de aluminio de acuerdo al país, la designación que se va a utilizar es la de la Asociación del aluminio que es la más utilizada a nivel mundial.

**2.3.1 Designación de las aleaciones forjadas.** En el caso de las aleaciones de aluminio forjadas se tiene cuatro cifras la primera representa el grupo de aleación, la serie 1XXX indica una pureza de aluminio mínima del 99 %, las series 2XXX hasta 8XXX indican los grupos de aleaciones de aluminio por su elemento de principal de aleación; la segunda identifica variantes en las cuales ciertas impurezas tienen variables controladas y las dos últimas cifras identifican la aleación de aluminio o la pureza del mismo.

Teniendo así los siguientes grupos:

1xxx. Aluminio al 99% de pureza mínimo, no endurecible por envejecimiento

2xxx. Aluminio aleado con cobre o cobre-litio principalmente, endurecible por envejecimiento.

3xxx. Aluminio aleado con manganeso principalmente, no endurecible por envejecimiento.

4xxx. Aluminio aleado con silicio o magnesio silicio principalmente, endurecible por envejecimiento si Magnesio está presente.

5xxx. Aluminio aleado con magnesio principalmente, no endurecible por envejecimiento

6xxx. Aluminio aleado con silicio o silicio-magnesio principalmente, endurecible por envejecimiento.

7xxx. Aluminio aleado con zinc o zinc-magnesio principalmente, endurecible por envejecimiento

8xxx. Aluminio con otros elementos de aleación ejemplo litio, endurecible por envejecimiento.

9xxx. No se usa actualmente.

**2.3.2 Designación de las aleaciones fundidas.** Las aleaciones de este grupo son las obtenidas por fundición, son designadas con un sistema de cuatro dígitos la diferencia con las anteriores es que el último dígito es un decimal, este decimal indica la forma del producto, por ejemplo 1 o 2 es lingote y 0 para fundición:

1xx.x. Aluminio con el 99% de pureza mínimo, no endurecible por envejecimiento.

2xx.x. Aluminio aleado con cobre principalmente, endurecible por envejecimiento.

3xx.x. Aluminio aleado con silicio-magnesio, silicio-cobre principalmente, algunas son endurecibles por envejecimiento.

4xx.x. Aluminio aleado con silicio principalmente, no endurecible por envejecimiento.

5xx.x. Aluminio aleado con magnesio principalmente, no endurecible por envejecimiento.

6xx.x. Esta designación no se utiliza por el momento.

7xx.x. Aluminio aleado con Magnesio-Zinc principalmente, endurecible por envejecimiento

8xx.x. Aluminio aleado con estaño principalmente, endurecible por envejecimiento

9xx.x. No se usa actualmente.

Además se tiene una clasificación adicional de las aleaciones de aluminio que es por su estado de tratamiento.

## **2.4 Designación de temple para aleaciones de aluminio**

El estado en el que se pueden encontrar las aleaciones de aluminio son:

O. Recocida

H. Trabajada en frío

H1x. Solo trabajada en frío. (La x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y endurecimiento.)

H12. Trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados 0 y H14

- H14. Trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados 0 y H18
- H16. Trabajo en frío que da resistencia a la tensión en medio entre templados H14 y
- H18. Trabajo en frío que da alrededor de 75% de reducción.
- H19. Trabajo en frío que da resistencia a la tensión mayor a 2000 psi de la obtenida por el templado H18.
- H2x. Trabajo en frío y parcialmente recocida.
- H3x. Trabajada en frío y estabilizada a baja temperatura para impedir endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
- W. Tratada por solución
- T. Endurecido por envejecimiento.
- T1. Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.
- T2. Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
- T3. Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
- T4. Tratada por solución y envejecida naturalmente.
- T5. Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.
- T6. Tratada por solución y envejecida artificialmente.
- T7. Tratada por solución y estabilizada por exceso de envejecimiento.
- T8. Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
- T9. Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
- T10. Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente (ASKELAND, 2012).

## **2.5 Aleaciones aluminio magnesio (serie 5xxx)**

Estas aleaciones son importantes en aplicaciones donde se requieren alta resistencia, la misma que se obtiene gracias a la cantidad de magnesio disuelto en la solución sólida.

El magnesio es conocido también promueve el endurecimiento por trabajado en frío.

Las aplicaciones de las aleaciones de esta serie están en la industria automotriz, recipientes de presión, componentes marinos y criogénicos.

Estas aleaciones presentan una buena resistencia a la corrosión, pero se debe evitar la formación continua de  $Mg_2Al_3$  que precipita en los límites de grano, porque puede producir corrosión intergranular. Esto puede ocurrir, en las aleaciones de alto magnesio trabajadas en frío, expuestas a temperaturas de 120 a 200 ° C.

Por esto, las aleaciones de aluminio magnesio serie 5xxx, contienen magnesio en proporciones inferiores al 10% Mg, lo cual mejora la resistencia a la corrosión atmosférica, resistencia mecánica y ductilidad. Además, las aleaciones de esta serie poseen buenas características para soldadura.

El aluminio es capaz de disolver hasta un 14,9 % de Magnesio en aluminio a 451°C, pero a temperatura ambiente alcanza alrededor de un 2 %.

La soldabilidad de las aleaciones aluminio-magnesio es limitada por cuanto los dos metales tienen diferente estructura cristalina, esto es el aluminio tiene una estructura cristalina FCC y el magnesio HCP, además los radios atómicos son diferentes.

Como la aleación tiene alrededor de 4,5 %, el resto de magnesio forma un compuesto intermetálico llamado  $Al_3Mg_2$ , estos compuestos se caracterizan por ser de mayor dureza que la solución sólida  $\alpha$ .

Por lo que la presencia de estos componentes se puede mejorar la dureza y la resistencia de la aleación.

La aleación que se utiliza como material base para este estudio es la 5086-H116 que tiene la siguiente composición química:

Tabla 1. Composición química de la aleación 5086-H116

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
Mínimo	-	-	-	0,20	3,50	0,05	-	-	-	-	-
Máximo	0,40	0,50	0,10	0,70	4,50	0,25	-	0,25	0,15	0,15	Resto

Fuente: ALU-STOCK, El libro del Aluminio 5, España, sección 11, pág. 32

Esta aleación tiene las siguientes aptitudes tecnológicas muy buenas:

***Soldadura.*** Al arco bajo gas argón, por resistencia eléctrica.

***Anodizado.*** De protección, anodizado duro.

***Procesos de transformación.*** Brillo de la Superficie.

***Comportamiento natural.*** En ambiente rural, en ambiente industrial, en ambiente marino, en agua de mar.

***Alimentario.*** Uso alimentario para envases.

Esta aleación puede sufrir agrietamientos inter cristalinos y de corrosión bajo tensión luego de tratamientos térmicos inadecuados (Alustock, 2013).

La segunda parte de la designación de la aleación 5086-H116 significa el tratamiento térmico es decir temple H116, el primer dígito (1) significa que es trabajada en frío y los dos últimos dígitos (16) la cantidad de trabajo en frío y endurecimiento producido

## CAPÍTULO III

### 3. SOLDADURA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

#### 3.1 Introducción

La soldadura de las aleaciones de aluminio es un proceso muy complejo debido a que el aluminio tiene una alta conductividad térmica y sus puntos de fusión son bajos esto implica que fácilmente se puede perforar el material si no se trabaja siguiendo cuidadosamente los procesos de soldadura.

Un procedimiento adecuado para soldar aleaciones de aluminio es el siguiente:

***Limpieza de superficies.*** Se debe limpiar completamente la superficie de sustancias extrañas tales como suciedad restos de lubricantes, aceites, etc. El riesgo que se corre si no se realiza una adecuada limpieza puede desencadenar en que el fundente no se distribuirá uniformemente y el metal de aporte no fluirá de manera continua o se decolorará teniendo como consecuencia una unión incompleta.

Para realizar la limpieza se puede identificar dos técnicas: limpieza con productos acuosos y desengrasado térmico.

***Limpieza con productos acuosos.*** La limpieza con agua o con productos hidrosolubles es un método eficiente, aunque una desventaja es que pueden quedar restos de humedad.

Para la limpieza acuosa se utiliza un agente limpiador de metales que se lo diluye en agua entre una proporción del 1% a 5%, la composición de este agente limpiador la conocen los fabricantes, este tipo de soluciones tienen mayor eficiencia a mayor temperatura, normalmente se recomienda una temperatura de 50° C a 80°C. Con una mayor temperatura de la solución, la limpieza será en menor tiempo (SOLVAY, 2012).

***Desengrasado térmico.*** El desengrasado térmico consiste en un aumento de temperatura de la pieza para que las sustancias que estén sobre esta se evaporen, una limitación que tiene este método es que no todas las sustancias se evaporan con facilidad.

***Eliminación de la capa de óxido.*** Esta capa de óxido es necesaria eliminarla antes del proceso de soldadura porque al tener una temperatura de fusión de 2070 ° C aproximadamente y la aleación de trabajo un rango de fusión de entre 585 ° C y 640 ° C al momento de soldar el óxido de aluminio formaría inclusiones y se sabe que las inclusiones reducen las propiedades.

Para la eliminación del óxido de aluminio se utilizan cepillos de acero inoxidable aunque también se puede utilizar soluciones decapantes.

***Escoger fundente y material de aporte.*** Esta parte es muy importante ya que si no escogemos fundente y material de aporte adecuado nuestra soldadura no va a presentar buenas características.

***Pre calentamiento uniforme.*** Es necesario un pre calentamiento uniforme para que la estructura de la soldadura al final del proceso sea uniforme.

### **3.2 Procesos de soldadura para aluminio**

El aluminio se puede soldar por diferentes procesos, pero los más recomendados son: soldadura MIG y soldadura TIG.

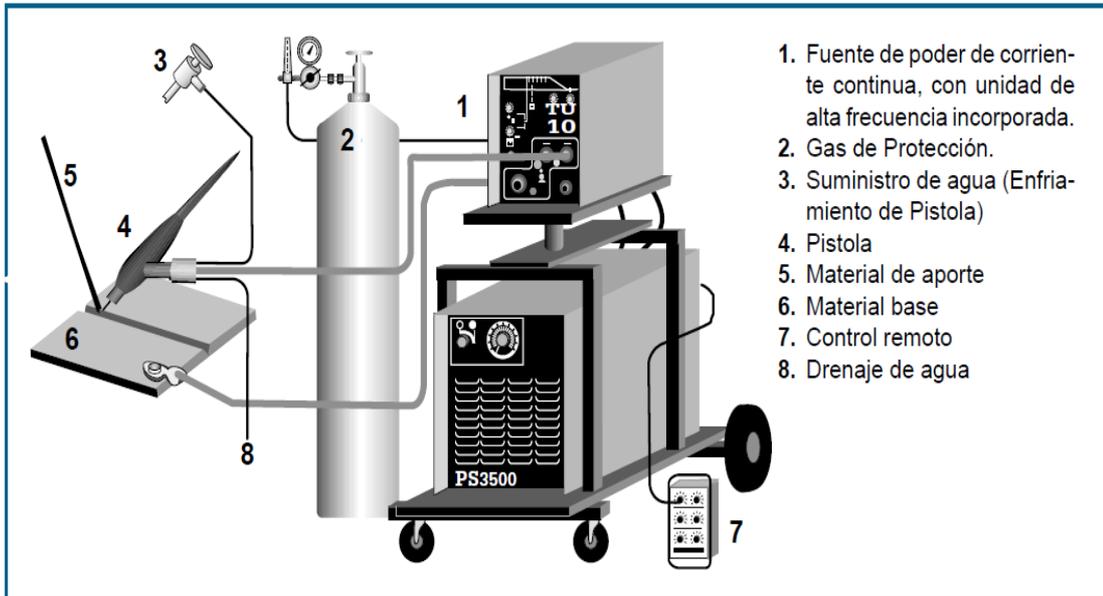
**3.2.1 Soldadura al arco bajo atmósfera inerte con electrodo refractario.** La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza un electrodo no consumible de tungsteno y gas inerte, este tipo de soldadura tiene tres componentes principales que son: fuente de poder, pistola o soplete y sistema de protección gaseoso.

La fuente de poder es la encargada de suministrar al equipo de soldadura la energía necesaria para que el proceso se cumpla con normalidad, la pistola o soplete asegura el electrodo no consumible de tungsteno que está rodeado por una boquilla cerámica que hace fluir concéntricamente al gas protector, este gas por lo general es argón y tiene la función de actuar como escudo protector a la atmósfera.

Este tipo de soldadura se emplea en aplicaciones de alta calidad ya que tiene buenas características como ductilidad y resistencia además este tipo de soldadura al no utilizar fundente es mucho más resistente a la corrosión ya que restos de fundente en otros tipos

de soldadura incrementa la posibilidad de corrosión muestra de su calidad es que se tiene varios ejemplos de aplicación en la industria aeronáutica.

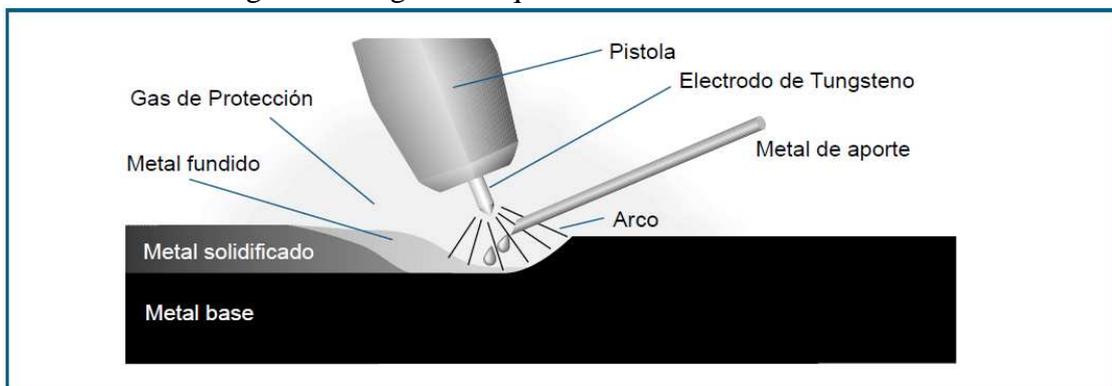
Figura 1. Diagrama esquemático del equipo TIG



Fuente: INDURA, Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura, Ecuador, pág. 122

Además del argón muchas veces se utiliza también al helio como gas protector este tiene la ventaja que eleva la temperatura del arco, la unión mediante este proceso se la realiza con o sin material de aporte.

Figura 2. Diagrama esquemático de la soldadura TIG



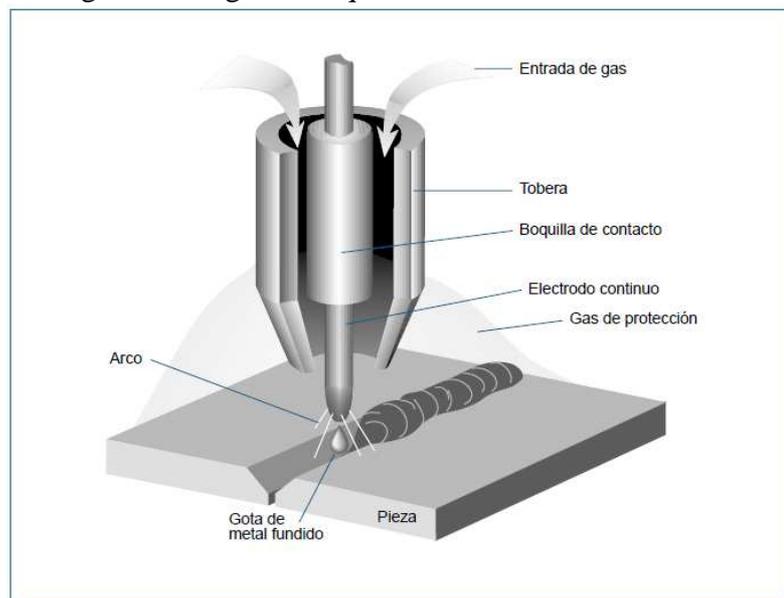
Fuente: INDURA, Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura, Ecuador, pág. 121

La soldadura TIG necesita refrigeración en la antorcha y el cable.

Cuando se trabaja normalmente se refrigera con aire pero cuando se trabaja con altas temperaturas, el refrigerante es agua que circula por estos dos elementos.

**3.2.2 Soldadura al arco bajo atmósfera inerte con electrodo consumible.** El sistema de soldadura MIG es un proceso que utiliza arco eléctrico, un electrodo que es alimentado automáticamente a velocidad constante y un gas protector inerte.

Figura 3. Diagrama esquemático de la soldadura MIG



Fuente: INDURA, Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura, Ecuador, pág. 82

La soldadura MIG (Metal Inert Gas) utiliza un electrodo consumible a diferencia de la TIG, un gas de protección inerte es decir que permanece inalterable en cualquier circunstancia a diferencia de la soldadura MAG que utiliza un gas activo que reacciona químicamente con la temperatura del arco. El electrodo es protegido por una campana de gas, se tiene dos tipos de protección: gases activos: reaccionan químicamente a la temperatura del arco y gases inertes permanecen iguales en cualquier caso.

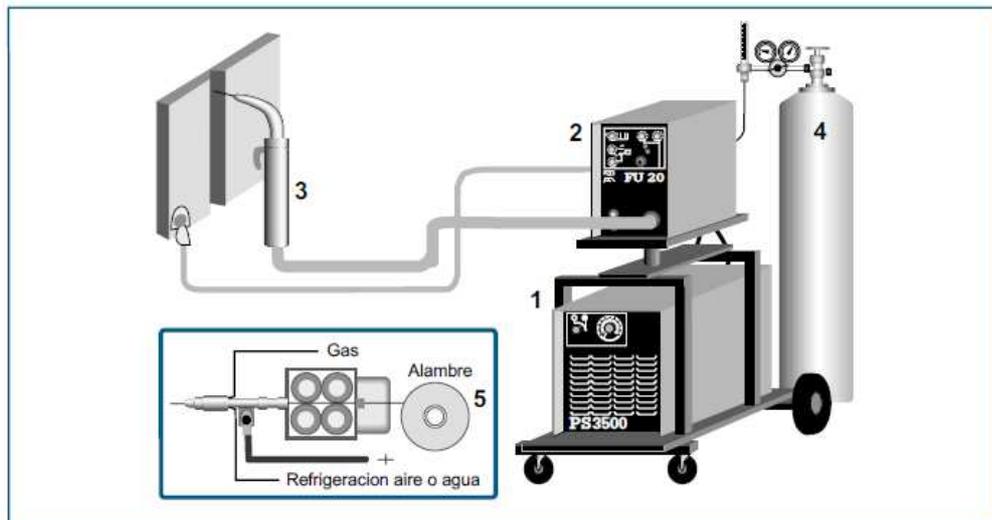
Una parte muy importante de este equipo es el sistema de alimentación del hilo, existen dos tipos: -en el primero el sistema de alimentación forma parte del equipo – en el segundo el sistema de alimentación se lo tiene de forma independiente no forma parte del equipo, en el sistema de alimentación del hilo se tiene rodillos de arrastre del hilo y la bobina del material de aportación, también se puede decir que existen tres tipos de arrastre:

- De empuje (push)
- De arrastre pull
- Combinados de empuje-arrastre (push-pull)

Figura 4. Diagrama esquemático del equipo MIG

El sistema MIG requiere del siguiente equipo:

1. Una máquina soldadora
2. Un alimentador que controla el avance del alambre a la velocidad requerida.
3. Una pistola de soldar para dirigir directamente el alambre al área de soldadura.
4. Un gas protector, para evitar la contaminación del baño de soldadura.
5. Un carrete de alambre de tipo y diámetro específico.



Fuente: INDURA, Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura, Ecuador, pág. 83

La mayoría de los sistemas son de empuje en los que el alambre es alimentado desde un carrete por medio de unos rodillos y es empujado a través de un conducto flexible al cual esta unida la pistola. La longitud de conducto es generalmente de 3 m, pudiendo ser en algunas ocasiones de hasta 5 m.

Cuando la distancia entre la fuente de energía y la pistola es muy grande puede ser difícil alimentar el hilo mediante el sistema de empuje, por lo que se recurre al sistema de arrastre. En este sistema la pistola está equipada con unos rodillos que tiran, o arrastran, el alambre a través de la funda (o tubo-guía), evitando los atascos que se pueden producir con el sistema de empuje, sin embargo este sistema es más costoso.

Si se combinan ambos sistemas se tiene un sistema de alimentación de “arrastre y empuje”. Este sistema se conoce también con el término inglés “push-pull” en el que existen unos rodillos empujando a la salida de la bobina y otros tirando desde la pistola (Electric, 2011).

### **3.3 Variables de la soldadura en general**

Las variables que influyen en el proceso de soldadura se relacionan directamente unas con otras, teniendo entre las más representativas a las siguientes:

**3.3.1 *Diámetro del electrodo.*** Depende de la franja de soldadura, mientras mayor sea la franja mayor diámetro del electrodo teniendo en cuenta que un electrodo de mayor diámetro requiere una mayor corriente que un electrodo de menor diámetro.

**3.3.2 *Polaridad.*** Se puede hablar de polaridad cuando se trabaja con corriente continua teniendo dos tipos de polaridades directa e inversa. Cuando trabajamos con polaridad directa el electrodo va conectado al terminal negativo y la pieza de trabajo al terminal positivo dándose el flujo de electrones desde el electrodo hacia la pieza de trabajo en cambio cuando se trabaja con polaridad inversa el electrodo va conectado al terminal positivo y la pieza de trabajo al terminal negativo dándose el flujo de electrones desde la pieza de trabajo hacia el electrodo. La polaridad mayormente utilizada es la inversa ya que tenemos múltiples ventajas como: proporción de un arco estable, transferencia suave del metal de soldadura, salpicaduras relativamente bajas buenas características del cordón de soldadura y una mayor profundidad de la penetración para un amplio rango de corriente de soldadura (ALTAMIRANO, 2009).

**3.3.3 *Gas protector.*** La función de los gases que se van a utilizar en la soldadura es proteger al metal fundido de la atmósfera, ayudar en la velocidad de soldadura, dar mejores características al arco, obtener mayor penetración y mejor perfil de la soldadura y tiene también una función limpiadora. Entre los gases comúnmente utilizados principalmente en el proceso GMAW que se va utilizar en esta investigación tenemos: Argón, mezcla de argón helio, dióxido de carbono, mezcla de argón dióxido de carbono, mezcla de argón, dióxido de carbono y helio.

**3.3.4 *Extensión del electrodo.*** Esta es la distancia del extremo de la voquilla a la pieza y tiene la siguiente influencia a una distancia mayor causa resistencia en el electrodo lo que hace que el hilo se caliente demasiado teniendo problemas de mala penetración.

Estas variables están condicionadas de los siguientes parámetros de soldadura:

- El tipo de metal

- El espesor de metal
- Posición de la Unión a Soldar

También se tiene las conocidas como variables regulables primarias.

**3.3.5 Corriente de soldadura.** Se puede decir que la calidad de la soldadura depende de la intensidad o corriente de soldadura, modificando esta variable se modifica también la energía aportada al proceso de soldadura mientras mayor corriente mayor será la energía aportada a la soldadura.

**3.3.6 Velocidad de recorrido.** Conocida también como velocidad de avance actúa inversamente con la energía aportada es decir a mayor velocidad de avance menor será la energía aportada a la soldadura, se conoce que una variación en la velocidad de avance va a modificar factores como, grado de penetración, ancho del cordón y su forma geométrica. Estas variables primarias regulables controlan la profundidad de penetración, el ancho de cordón de soldadura depositado y la velocidad de aportación de metal a la soldadura (ROWE, 2008).

### 3.4 Materiales de aporte para la soldadura del aluminio

El alambre 5356 es recomendado para soldar aluminio y aleaciones de los tipos 5056, 5083, 5154 y 5356. Este alambre es empleado en todos los tipos de aluminio estructural, donde el tratamiento térmico posterior no es factible como un método para producir uniones soldadas de más alta resistencia.

Tabla 2. Composición de las aleaciones de aluminio forjadas

ALLOY	COMPOSITION, WT%						
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	OTHER
1100	...	0.12	...	...	...	...	99.00 AL MIN
1188	...	...	...	...	...	...	99.88 AL MIN
2319	...	6.3	0.30	...	...	0.15	0.17 ZR, 0.10 V
4043	5.2	...	...	...	...	...	...
4047	12.0	...	...	...	...	...	...
4145	10.0	4.0	...	...	...	...	...
4643	4.1	...	...	0.2	...	...	...
5183	...	...	0.75	4.7	0.15	...	...
5356	...	...	0.12	5.0	0.12	0.13	...
5554	...	...	0.75	2.7	0.12	0.12	...
5556	...	...	0.75	5.1	0.12	0.12	...
5654	...	...	...	3.5	0.25	0.10	...
C355.0	5.0	1.25	...	0.5	...	...	...
A356.0	7.0	...	...	0.4	...	...	...
357.0	7.0	...	...	0.5	...	...	...
A357.0	7.0	...	...	0.6	...	0.12	...

**Fuente:** ASM Metals handbook, vol.6-welding brazing & soldering. Pag. 135

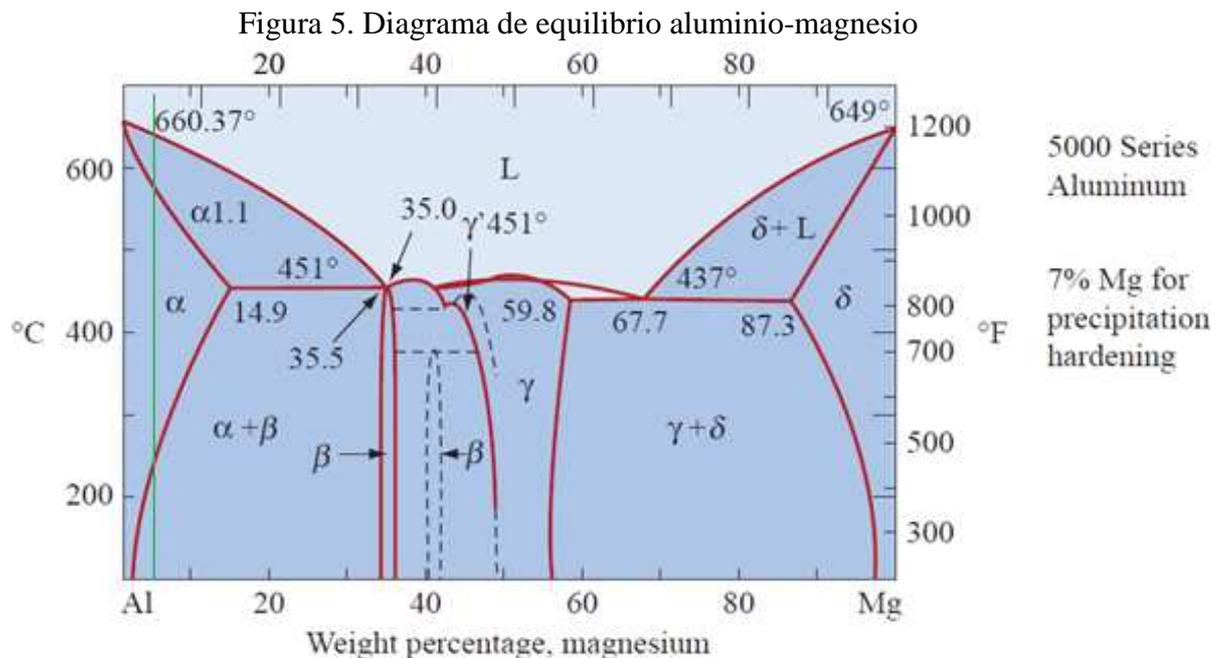
Las propiedades de resistencia de los materiales base de los aluminios al magnesio no son afectados tan drásticamente por el calor del arco de soldadura como son las aleaciones de aluminio de alta resistencia con tratamiento térmico (PASTOR, 1999).

### 3.5 Transformaciones microestructurales en la soldadura del aluminio

En el diagrama aluminio-magnesio para las series 5xxx se puede visualizar que hay dos fases a temperatura ambiente la primera es la fase  $\alpha$ , que es una solución sólida de magnesio disuelto en aluminio y la otra es la fase interdendrítica  $Mg_2Al_3$  que es un compuesto duro y quebradizo. Las partículas de  $Al_3Mg_2$ , contienen alrededor del 40 % de Mg y son redondeadas (ASM. Metals Handbook. Vol. 9. Metallography & Microstructures. pág. 1692)

Este tipo de aleaciones pueden ser endurecidas por una fina dispersión de  $Mg_2Al_3$ , como también por endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control del tamaño de grano.

Los tratamientos por endurecimiento por envejecimiento no son posibles, debido a que el  $Mg_2Al_3$  no es coherente es decir tiene diferente composición a altas y bajas temperaturas.



Fuente: ASKELAND Donald. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 6ta Edición, pág. 544

La aleación 5086-H116 se encuentra fundida hasta los 640°C, al enfriarse a partir de esta temperatura empiezan a formarse los primeros cristales de solución sólida  $\alpha$ , los mismos que van creciendo a medida que avanza el enfriamiento aproximadamente hasta que a los 580°C termina la solidificación y toda la estructura está constituida por solución sólida  $\alpha$ .

A partir de los 230°C se produce la precipitación de  $Mg_2Al_3$ , en los límites de grano y a medida que se va enfriando la aleación la solución sólida va perdiendo magnesio hasta alcanzar solamente el 1 % a temperatura ambiente y el  $Mg_2Al_3$  se distribuye en la matriz  $\alpha$ .

En forma teórica, se puede determinar el porcentaje aproximado de  $Al_3Mg_2$  que se puede observar en las microfotografías en el ZAC. Para esto se debe encontrar los porcentajes de aluminio y magnesio dentro del compuesto  $Al_3Mg_2$ .

Si se considera 100 gramos del compuesto  $Al_3Mg_2$ , se debe determinar el número de moles totales. El peso atómico del aluminio es 26,98 g/mol, como cada molécula tiene 3 átomos se tiene 80,94 g/mol. De igual forma para el magnesio el peso atómico es 24,31 g/mol, como cada molécula tiene dos átomos se tiene 48,62 g/mol.

Entonces sumando

$$80,94 + 48,62 = 129,56 \text{ g/mol}$$

El porcentaje atómico del magnesio es

$$\% Mg = \frac{48,62}{129,56} \times 100 = 37,5 \%$$

El porcentaje atómico del aluminio es

$$\% Al = \frac{80,94}{129,56} \times 100 = 62,5 \%$$

El porcentaje promedio de magnesio de la aleación 5086 es 4 % y porcentaje promedio de magnesio del electrodo 5356 es 4,7%.

Si se considera un 25 % de dilución del electrodo y un 75 % de dilución del metal base.

Metal base	$4 \times 0,75 = 3$
Electrodo	$4,7 \times 0,25 = 1,175$
Total	4,175 % de magnesio

La pérdida por evaporación va del 16 al 20 % para soldadura láser[10], para soldadura MIG, se considera un 16 % por ser menor la energía , lo que daría un 0,63 % de magnesio, restando del total se tiene 3,55.

De este contenido 37,5 se encuentra en el compuesto  $Al_3Mg_2$ , lo que daría 0,375 (3,55) = 1,33 %, restando de 3,55 se tiene 2,22 % de magnesio sin considerar que también de este porcentaje se formara también otro componente el  $Mg_2Si$ , en poca cantidad por lo cual no se considera su análisis, ni su cálculo.

Del diagrama Al-Mg, se determina el porcentaje de  $Al_3Mg_2$

$$\% Al_3Mg_2 = \frac{2,22 - 1,4}{34 - 1,4} \times 100 = 2,51\%$$

### **3.6 Influencia de la energía aportada en la soldadura del aluminio.**

**3.6.1 Efecto del calor aportado sobre el ZAC.** Debido a que las transformaciones metalúrgicas de la zona afectada por el calor (ZAC) de las aleaciones de aluminio son térmicamente dependientes de la energía (temperatura), el proceso de soldadura y sus parámetros determinan el grado de degradación de metal base en esta zona. La entrada de alto calor y precalentamiento aumentan tanto el grado de influencia y la anchura de la zona afectada por el calor (ZAC).

Esta región se extiende desde el punto que empieza a bajar la dureza hasta el punto en que esta alcanza su mínimo valor, corresponde al límite de formación del precipitado endurecedor  $Al_3Mg_2$ .

Por lo tanto, en esta zona la pérdida de coherencia es total por la transformación de este precipitado y es en ella donde se produce la fractura en la prueba de tracción.

La matriz de esta zona está formada esencialmente de una solución sólida de magnesio en aluminio y el magnesio excedente que no puede disolverse en el aluminio forma el compuesto  $Al_3Mg_2$  que es el endurecedor y sus propiedades dependen del tamaño y de la uniformidad de su distribución.

El tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC) depende de la cantidad de energía aportada a la soldadura, si se aplica adicionalmente un precalentamiento esta zona crece, en el caso de las aleaciones de aluminio no es necesario un precalentamiento, debido a su alta conductividad.

## CAPÍTULO IV

### 4. EXPERIMENTACIÓN

#### 4.1 Construcción de probetas

Para la construcción de las probetas se utilizó planchas de aluminio 5086-H116 y como material de aporte electrodo ER5356, el corte se lo realizó con plasma, después a las probetas se les sometió a un rectificado para dejarlas en las dimensiones adecuadas ( 25 mm de ancho), no fue necesaria la forma con estrangulamiento en el centro de las probetas por cuanto al ser soldada tiende a fracturarse en la zona de la soldadura.

No fue necesario preparar biseles en los bordes de la junta debido a que el espesor es menor a 5 mm y la soldadura se la hará en una sola pasada.

A continuación se presentan los parámetros más importantes de la construcción de las probetas:

- Amperaje = 148A  
Rango recomendado = 130A – 175A
- Velocidad de Avance = 300mm/min, 400mm/min, 500mm/min, 550mm/min, 600mm/min, 700mm/min  
Rango recomendado = 300mm/min - 750mm/min
- Voltaje = 25V  
Rango recomendado = 24V – 26V
- Velocidad de Alimentación = 360ipm  
Rango recomendado = 300ipm – 420ipm
- Flujo de Argón = 40cfh  
Rango recomendado = 35cfh – 45cfh
- Diámetro del electrodo ER5356 = 1,2mm
- Espesor de las placas = 4,78mm

## **4.2 Especificación del proceso de soldadura (EPS)**

El método de soldadura utilizado es la soldadura de arco metálico gaseoso (Gas Metal Arc Welding, GMAW) o soldadura MIG (Metal Inert Gas) es un proceso en el cual un arco eléctrico es mantenido entre un alambre sólido que funciona como electrodo continuo y la pieza de trabajo. El arco y la soldadura fundida son protegidos por un chorro de gas inerte o activo. El proceso puede ser usado en la mayoría de los metales y gama de alambres en diferentes aleaciones y aplicaciones.

Para el desarrollo de este estudio se emplearon láminas de aluminio 5086-H116 de 4,78 mm de espesor, soldadas a tope con una separación de 1 mm.

El procedimiento de soldadura se lo realizó tomando en cuenta la norma AWS D1.1

- Diseño de la junta
- Parámetros de soldadura
- Corriente de soldadura(o velocidad de alimentación del alambre)
- Tensión de soldadura
- Velocidad de Avance o Velocidad de Soldadura
- Velocidad de Flujo del Gas de Protección (caudal)
- Selección del material de aporte
- Inspección de la soldadura

## **4.3 Soldadura de las probetas a diferentes velocidades.**

El rango de velocidades recomendados para soldadura manual está entre 300 y 750 mm/min (HIDALGO, 2013).

En esta investigación se trabajo con velocidades de 300, 400, 500, 550, 600 y 700 mm /min, para conseguir una velocidad constante se ajusto el portaelectrodo a un pirotomo que es un dispositivo que se utiliza para cortar metales mediante plasma a velocidad constante, con este dispositivo se garantiza que la velocidad de avance sea constante lo cual se muestra en la Figura 6.

Previamente se va regulando la velocidad en el dial de velocidad como se puede ver en la Figura 7.

Figura 6. Punteado previo de las probetas antes de la soldadura.



Fuente: Autor

Figura 7. Dial del pirotomo donde se regula la velocidad de avance



Fuente: Autor

Figura 8. Probetas soldadas en las que se muestra su designación



Fuente: Autor

Figura 9. Probetas soldadas donde se puede apreciar los cráteres al inicio y final



Fuente: Autor

Como tanto al inicio del cordón y al final se forman cráteres, se eliminan estos bordes, mediante corte por plasma y se deja en el tamaño adecuado para el ensayo de tracción.

#### 4.4 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es ampliamente utilizado en la Ingeniería debido a la importante información que se obtiene. Este ensayo se lo puede realizar en diferentes tipos de materiales pero principalmente se le utiliza en metales y aleaciones.

Con este ensayo dependiendo del tipo de fractura y los resultados obtenidos en el diagrama esfuerzo-deformación se conoce la resistencia y la ductilidad del material sometido a la prueba.

El valor que obtenemos de resistencia es útil para el diseño y los datos de ductilidad da la medida de cuanta deformación puede resistir el material sin que colapse.

El ensayo consiste en someter a una probeta a fuerzas de tracción con velocidad constante que van siendo aumentadas de acuerdo a la necesidad y capacidad que tenga el equipo, en cada punto de estudio se toma datos de fuerza y deformación este proceso continua hasta que la probeta llegue a la rotura.

El diámetro o superficie transversal de la probeta es medido antes del ensayo.

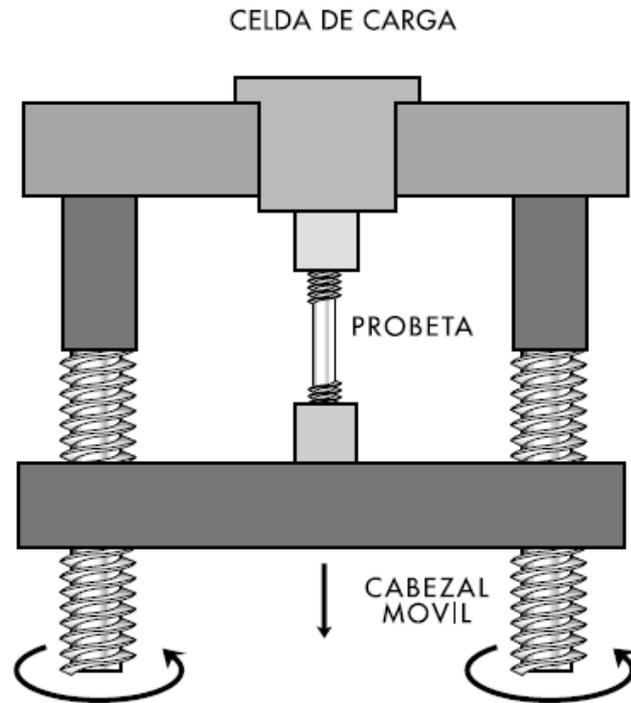
Las propiedades mecánicas que se obtiene de este ensayo son:

- Módulo de Elasticidad
- Limite elástico convencional del 0,2 por 100
- Resistencia a la tracción
- Porcentaje de alargamiento a fractura
- Porcentaje de estricción a fractura (SMITH, 2004)

Además si se analiza la forma de la fractura de la probeta se puede determinar si el material es dúctil o frágil, cuando el ángulo de corte es aproximadamente de  $45^\circ$  se puede decir que el material es dúctil y cuando el ángulo es aproximadamente recto se dice que el material es frágil.

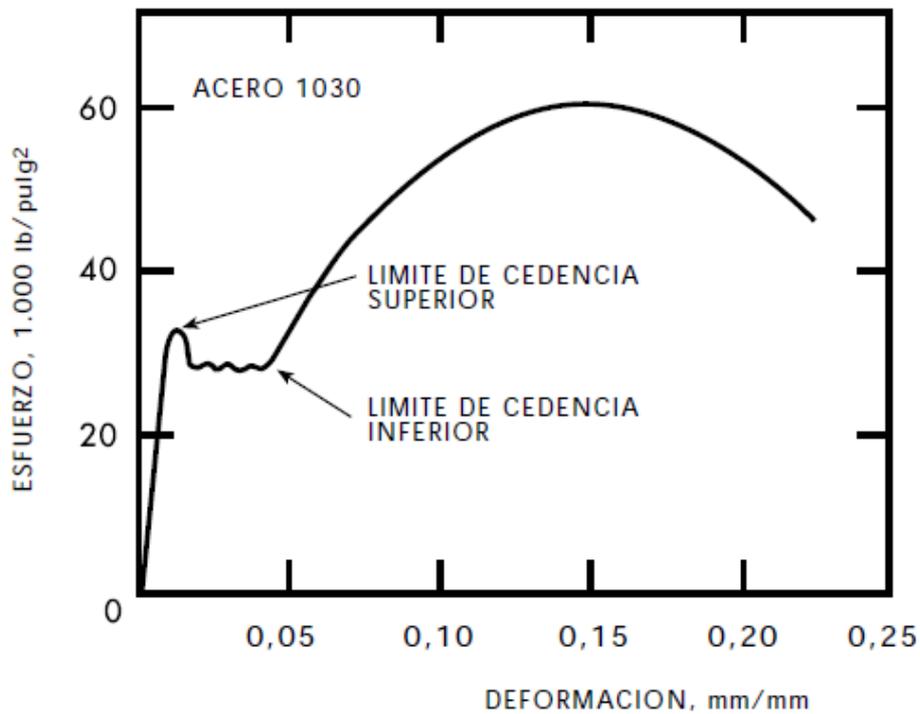
Se va a tener que las probetas fracturadas no va a tener exactamente los  $45^\circ$  o  $90^\circ$  después que se realice el ensayo de tracción por lo que se debe realizar un análisis para determinar que tipo de material se tiene, si tenemos un material dúctil o un material frágil.

Figura 10. Esquema de una máquina para ensayos de tracción



Fuente: GERDAU AZA. Compendio de normas para la producción del Acero, Chile, pág. 7

Figura 11. Esquema del diagrama esfuerzo-deformación



Fuente: GERDAU AZA. Compendio de normas para la producción del Acero, Chile, pág. 7

- Identificación de las probetas. Para la identificación de las probetas se utilizó un código de cuatro dígitos.

Los tres primeros dígitos representan la velocidad de avance (mm/min.) y el último dígito permite diferenciar las probetas de un mismo grupo. Ej: probeta 300-3, los tres primeros dígitos indican que la velocidad de avance de esa probeta fue de 300 mm/min, y que es la tercera probeta de ese grupo (Figura 12).

- Toma de medidas iniciales a las probetas. Con un calibrador se verificó el espesor (4,78 mm ) y luego el ancho de las probetas, con cuyos datos se determinó el área de la sección transversal y finalmente la tensión.

Figura 12. Identificación de las probetas



Fuente: Autor

Tabla 3. Características dimensionales de las probetas utilizadas en el ensayo de tracción

Velocidad(mm/min)	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área(mm <sup>2</sup> )
300-1	21,45	4,78	102,53
300-2	20,5	4,78	97,99
300-3	22,15	4,78	105,88
400-1	21,8	4,78	104,204
400-2	20,3	4,78	97,03
400-3	21,5	4,78	102,77
500-1	20,4	4,78	97,51
500-2	21,1	4,78	100,86
500-3	22,8	4,78	108,98
550-1	20,9	4,78	99,90
550-2	21,2	4,78	101,34
550-3	22	4,78	105,16
600-1	21,8	4,78	104,204
600-2	21,6	4,78	103,25
600-3	21,5	4,78	102,77
700-1	21,1	4,78	100,86
700-2	20,7	4,78	98,95
700-3	21,75	4,78	103,97

Fuente: Autor

- Marcación de las probetas. Se procedió a marcar una distancia de referencia de 2,5 cm a cada lado del eje de las soldaduras, con fin de obtener la longitud de ensayo, en estos puntos se realizan marcas con un punzón, de tal forma que se formen pequeños agujeros para referencia en el momento de colocar el deformímetro.
- Ensamble de implementos a la máquina universal para realizar el Ensayo de Tracción. Se colocan previamente los implementos como mordazas y dentro de estos se montan las probetas. Previamente se miden 8 cm hasta el centro de la probeta a cada lado del cordón y se trazan líneas de referencia para introducir el resto dentro de las mordazas.
- Ajuste de las probetas en las mordazas. Las probetas se ajustan de forma adecuada, para evitar cualquier inconveniente durante el ensayo con la herramienta correspondiente.
- Instalación del deformímetro. Se coloca el deformímetro paralelo a la probeta, haciendo coincidir su dispositivo de sujeción con los agujeros creados en el paso 3.

- Encendido de la máquina universal. Se enciende la máquina universal
- Aplicación de la precarga. Se aplica una precarga a la probeta para asegurar su fijación
- Verificación del procedimiento. Se verifica el cumplimiento de todos los pasos.
- Carga de ensayo de forma gradual. Se aplica una carga de manera gradual y se toma las mediciones de las deformaciones cada 100 kgf.
- Fractura. En este punto se obtiene la resistencia última del material.
- Desmontaje. Las dos partes de la probeta se desajustan de las mordazas de la máquina universal.
- Mediciones finales. Se toman las mediciones finales de la probeta sometida al ensayo para su posterior estudio.
- Obtención de la gráfica Esfuerzo-Deformación. Con los datos obtenidos se realiza la curva esfuerzo-deformación de la probeta analizada.

En la norma ANSI/AWS B4.0 se detallan los requisitos para las pruebas mecánicas de las soldaduras. Una parte de la presente norma describe el ensayo de tracción de las soldaduras. El ensayo de tracción se puede realizar en probetas de corte transversal o longitudinal a la línea central de la soldadura. El resultado deseado por lo general se limita a conocer el valor de la resistencia máxima debido a que estas muestras no son homogéneas. Los ensayos deben llevarse a cabo de acuerdo a los requisitos de la norma ASTM E8.

El equipo para realizar los ensayos puede que necesite adaptadores y accesorios para probetas de distintos tipos ya sean planas o cilíndricas. El procedimiento utilizado para hacer este ensayo se basa en la norma ASTM B557.

#### **4.5 Pruebas de dureza en la zona afectada por la soldadura**

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la rayadura o a la deformación plástica. En la práctica es común realizar pruebas de dureza para conocer esta propiedad.

Se tiene diferentes métodos para determinar de dureza y microdureza por la gran variedad de materiales existentes, entre los más importantes están el Brinell, Rockwell y Vickers.

En este caso, debido a que la longitud de la zona afectada por el calor es muy pequeña, se utilizó un micro durómetro Vickers, que como se sabe está provisto de un indentador de diamante de forma piramidal de base cuadrada, dependiendo del material se pueden utilizar diferentes cargas que van de 10 a 1000 gramos. Esta prueba tiene la ventaja de permitir obtener un rango amplio de medidas.

La ecuación que relaciona las medidas de las diagonales de la huella dejadas por el indentador piramidal y la carga con el objetivo de obtener la dureza es la siguiente:

$$HV = \frac{1,854F}{D^2} \quad (1)$$

Dónde:

F = Carga (kg).

D = Promedio de las dos diagonales (mm).

El procedimiento utilizado para realizar esta prueba se basa en la norma ASTM E92. Esta especificación se aplica a la determinación de la dureza Vickers. A partir de las especificaciones de esta norma se desarrolla el siguiente procedimiento:

- Preparación de la superficie. La superficie a ensayar fue previamente pulida y atacada.
- Selección de la carga de ensayo. En este caso por tratarse de un material dúctil se trabajó con cargas de 100 g.
- Identificación del eje de soldadura. En el centro de la soldadura se trazó una línea de referencia a partir de la cual se realizarían las mediciones hasta alcanzar una dureza constante.
- Ajuste de la distancia entre probeta e indentador. Mediante un lente ocular se determina la distancia adecuada para la aplicación del indentador y es aquella en la que se puede observar con la mejor nitidez los microconstituyentes del material.
- Aplicación de la carga de prueba. Se aplica la carga de 100 kg y se deja que actúe sobre el material durante un tiempo de aproximadamente 12,5 s.
- Medición de las diagonales de la huella. Mediante un ocular graduado se mide las dos diagonales de la huella y se obtiene su promedio.

- Obtención del valor de dureza. Con el dato de la diagonal promedio se ingresa a una tabla y se obtiene la dureza Vickers correspondiente.
- Espacio entre huellas. Las mediciones se realizaron cada 0,2 mm.

#### **4.6 Examen metalográfico**

La metalografía es el estudio de la estructura y micro constituyentes de los metales y aleaciones.

El examen metalográfico es muy utilizado en ingeniería, porque permite visualizar por medio de la microscopía óptica u electrónica, las características microestructurales de un metal o aleación, además permite determinar su tratamiento térmico o mecánico y así predecir el comportamiento del material estudiado para cualquier futura aplicación.

El procedimiento para la preparación de las muestras, se lo desarrolló en base a las especificaciones de la norma ASTM E3 y es el siguiente:

- Selección de las muestras metalográficas. Para el análisis metalográfico se preparo una muestra para cada velocidad y una probeta del material base sin soldadura.
- Corte de las muestras. Mediante la cortadora de disco Discotom del laboratorio de materiales, se cortaron las muestras del tamaño adecuado que permita su fácil manipulación sobre todo durante el desbaste y pulido.
- Desbaste de las muestras. El desbaste de las muestras se la realizó en una lijadora manual de cuatro carriles del mismo laboratorio. Empezando con una lija 220, 320, 500 y 1000 partículas abrasivas por pulgada.
- Pulido. El pulido se lo realizó en una pulidora de disco que contiene un paño, al cual se lo añadió pasta de alúmina, hasta que la superficie de la muestra adquiriera el aspecto de espejo.
- Ataque químico. El ataque químico es una oxidación que permite visualizar la microestructura de las probetas. Del catálogo de la LECO CORPORATION se selecciona un reactivo de ataque para aleaciones de aluminio de la serie 5000, siendo recomendado el Keller, cuya composición es:
  - 2ml HF
  - 3ml HCl

- 5 ml HNO<sub>3</sub>
- 190 ml de agua destilada

El tiempo de ataque recomendados es 20 segundos, y se lo aplica con un algodón impregnado de reactivo. Para la determinación del reactivo se tiene en consideración al material y el objetivo buscado por el ataque. Existen las normas ASTM E 304 para macroataque y la E 407 para microataque.

- Observación. En esta etapa se procede a la observación de los microconstituyentes de la unión soldada bajo el microscopio óptico.

#### 4.7 Determinación de la energía aportada a las diferentes velocidades de avance

Para la determinación de la energía aportada se utiliza la siguiente ecuación (referencia):

$$HI = \frac{A \cdot U \cdot \beta}{VS} \left( \frac{J}{mm} \right) \quad (2)$$

Dónde:

HI = Aporte térmico (J/mm).

$\beta$  = Factor de Aprovechamiento (adimensional)

Vs = Velocidad de Avance (mm/seg)

U = Voltaje (V)

A = Intensidad de Corriente (A)

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 300 mm/min = 5 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{5mm}{s}}$$

$$HI = 592 \frac{J}{mm}$$

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 400 mm/min = 6,67 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{6,67mm}{s}}$$

$$HI = 443,78 \frac{J}{mm}$$

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 500 mm/min = 8,33 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{8,33mm}{s}}$$

$$HI = 355,34 \frac{J}{mm}$$

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 550 mm/min = 9,17 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{9,17mm}{s}}$$

$$HI = 322,8 \frac{J}{mm}$$

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 600 mm/min = 10 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{10mm}{s}}$$

$$HI = 296 \frac{J}{mm}$$

Cálculo de Aporte térmico para probeta soldada a 700 mm/min = 11,67 mm/s

$$HI = \frac{148A \cdot 25V \cdot 0,8}{\frac{11,67mm}{s}}$$

$$HI = 253,64 \frac{J}{mm}$$

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los datos por si solos tienen limitada importancia, por lo que deben ser analizados e interpretados. La finalidad del análisis es resumir los resultados de tal forma que den respuesta a las interrogantes de la investigación. La interpretación es buscar la correlación entre variables.

#### 5.1 Análisis e interpretación de los resultados del ensayo de tracción

Las ecuaciones utilizadas para encontrar las propiedades en la curva esfuerzo-deformación son las siguientes:

$$\% \text{ Elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (3)$$

Dónde:

$L_f$  corresponde a la longitud final (mm) y  $L_o$  a la longitud inicial (mm).

$$\% \text{ Reducción de Área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (4)$$

Dónde:

$A_o$  es el área inicial ( $\text{mm}^2$ ) y  $A_f$  el área final ( $\text{mm}^2$ ).

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (5)$$

Dónde:

$\sigma$  es el esfuerzo ( $\text{Kg/mm}^2$ ),  $F$  la carga aplicada ( $\text{Kg}$ ) y  $A_o$  ( $\text{mm}^2$ ).

$$e = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (6)$$

Dónde:

$e$  es la deformación,  $L$  longitud en cualquier lugar de estiramiento.

$$\sigma = Ee \quad (7)$$

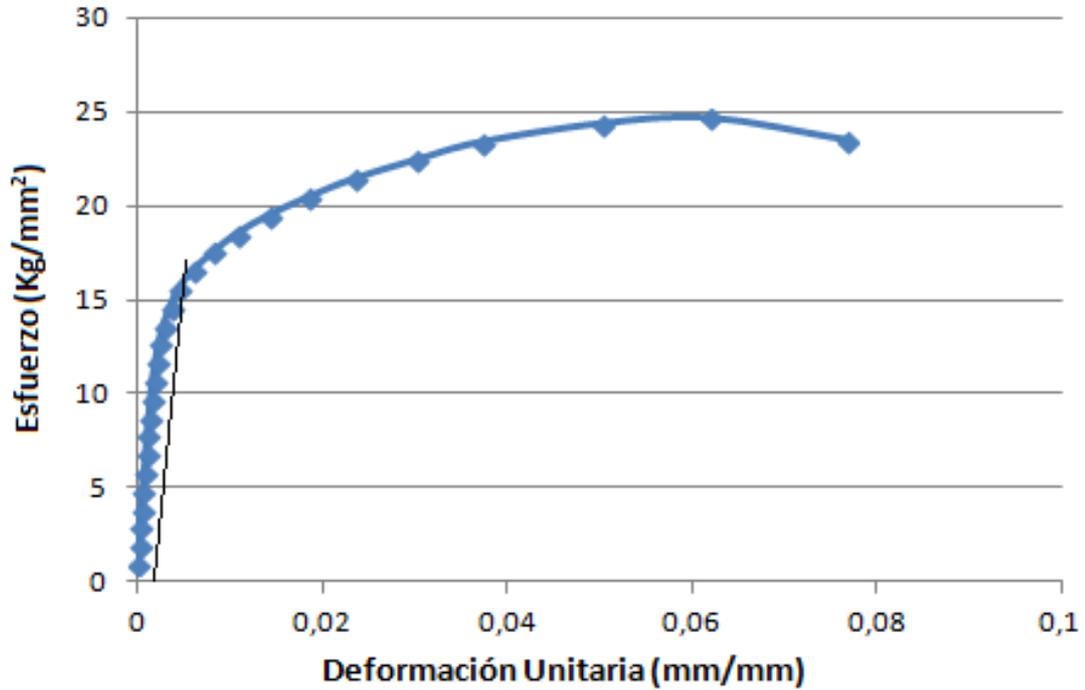
Dónde:

$E$  es el módulo de elasticidad ( $\text{Kg/mm}^2$ ).

**5.1.1** Velocidad: 300 mm/min

**5.1.1.1** Probeta 300-1.

Figura 13. Curva tensión deformación de la probeta 300-1



Fuente: Autor

De la Figura 13, se puede observar un comportamiento dúctil del material base, pero en el cordón la fractura presenta un aspecto parcialmente frágil, posiblemente debido a la pérdida de Mg en los microconstituyentes presentes por la alta energía aportada a la soldadura.

Tabla 4. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-1

% Elongación	6,23	%Reducción de Área	3,87
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8716	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,375
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	24,68		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 300-1, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente frágil, por que el ángulo de la superficie de fractura es casi recto, a lo largo de toda el ancho de la probeta.

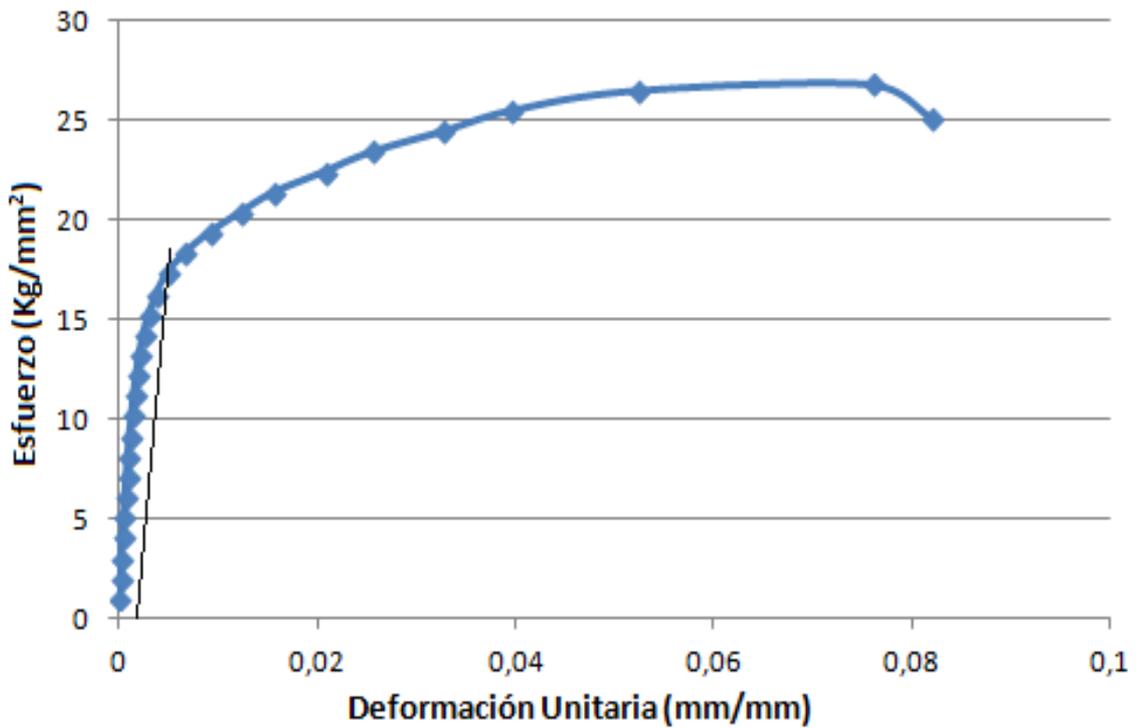
Figura 14. Aspecto de la fractura de la probeta 300-1



Fuente: Autor

5.1.1.2 *Probeta 300-2*

Figura 15. Curva tensión deformación de la probeta 300-2



Fuente: Autor

Tabla 5. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-2

% Elongación	8,19	%Reducción de Área	6,47
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8745	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,8
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,84		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 300-2, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente dúctil, por que el ángulo de la superficie de fractura es casi  $30^\circ$ , a lo largo de toda el ancho de la probeta.

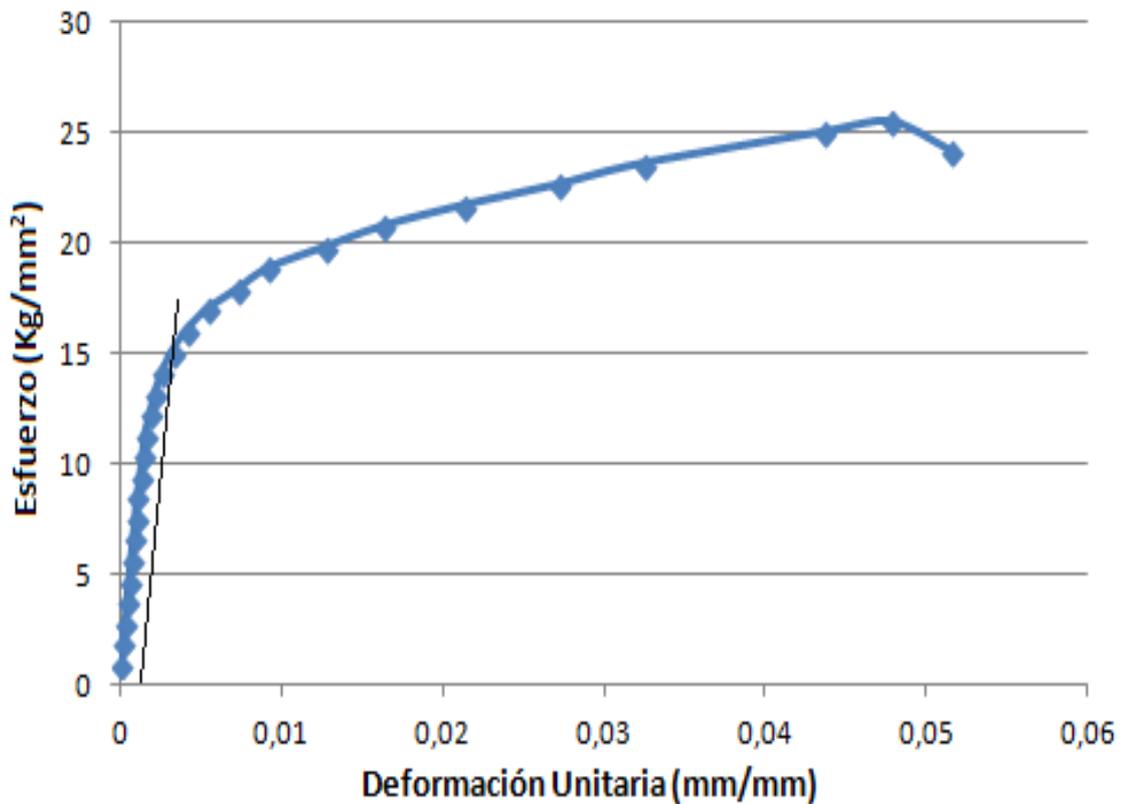
Figura 16. Aspecto de la fractura de la probeta 300-2



Fuente: Autor

### 5.1.1.3 Probeta 300-3

Figura 17. Curva tensión deformación de la probeta 300-3



Fuente: Autor

Tabla 6. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 300-3

% Elongación	5,15	%Reducción de Área	3,5
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8860	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	15
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	25,5		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** Del análisis de la fractura de la probeta 300-3, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la superficie de fractura alcanza un ángulo de 30° respecto al eje de tracción.

Figura 18. Aspecto de la fractura de la probeta 300-3



Fuente: Autor

Las probetas soldadas con la velocidad de avance de 300 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura es inferior a 30° con lo que se puede decir que la fractura para estas probetas es dúctil en gran parte de la superficie de fractura.

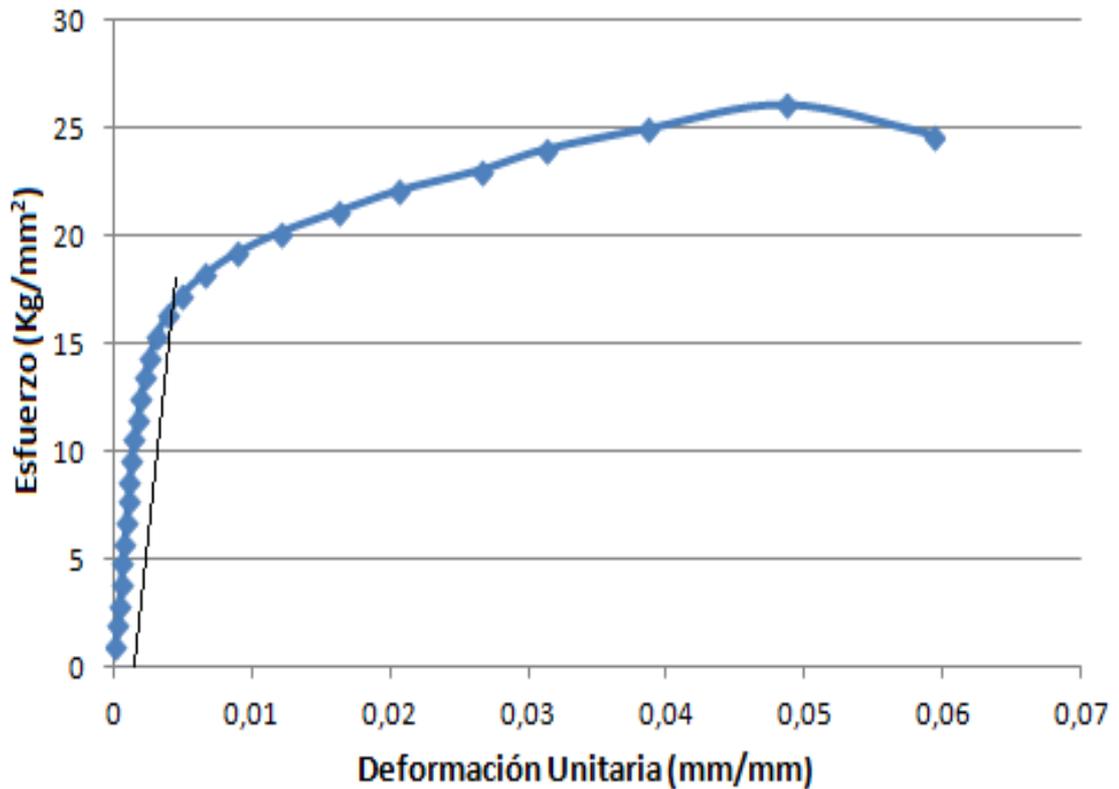
De esto se puede deducir que la deformación plástica se dio por el mecanismo de deslizamiento, es decir que una porción de átomos se deslizo sobre otra según el ángulo mencionado que vendría a representar la orientación del plano principal de deslizamiento.

Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 300mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 16,39 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 25,67 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 4,61 y el porcentaje de elongación es de 6,52.

5.1.2 Velocidad: 400 mm/min

5.1.2.1 Probeta 400-1

Figura 19. Curva tensión deformación de la probeta 400-1



Fuente: Autor

Tabla 7. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400-1

% Elongación	5,92	%Reducción de Área	3,84
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8400	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,625
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,06		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 400-1, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente frágil, por que el ángulo de la superficie de fractura es casi recto, a lo largo de toda el ancho de la probeta.

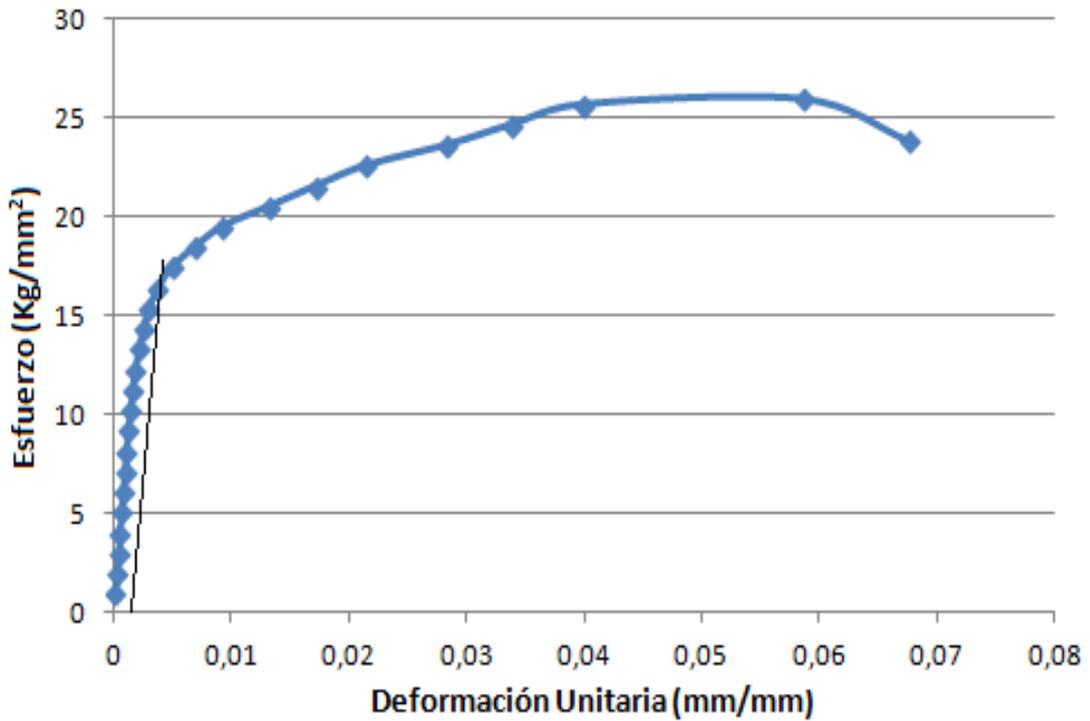
Figura 20. Aspecto de la fractura de la probeta 400-1



Fuente: Autor

5.1.2.2 *Probeta 400-2.*

Figura 21. Curva tensión deformación de la probeta 400-2



Fuente: Autor

Tabla 8. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400- 2

% Elongación	6,77	%Reducción de Área	4,19
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7583	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,02		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente dúctil debido a que la fractura alcanza un ángulo de  $45^\circ$  respecto al eje de tracción, a pesar que este ángulo es tan solamente en un 50 % del ancho total.

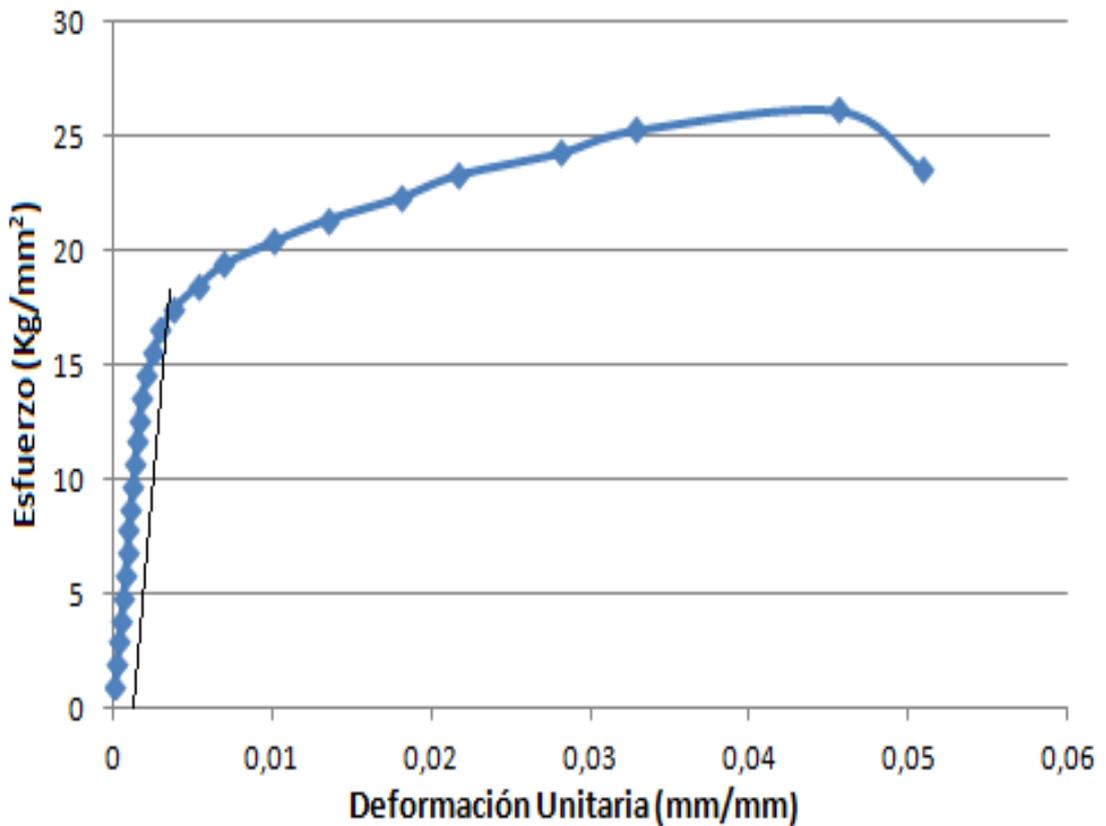
Figura 22. Aspecto de la fractura de la probeta 400-2



Fuente: Autor

### 5.1.2.3 Probeta 400-3

Figura 23. Curva tensión deformación de la probeta 400-3



Fuente: Autor

Tabla 9. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 400-3

% Elongación	5,09	% Reducción de Área	3,96
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8431	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,25
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,17		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 400-3, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de 45° respecto al eje de tracción, a pesar que tan solamente en un 30 % del ancho total.

Figura 24. Aspecto de la fractura de la probeta 400-3



Fuente: Autor

De las probetas soldadas con la velocidad de avance de 400 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura es de 45° pero solo en un 40% de la probeta en resto de superficie tiene un ángulo de fractura inferior a los 30°.

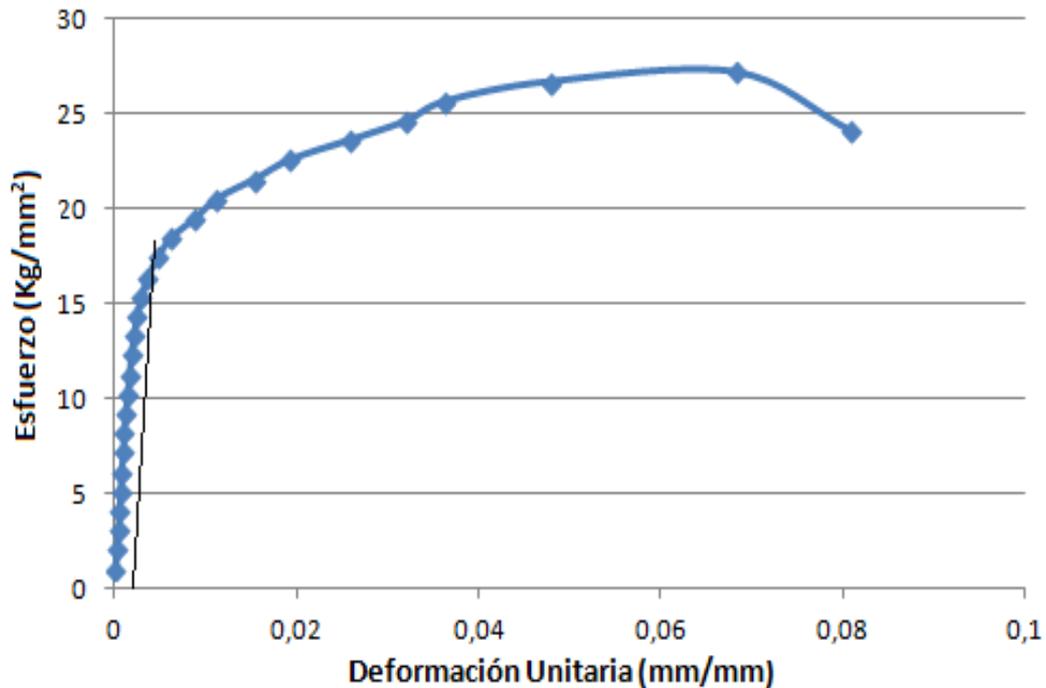
Además el perfil transversal de la fractura es curvo con lo que se puede decir que en el centro la probeta es más dúctil que en los extremos.

Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 400mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 16,96 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 26,08 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 3,99 y el porcentaje de elongación es de 5,93.

5.1.3 Velocidad: 500 mm/min

5.1.3.1 Probeta 500-1

Figura 25. Curva tensión deformación de la probeta 500-1



Fuente: Autor

Tabla 10. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500-1

% Elongación	8,07	%Reducción de Área	6,05
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7873	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,375
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	27,18		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 500-1, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque se puede apreciar deslizamiento por deformación plástica, a pesar que el ángulo respecto al eje de tracción es casi recto al comienzo y al final, y en el centro es de 45°.

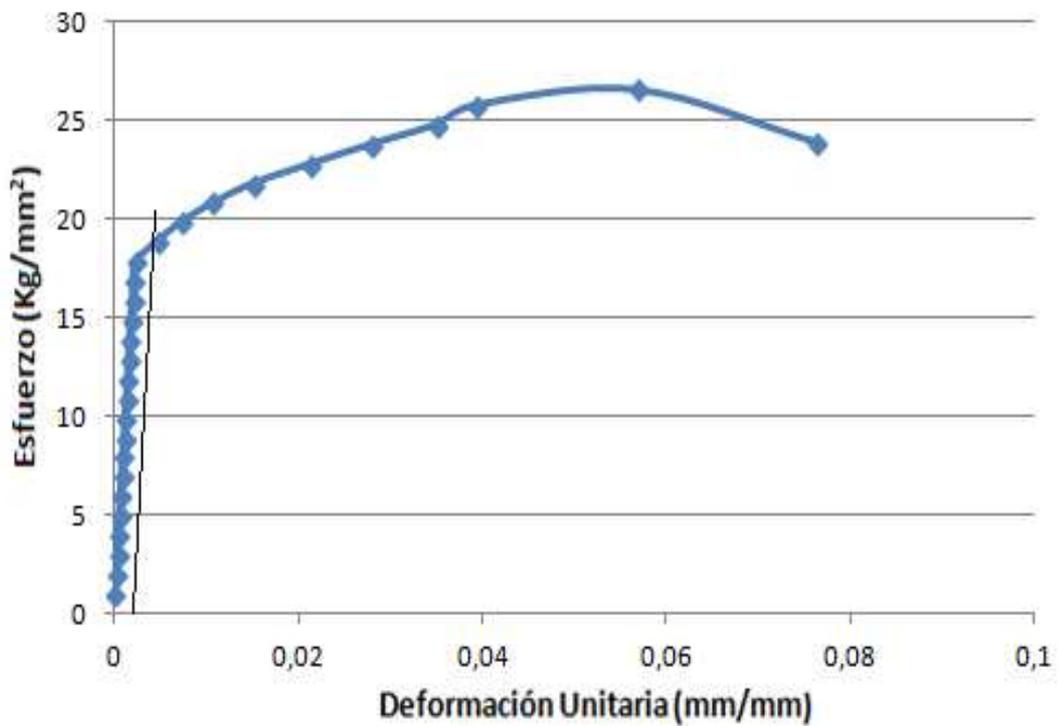
Figura 26. Aspecto de la fractura de la probeta 500-1



Fuente: Autor

5.1.3.2 *Probeta 500-2*

Figura 27. Curva tensión deformación de la probeta 500-2



Fuente: Autor

Tabla 11. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500- 2

% Elongación	7,63	%Reducción de Área	6,52
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8064	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	18,75
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,57		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 500-2, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque se puede apreciar deformación plástica por deslizamiento a  $45^\circ$ , respecto al eje de tracción, se puede ver que alrededor del 75% de la fractura es dúctil.

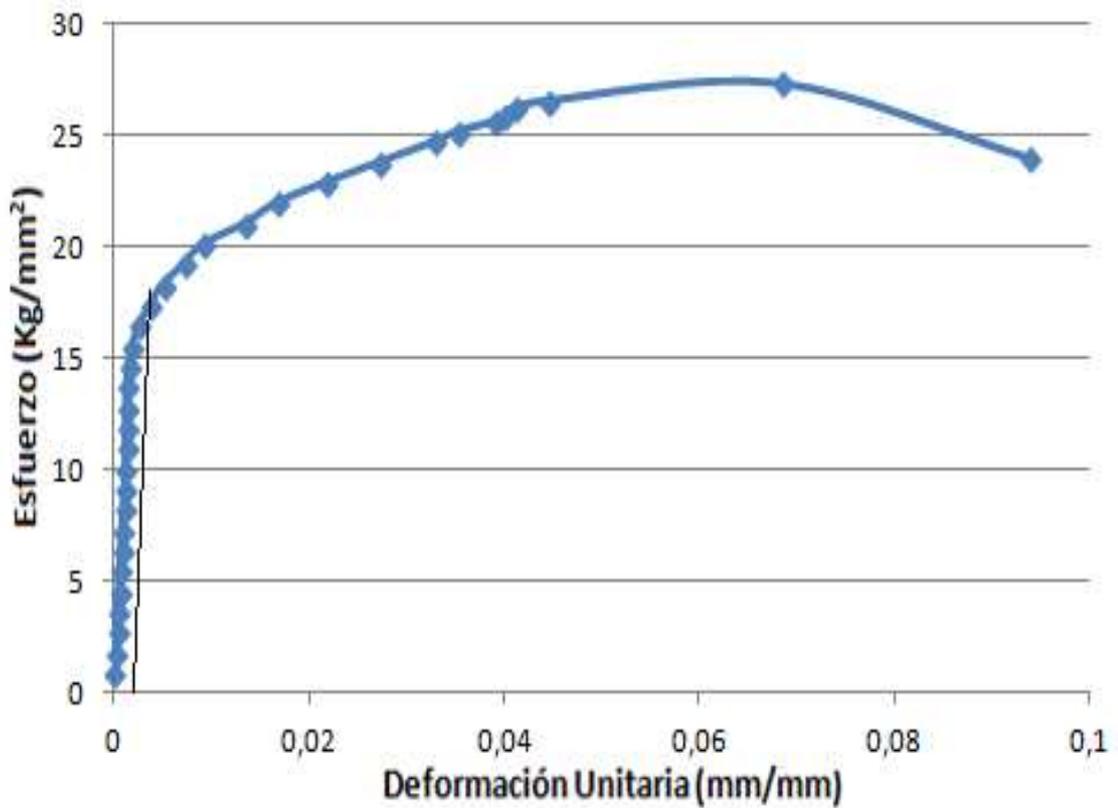
Figura 28. Aspecto de la fractura de la probeta 500-2



Fuente: Autor

### 5.1.3.3 Probeta 500-3.

Figura 29. Curva tensión deformación de la probeta 500-3



Fuente: Autor

Tabla 12. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 500-3

% Elongación	9,39	% Reducción de Área	7,8
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7789	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,375
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	27,4		

Fuente: Autor

**Tipo de Fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 500-3, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de 45° respecto al eje normal de tracción.

Figura 30. Aspecto de la fractura de la probeta 500-3



Fuente: Autor

De las probetas soldadas con la velocidad de avance de 500 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura es aproximadamente de 45°, no toda el área de la fractura está a 45° pero si se puede observar que en las tres probetas supera el 75% del área por lo que se puede decir que la fractura es dúctil.

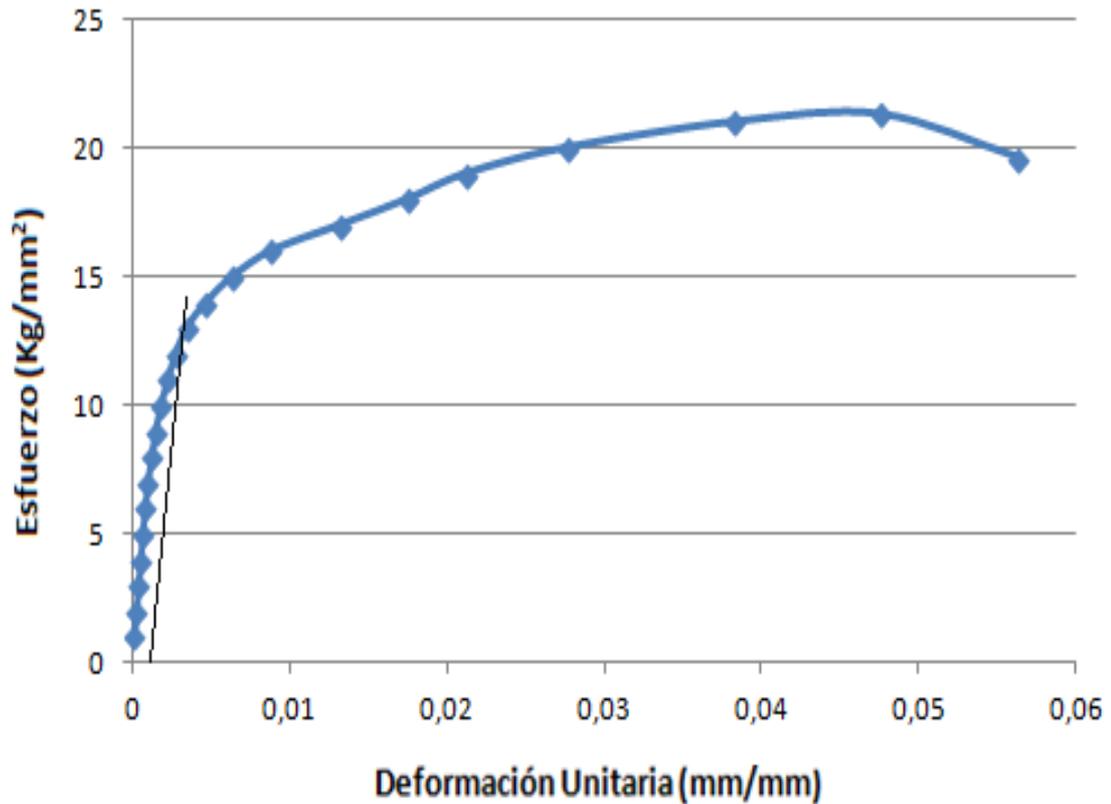
Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 500mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 17,83 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 27,05 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 6,79 y el porcentaje de elongación es de 8,36.

Esta serie de probetas es la que mejores características ha presentado de todas las series ensayadas.

5.1.4 Velocidad: 550 mm/min

5.1.4.1 Probeta 550-1

Figura 31. Curva tensión deformación de la probeta 550-1



Fuente: Autor

Tabla 13. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-1

% Elongación	5,31	% Reducción de Área	5,9
Módulo de Elasticidad (Kg/mm <sup>2</sup> )	7932	Resistencia a la Cedencia Sy (Kg/mm <sup>2</sup> )	16,75
Resistencia a la Tracción Sut (Kg/mm <sup>2</sup> )	24,32		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 550-1, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de 45° respecto al eje normal de tracción.

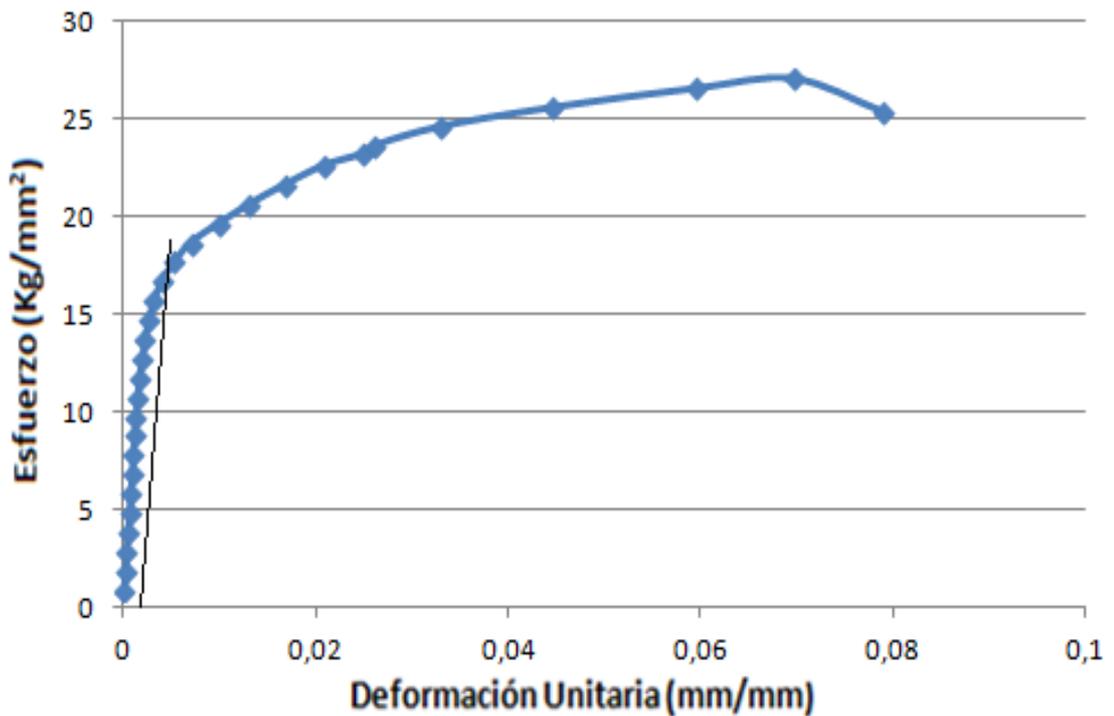
Figura 32. Aspecto de la fractura de la probeta 550-1



Fuente: Autor

#### 5.1.4.2 Probeta 550-2

Figura 33. Curva tensión deformación de la probeta 550-2



Fuente: Autor

Tabla 14. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-2

% Elongación	7,89	%Reducción de Área	6,77
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7221	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,375
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	27,13		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 550-2, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de  $45^\circ$  respecto al eje normal de tracción, se puede apreciar que la mayor parte del área de fractura esta a  $45^\circ$

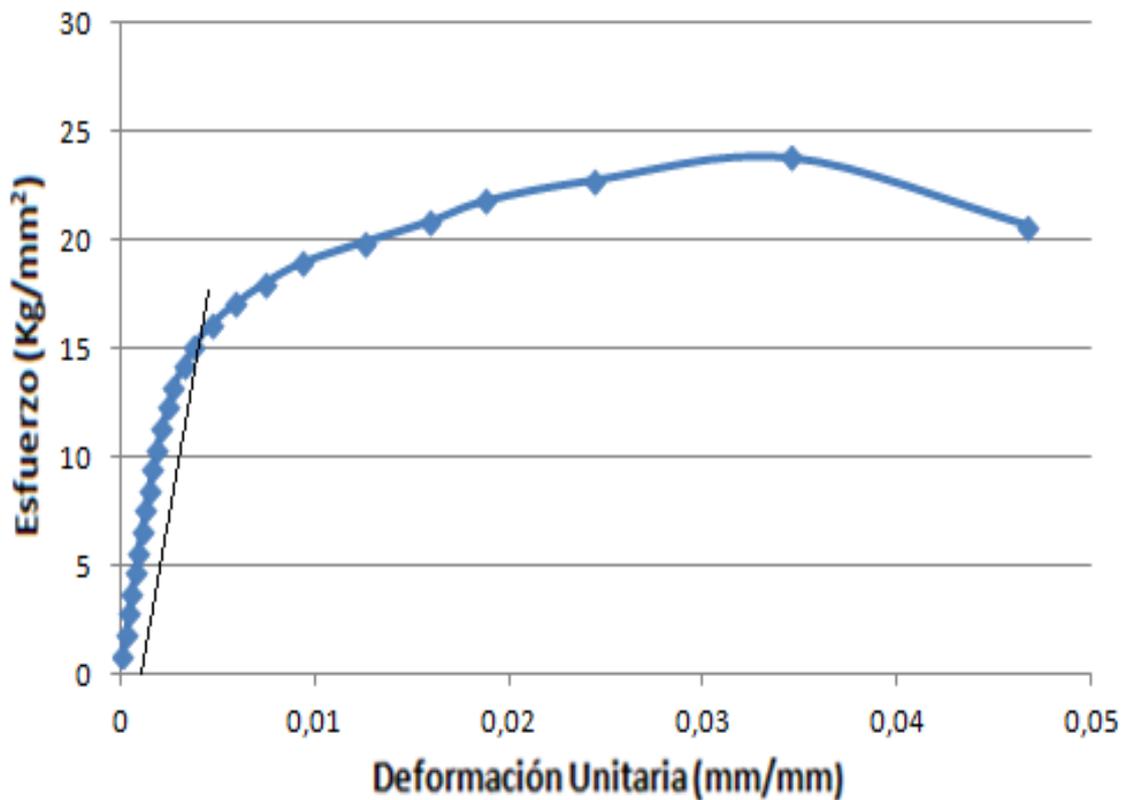
Figura 34. Aspecto de la fractura de la probeta 550-2



Fuente: Autor

#### 5.1.4.3 Probeta 550-3

Figura 35. Curva tensión deformación de la probeta 550-3



Fuente: Autor

Tabla 15. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 550-3

% Elongación	4,67	%Reducción de Área	5,2
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	6722	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	15
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	21,97		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 550-3, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de 45° respecto al eje normal de tracción.

Figura 36. Aspecto de la fractura de la probeta 550-3



Fuente: Autor

De las probetas soldadas con la velocidad de avance de 550 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura es aproximadamente de 45°, no toda el área de la fractura esta a 45° pero si se puede observar que en las tres probetas supera el 70% del área por lo que se puede decir que la fractura es dúctil.

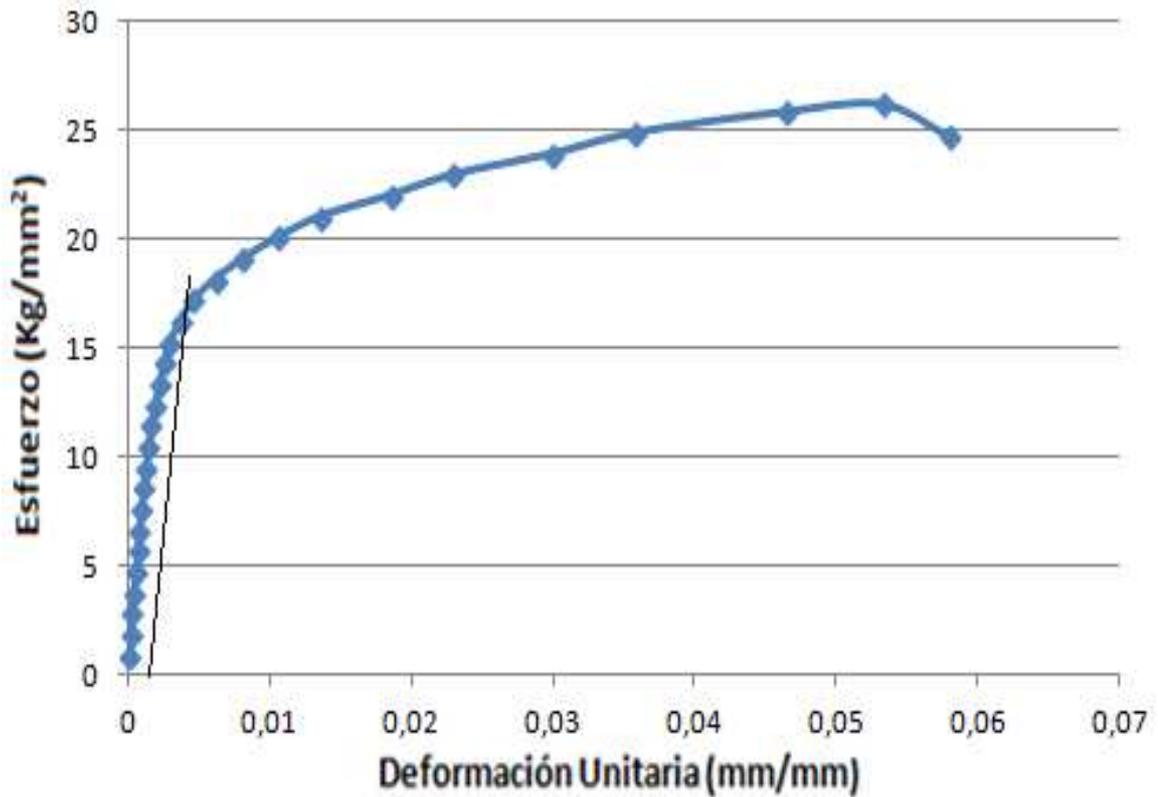
Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 550mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 16,38 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 24,54 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 5,96 y el porcentaje de elongación es de 5,96.

Después de los resultados de la serie de probetas de velocidad de avance de 500 mm/min la velocidad que mejor características presenta es la de 550 mm/min.

5.1.5 Velocidad: 600 mm/min

5.1.5.1 Probeta 600-1

Figura 37. Curva tensión deformación de la probeta 600-1



Fuente: Autor

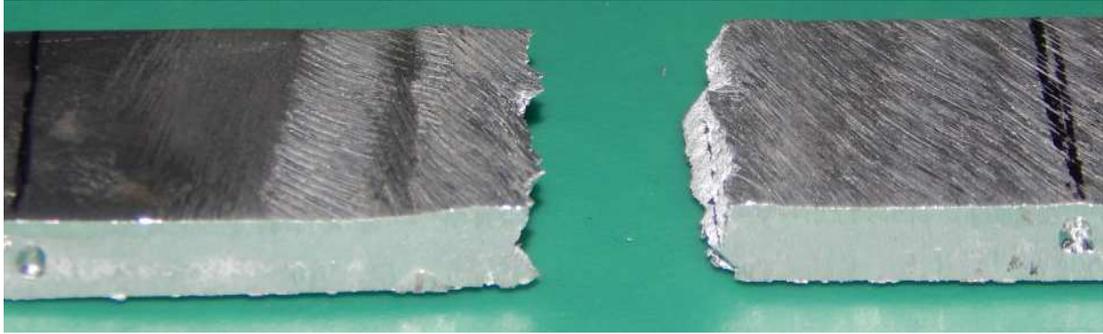
Figura 38. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-1

% Elongación	5,79	%Reducción de Área	8,53
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	9983	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,875
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,24		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 600-1, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil a pesar que la fractura alcanza un ángulo de 30° respecto al eje normal de tracción.

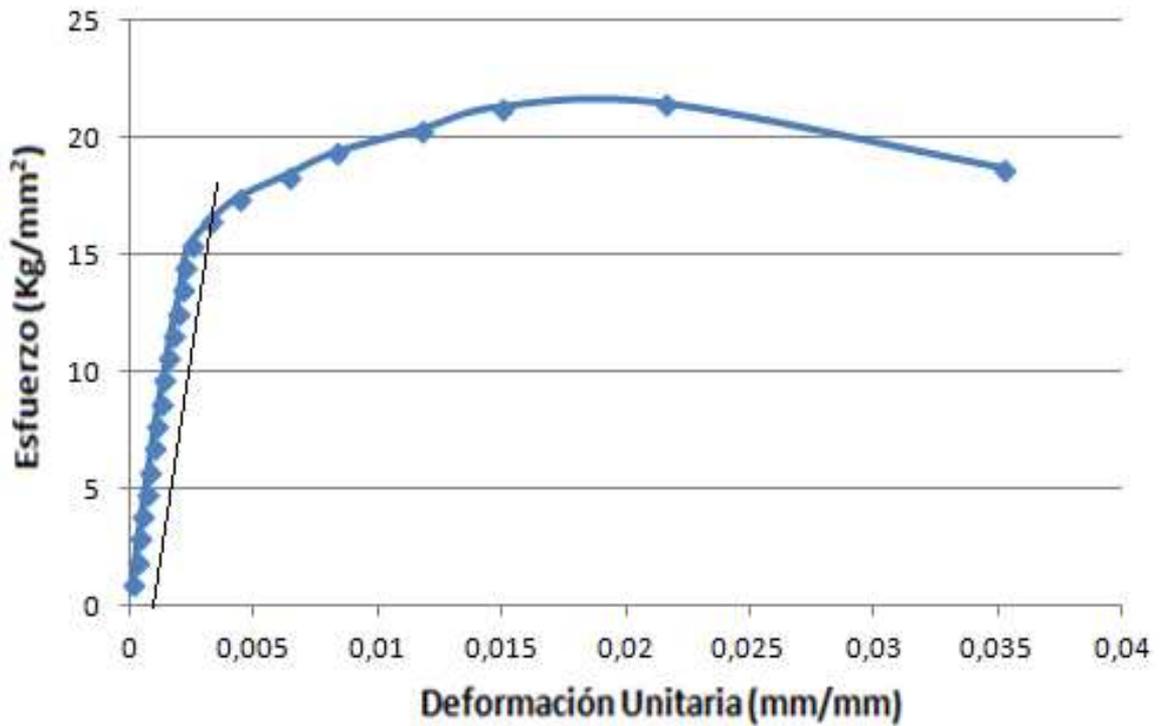
Figura 39. Aspecto de la fractura de la probeta 600-1



Fuente: Autor

5.1.5.2 *Probeta 600-2*

Figura 40. Curva tensión deformación de la probeta 600-2



Fuente: Autor

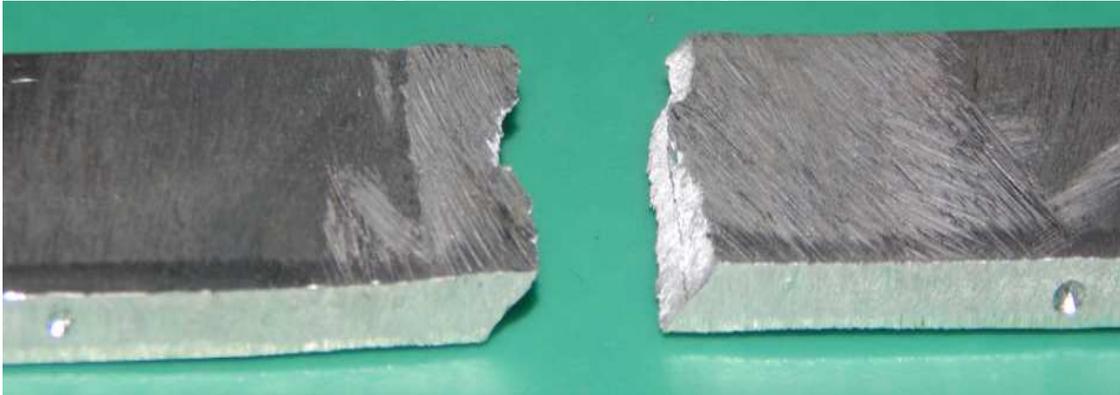
Tabla 16. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-2

% Elongación	3,52	%Reducción de Área	6,04
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7979	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,56
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	21,45		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 600-2, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de  $45^\circ$  respecto al eje normal de tracción.

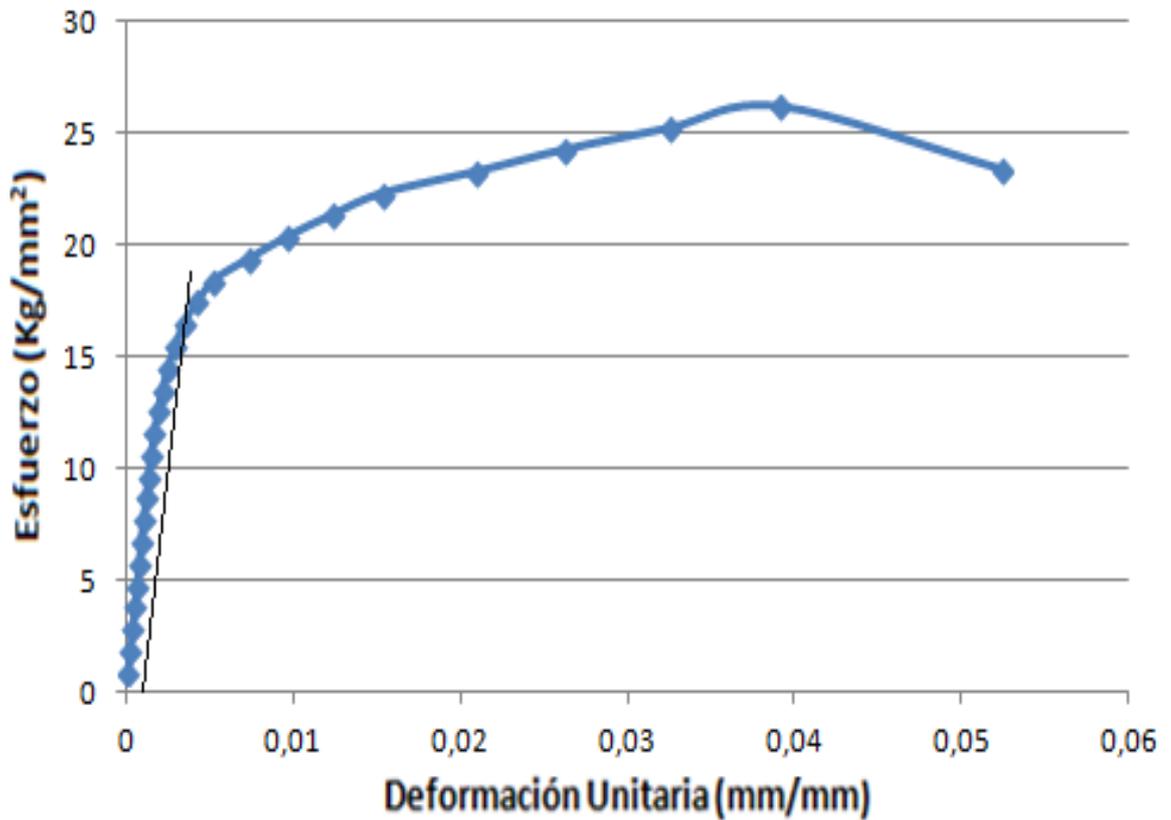
Figura 41. Aspecto de la fractura de la probeta 600-2



Fuente: Autor

### 5.1.5.3 Probeta 600-3

Figura 42. Curva tensión deformación de la probeta 600-3



Fuente: Autor

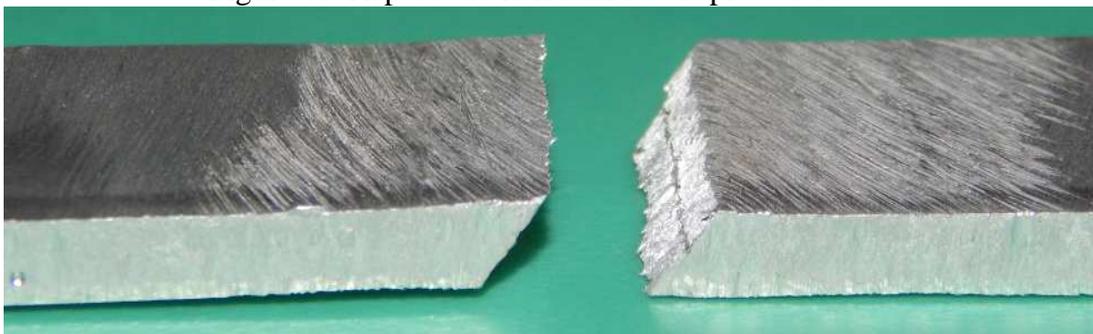
Tabla 17. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 600-3

% Elongación	5,24	%Reducción de Área	5,10
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	8517	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,625
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,27		

Fuente: Autor

**Tipo de Fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 600-3, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la fractura alcanza un ángulo de 45° respecto al eje normal de tracción.

Figura 43. Aspecto de la fractura de la probeta 600-3



Fuente: Autor

De las probetas soldadas con la velocidad de avance de 600 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura es aproximadamente en una es aproximadamente de 90°, en otra probeta tenemos aproximadamente 45° pero no toda el área de la fractura esta a 45% y en la última probeta tenemos una fractura a 45°.

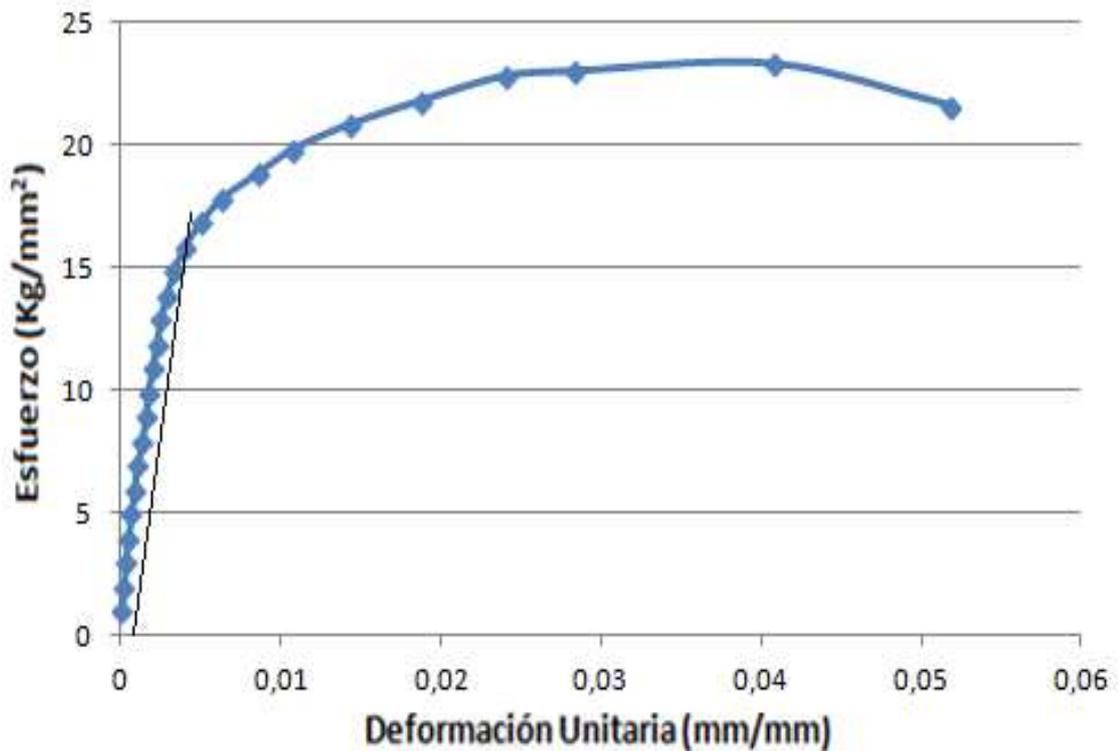
A esta serie de probetas se le podría considerar dúctil pero en una menor proporción.

Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 650mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 16,68 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 24,65 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 6,56 y el porcentaje de elongación es de 4,85.

5.1.6 Velocidad: 700 mm/min

5.1.6.1 Probeta 700-1

Figura 44. Curva tensión deformación de la probeta 700-1



Fuente: Autor

Tabla 18. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-1

% Elongación	5,17	%Reducción de Área	3,68
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7631	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	16,84
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	23,3		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente dúctil porque la superficie de fracturada alcanza aproximadamente un ángulo de 30° respecto al eje de tracción al comienzo, pero luego se presenta un desgarro de fractura frágil.

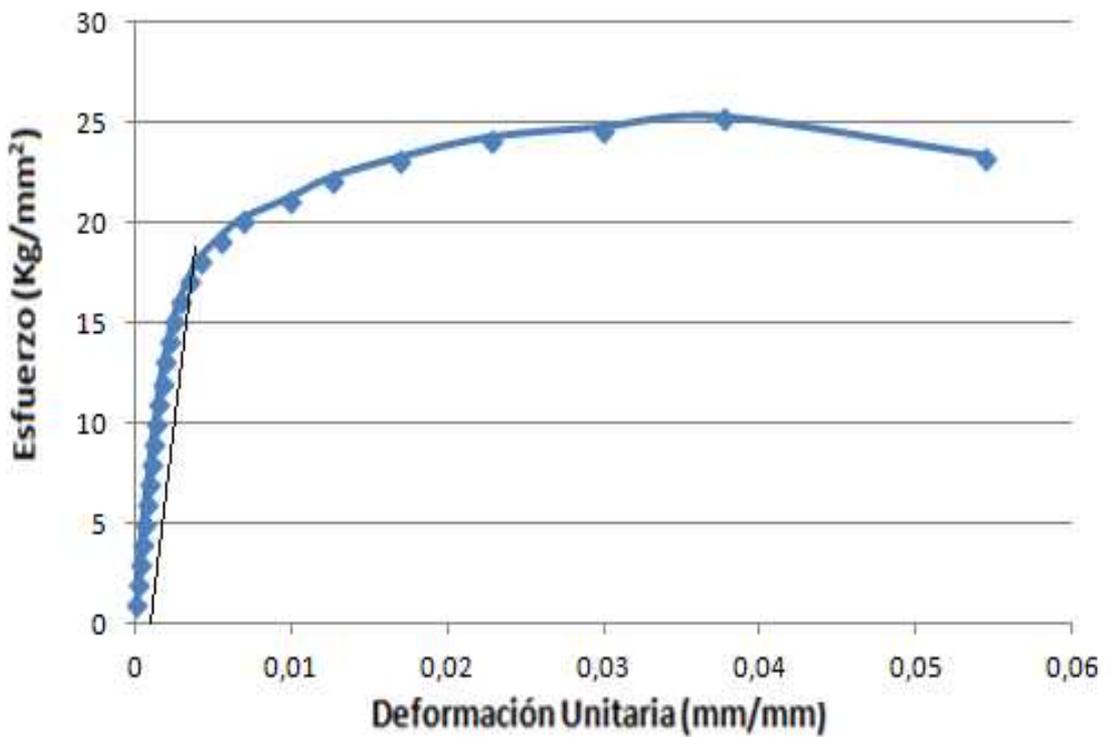
Figura 45. Aspecto de la fractura de la probeta 700-1



Fuente: Autor

5.1.6.2 *Probeta 700-2*

Figura 46. Curva tensión deformación de la probeta 700-2



Fuente: Autor

Tabla 19. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-2

% Elongación	5,44	%Reducción de Área	4,14
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	9678	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	17,75
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	26,28		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 700-2, se puede determinar que el tipo de fractura es parcialmente dúctil porque la superficie de fracturada alcanza aproximadamente un ángulo de  $10^\circ$  respecto al eje de tracción.

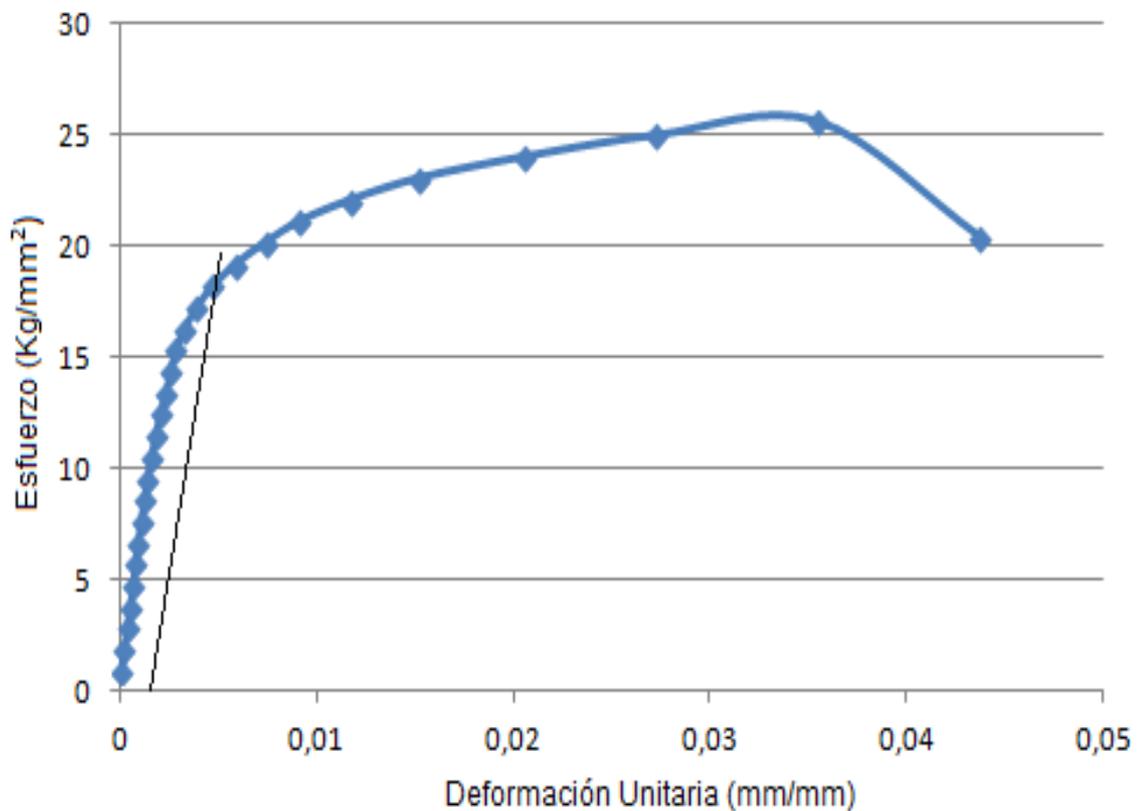
Figura 47. Aspecto de la fractura de la probeta 700-2



Fuente: Autor

### 5.1.6.3 Probeta 700-3

Figura 48. Curva tensión deformación de la probeta 700-3



Fuente: Autor

Tabla 20. Características obtenidas de la curva tensión deformación de la probeta 700-3

% Elongación	4,37	%Reducción de Área	6,42
Módulo de Elasticidad(Kg/mm <sup>2</sup> )	7457	Resistencia a la Cedencia Sy(Kg/mm <sup>2</sup> )	13,375
Resistencia a la Tracción Sut(Kg/mm <sup>2</sup> )	24,67		

Fuente: Autor

**Tipo de fractura.** De la superficie de fractura de la probeta 700-3, se puede determinar que el tipo de fractura es dúctil porque la superficie de fracturada alcanza aproximadamente un ángulo de 30° respecto al eje de tracción, lo es una evidencia de deformación plástica por deslizamiento.

Figura 49. Aspecto de la fractura de la probeta 700-3



Fuente: Autor

De las probetas soldadas con la velocidad de avance de 700 mm/min se puede apreciar que el ángulo de la fractura en el primer caso es de aproximadamente de 30°, en la segunda probeta se aproxima mas a ser un ángulo recto y en la tercera probeta el ángulo de fractura es aproximadamente 30° con todo esto de puede decir que la fractura es la menos dúctil de todas las series.

Los datos promedio de la serie de probetas soldadas a 700 mm/min son: la resistencia a la cedencia de estas probetas es 15,99 kg/mm<sup>2</sup>, su resistencia a la tracción es 24,75 kg/mm<sup>2</sup>, el porcentaje de reducción de área es 4,74 y el porcentaje de elongación es de 4,99.

A continuación se tiene una Tabla en la que se puede visualizar un resumen de datos obtenidos en el ensayo de tracción, para cada velocidad de avance se realizó un promedio de las tres probetas.

Tabla 21. Características promedio de las probetas ensayadas a tracción.

Velocidades de avance (mm/min)	Resistencia a la tracción(Kg/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la cedencia (Kg/mm <sup>2</sup> )	Reducción área (%)	Elongación (%)
300	25,67	16,39	4,61	6,52
400	26,08	16,96	3,99	5,93
500	27,05	17,83	6,79	8,36
550	24,54	16,38	5,96	5,96
600	24,65	16,68	6,56	4,85
700	24,75	15,99	4,74	4,99

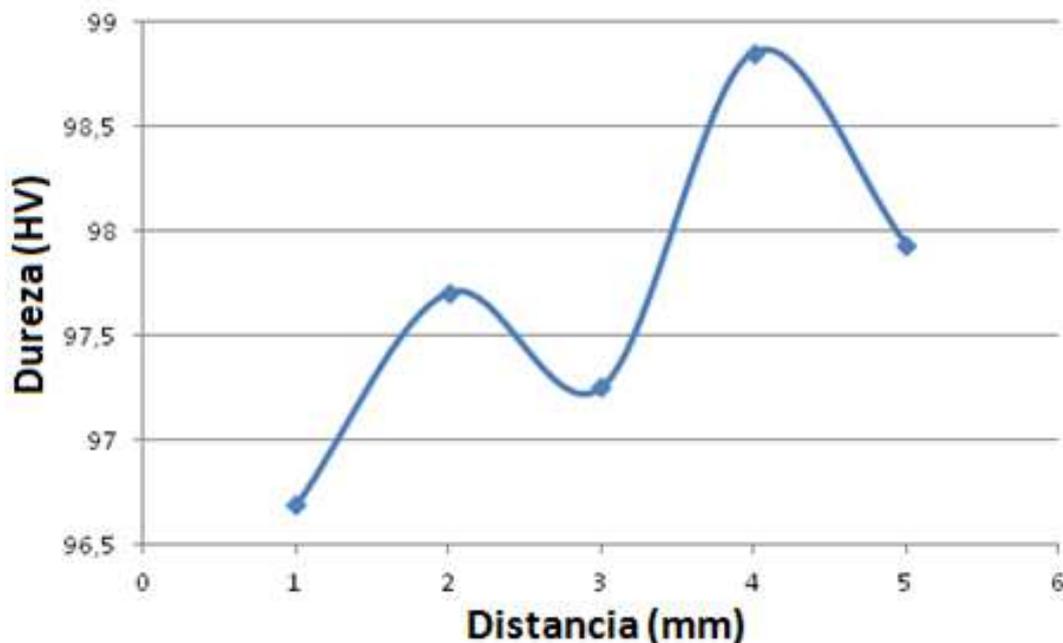
Fuente: Autor

## 5.2 Análisis e interpretación de los resultados de la medición de dureza

### 5.2.1 Material base

El material base fue sometido al ensayo de dureza Vickers y su dureza promedio fue de 97,68 HV.

Figura 50. Curva de dureza del material base

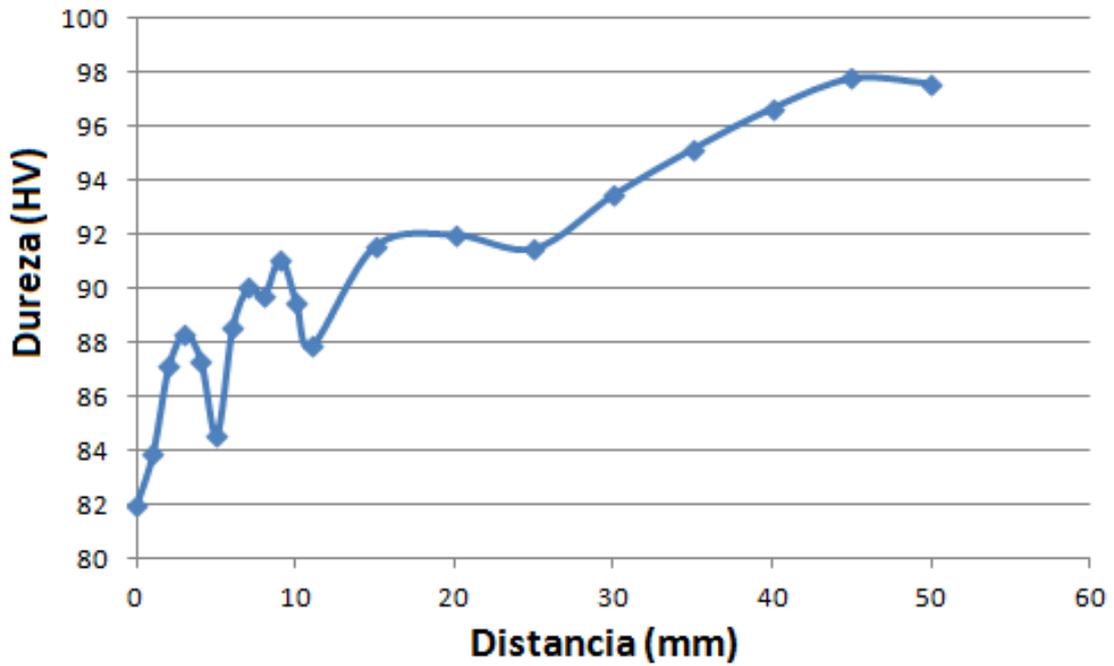


Fuente: Autor

### 5.2.2 Probeta soldada con velocidad de avance de 300 mm/min

De la Figura 51, se puede observar con toda claridad que en el centro del cordón la dureza es de 82,3 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 45 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor (ZAC) alcanza los 45 mm, esto debido a la gran energía aportada al cordón.

Figura 51. Curva de dureza de la probeta soldada a 300 mm/min.



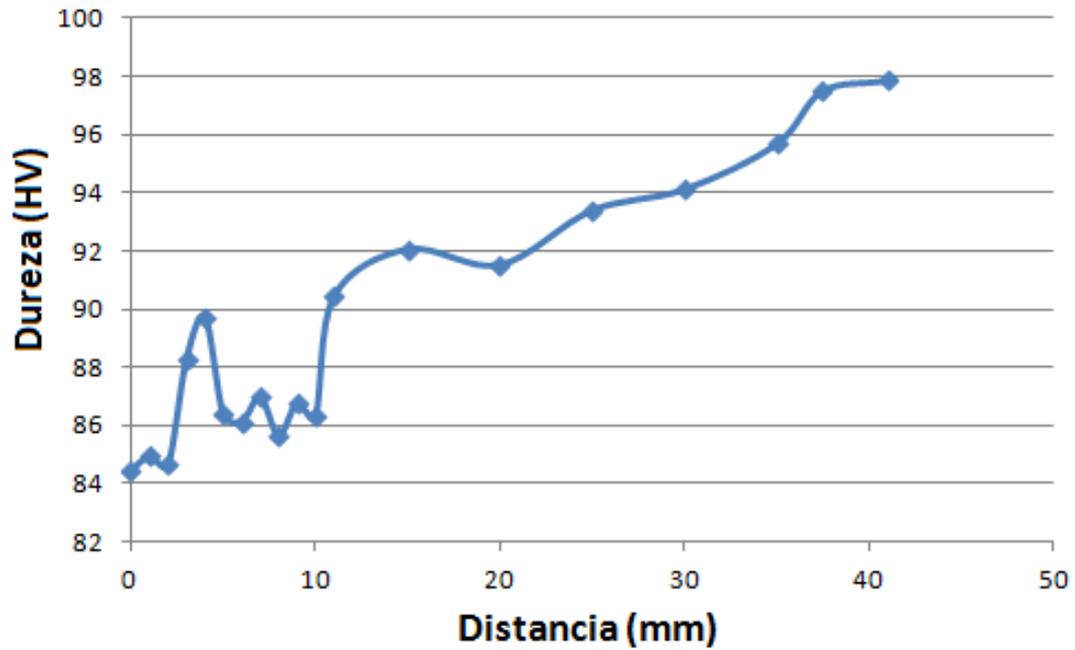
Las ligeras variaciones que se pueden observar dentro de esta zona se debe a que el indentador de microdureza dureza ha sido aplicado unas veces sobre la matriz de solución sólida  $\alpha$  y otras sobre el componente intermetálico  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que es mucho más duro.

### 5.2.3 Probeta soldada con velocidad de avance de 400 mm/min

De la Figura 52, se puede observar de la misma forma que en el centro del cordón la dureza es de 84,47 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 41 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor

(ZAC) alcanza los 41 mm, esto debido a que la energía aportada al cordón es menor que la anterior.

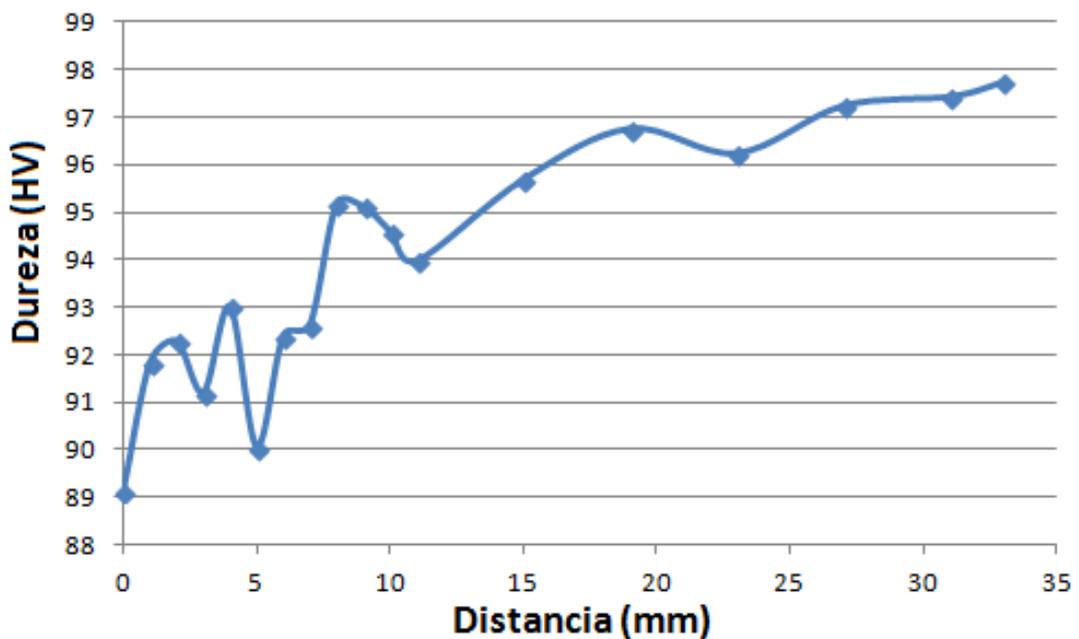
Figura 52. Curva de dureza de la probeta soldada a 400 mm/min.



Fuente: Autor

#### 5.2.4 Probeta soldada con velocidad de avance de 500 mm/min

Figura 53. Curva de dureza de la probeta soldada a 500 mm/min.

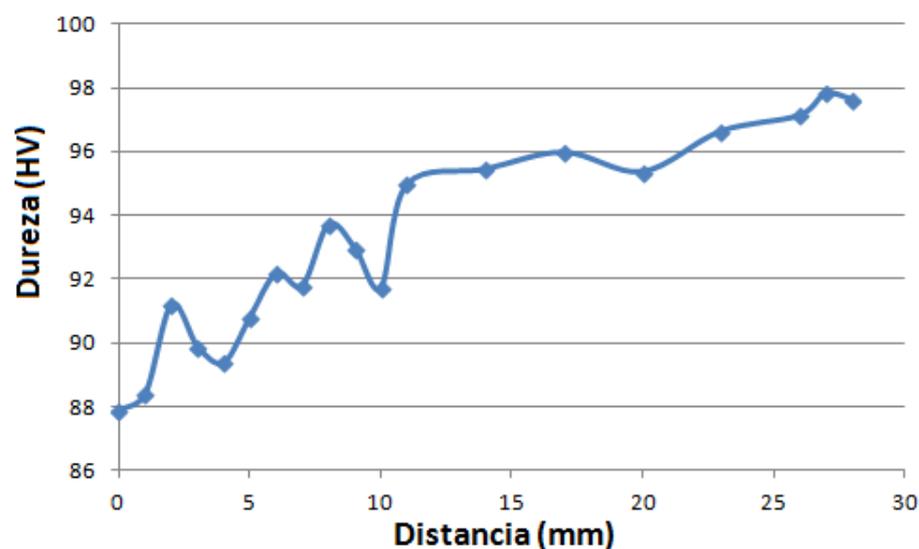


Fuente: Autor

De la Figura 53, se puede observar de la misma forma que en el centro del cordón la dureza es de 89,1 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 33 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor (ZAC) alcanza los 33 mm, esto debido a que la energía aportada al cordón es menor que la anterior.

### 5.2.5 *Probeta soldada con velocidad de avance de 550 mm/min*

Figura 54. Curva de dureza de la probeta soldada a 550 mm/min.



Fuente: Autor

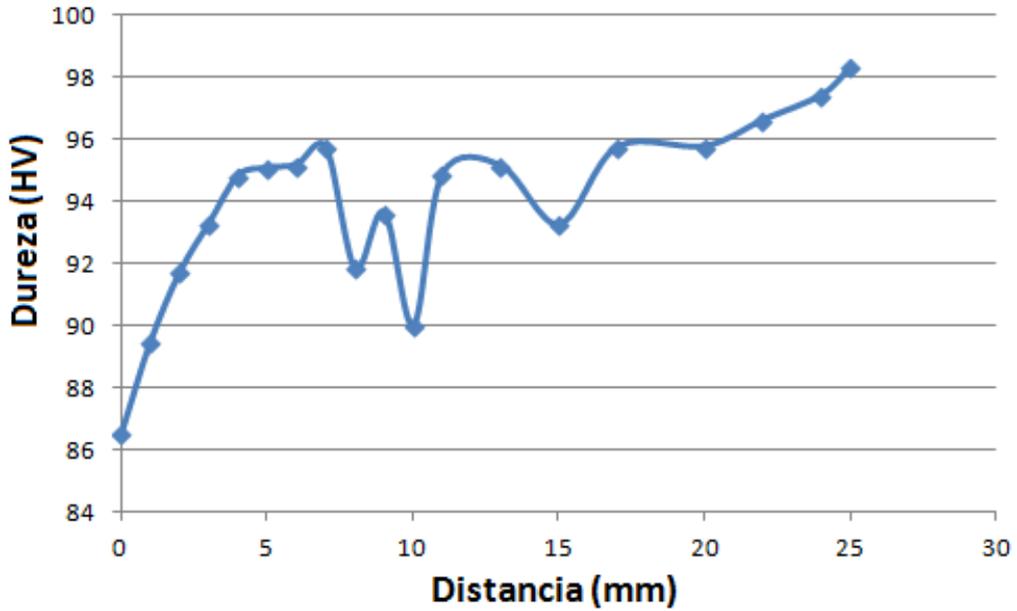
De la Figura 54, se puede observar de la misma forma que en el centro del cordón la dureza es de 87,85 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 28 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor (ZAC) alcanza los 28 mm, esto debido a que la energía aportada al cordón es menor que la anterior.

### 5.2.6 *Probeta soldada con velocidad de avance de 600 mm/min.* A continuación se puede ver la gráfica de la probeta soldada a 600 mm/min.

Se puede observar de la misma forma que en el centro del cordón la dureza es de 86,55 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al

eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 25 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor (ZAC) alcanza los 25 mm, esto debido a que la energía aportada al cordón es menor que la anterior.

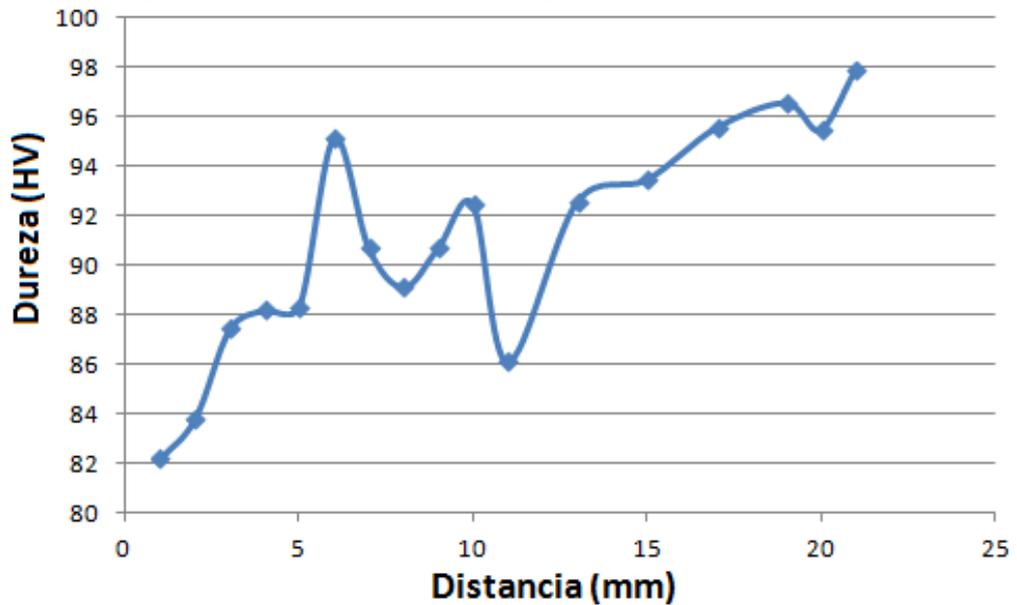
Figura 55. Curva de dureza de la probeta soldada a 600 mm/min.



Fuente: Autor

5.2.7 *Probeta soldada con velocidad de avance de 700 mm/min.*

Figura 56. Curva de dureza de la probeta soldada a 700 mm/min.



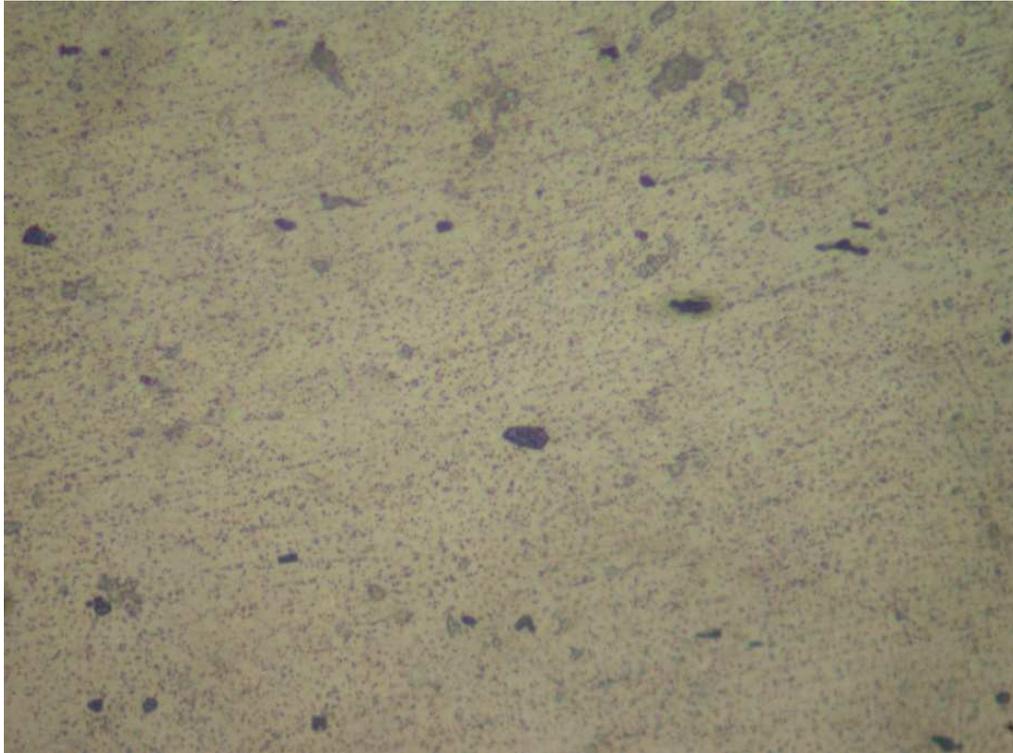
Fuente: Autor

De la Figura 56, se puede observar de la misma forma que en el centro del cordón la dureza es de 82,21 HV y poco a poco se va incrementando a medida que la distancia aumenta respecto al eje de soldadura, alcanza aproximadamente los 98 HV a una distancia de 21 mm y luego se estabiliza. Esto indica que la zona afectada por el calor (ZAC) alcanza los 21 mm, esto debido a que la energía aportada al cordón es menor que la anterior.

### 5.3 Análisis e interpretación de los resultados del análisis metalográfico

#### 5.3.1 *Material base*

Figura 57. Microfotografía del material base obtenida a 500x atacada 15 s. con keller.

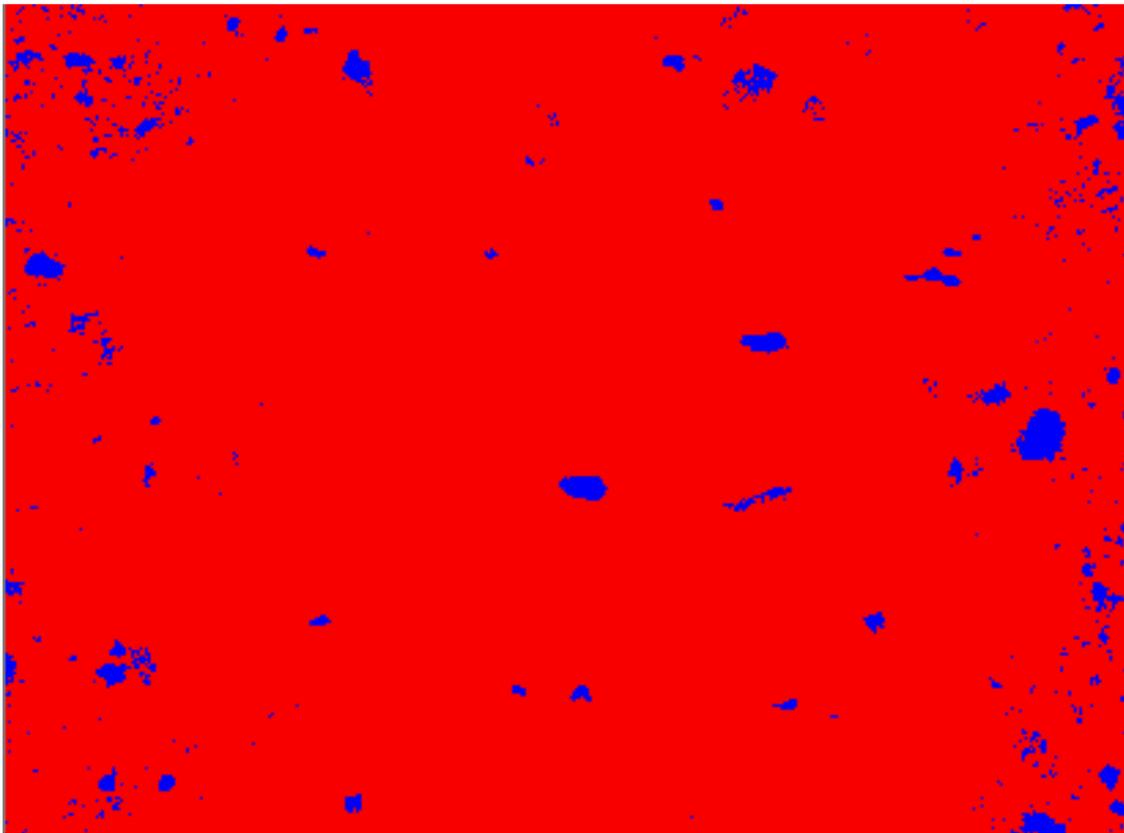


Fuente: Autor

En la microfotografía de la Figura 57, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las pequeñas partículas grises al constituyente  $Al_3Mg_2$ , que se halla uniformemente distribuido sobre la matriz, lo que produce las excelentes propiedades de la aleación. Esto es una buena resistencia mecánica, buena dureza gran capacidad de soldabilidad y buena resistencia a la corrosión, lo que garantiza su aplicación en tanques de almacenamiento, tanqueros de transporte de combustible e industria carrocería.

Estas propiedades se deben a que la aleación 5086-H116 a sido endurecida por trabajo en frio.

Figura 58. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes del material base.



Fuente: Autor

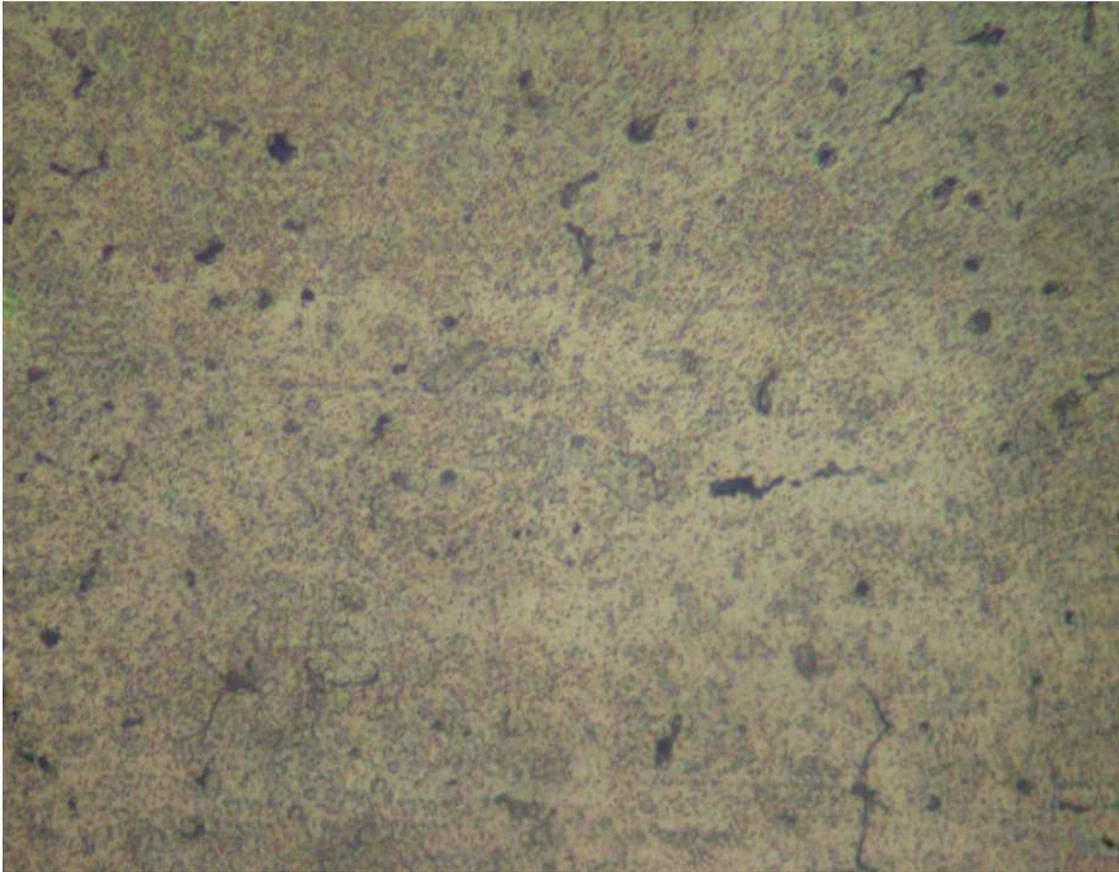
En la Figura 58, obtenida del software libre para el análisis de imágenes, se puede observar que la matriz  $\alpha$  en un porcentaje de 97,5 % aparece en coloración roja y el constituyente  $Al_3Mg_2$  en coloración azul en un 2,5 %.

El porcentaje y la distribución uniforme de las partículas influye en las propiedades de la aleación que tiene  $R = 30 \text{ kg/mm}^2$  y dureza de aproximadamente 98 HV.

El software de analisis de imágenes se fundamente en la digitalización de la imagen tomada del microscopio, es decir la imagen la divide en infinidad de pixeles y luego en base a la luminusidad de cada pixel se clasifica en rangos de luminusidad en este caso se tiene dos rangos de luminusidad, el claro corresponde a la matriz y el oscuro a la face intermetalica. Luego el software determina el porcentaje de cada rango de luminusidad.

### 5.3.2 *Probeta soldada a una velocidad de avance de 300 mm/min*

Figura 59. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 300 mm/min a 500x atacada 15 s. con Keller.



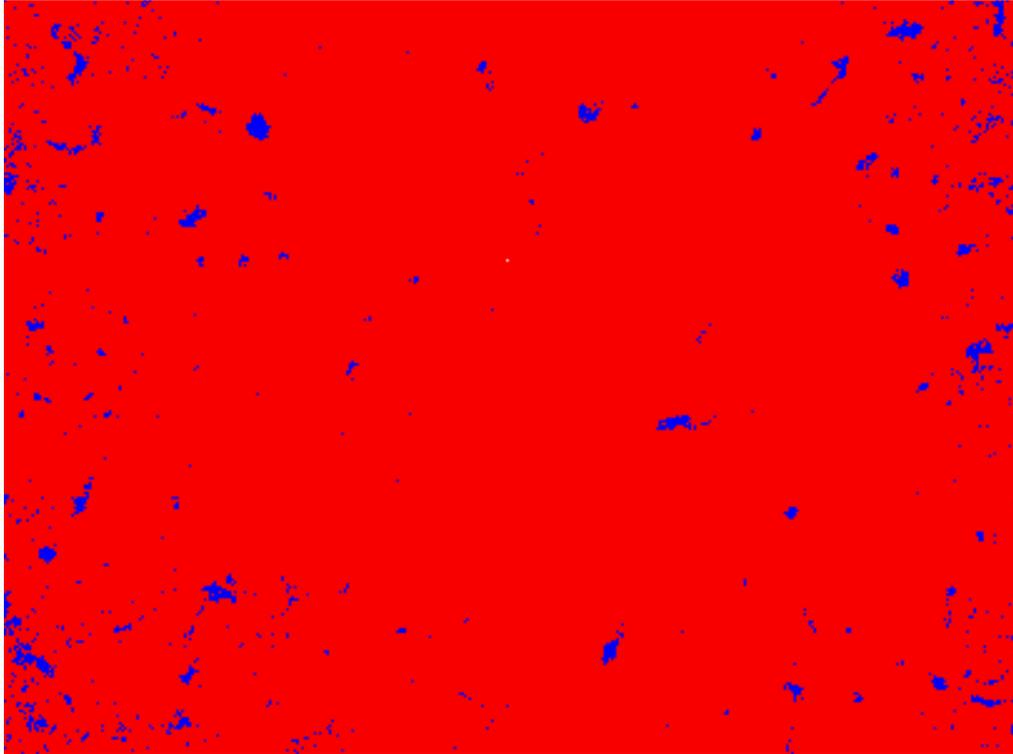
Fuente: Autor

En la microfotografía de la Figura 59, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las pequeñas partículas grises al constituyente  $Al_3Mg_2$ , en menor cantidad que en el metal base debido a la pérdida de magnesio durante la fusión.

Debido a la gran cantidad de energía aportada a esta velocidad de avance se produce la máxima pérdida de Mg, la misma que va disminuyendo a medida que esta se incrementa.

En la Figura 60, obtenida del software para el análisis de imágenes, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 98 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $Al_3Mg_2$  en azul un 2 %. Estas cantidades son menores que las del metal base, por otra parte debido a la gran cantidad de energía aportada existe una pérdida importante de Mg, lo que se manifiesta en la magnitud de sus propiedades mecánicas.

Figura 60. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 300 mm/min.



Fuente: Autor

La resistencia de esta probeta es  $25,67 \text{ kg/mm}^2$ , la dureza de aproximadamente 84,47 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 45 mm, alcanza 98 HV que es la dureza del metal base.

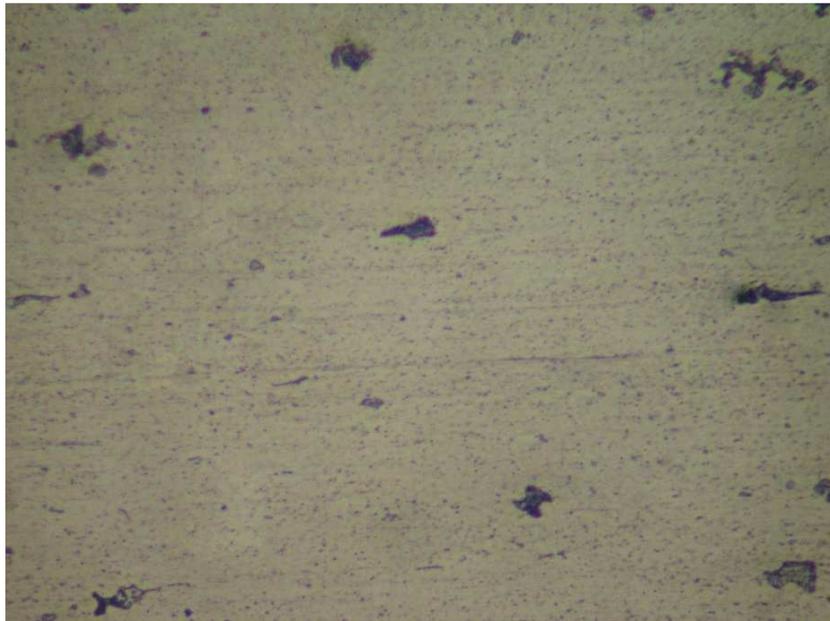
La menor dureza y resistencia que se obtienen en la probetas soldadas, se debe a que no se aplica ningún tratamiento posterior a la soldadura. En cambio, el material base a sido endurecido por trabajado en frío hasta un grado determinado.

### 5.3.3 *Probeta soldada a una velocidad de avance de 400 mm/min*

En la microfotografía de la Figura 61, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las pequeñas partículas grises al constituyente  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , en menor cantidad que en el metal base debido a la pérdida de magnesio durante la fusión.

Debido a que la energía aportada es un poco menor que en el caso anterior (a 300 mm/min), las partículas  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son de mayor tamaño y consecuentemente deber ser menor la pérdida de Mg durante la fusión por ser menor el tiempo de permanencia a alta temperatura.

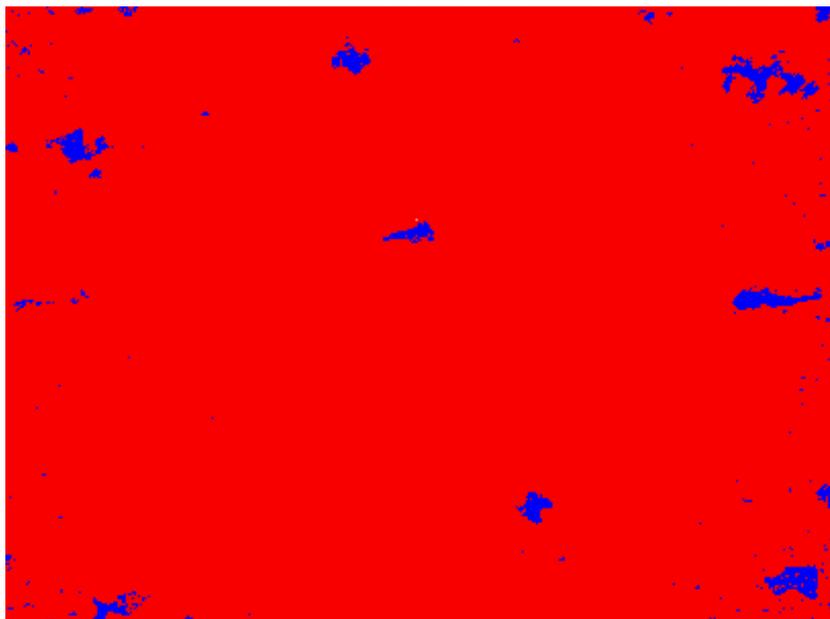
Figura 61. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 400 mm/min a 500x atacada 15 s. con keller.



Fuente: Autor

En la Figura 62 obtenida del software, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 98,2 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $Al_3Mg_2$  en azul un 1,8 %. Estas cantidades son menores que las del metal base, por otra parte debido a la cantidad de energía aportada existe también una pérdida de Mg, lo que se manifiesta en la magnitud de sus propiedades mecánicas.

Figura 62. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 400 mm/min.

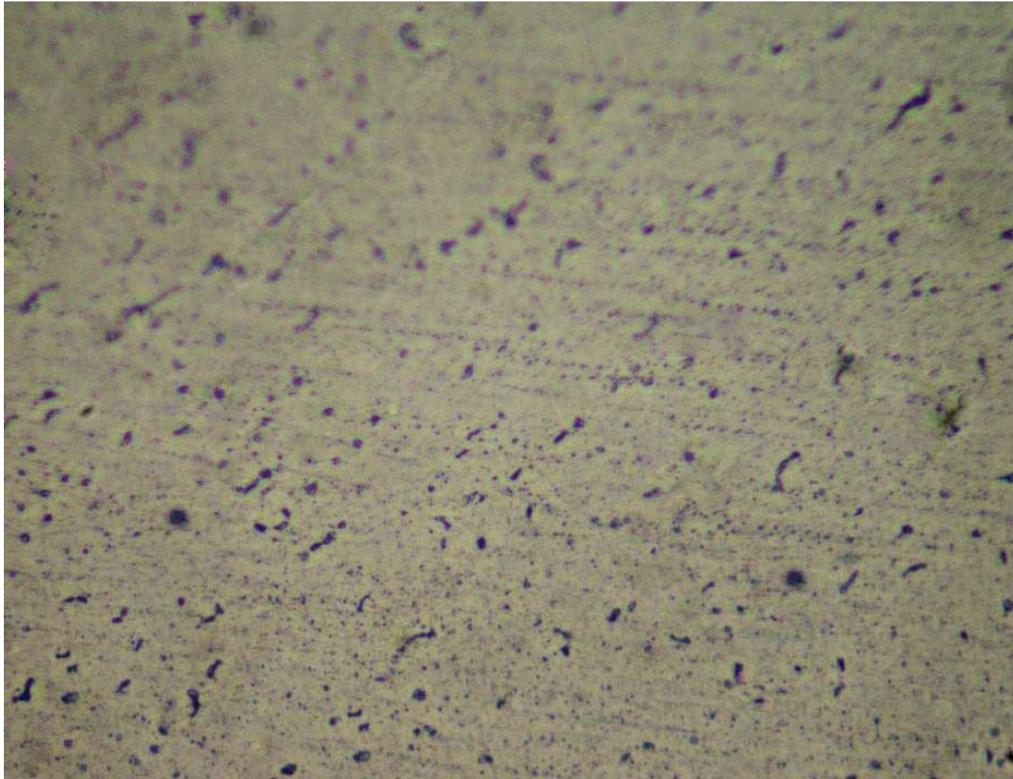


Fuente: Autor

La resistencia de esta probeta es  $26,08 \text{ kg/mm}^2$ , la dureza de aproximadamente 82,3 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 40 mm, alcanza 98 HV que es la dureza del metal base.

#### 5.3.4 Probeta soldada a una velocidad de avance de 500 mm/min

Figura 63. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 500 mm/min a 500x atacada 15 s. con keller.



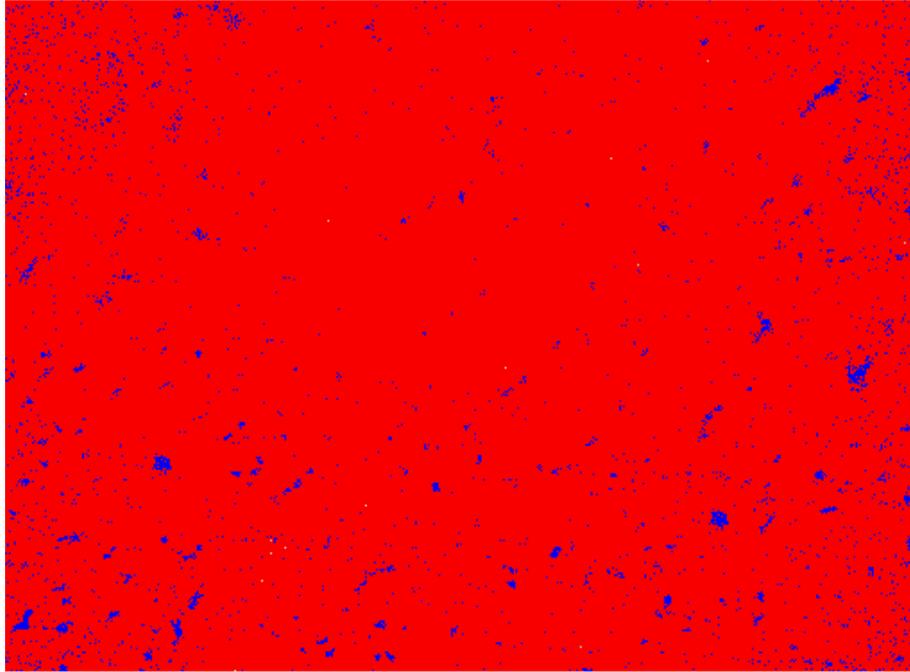
Fuente: Autor

En la microfotografía de la Figura 63, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las pequeñas partículas grises al constituyente  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , en menor cantidad que en el metal base debido a la pérdida de magnesio durante la fusión, pero su distribución es uniforme, por lo que las propiedades de la soldadura no se ven seriamente afectadas como en los otros casos.

En la Figura 64 obtenida del software, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 97,4 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  en azul un 2,6 %. La cantidad de partículas intermetálicas es equivalente a la del metal, pero su menor resistencia se debe a la pérdida de Mg durante la fusión de la soldadura. Esto se puede evidenciar con propiedades mecánicas ligeramente inferiores a

las del metal base. La resistencia de esta probeta es 27,05 kg/mm<sup>2</sup>, la dureza de aproximadamente 89,1 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 30 mm, alcanza 98 HV que es la dureza del metal base.

Figura 64. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 500 mm/min.



Fuente: Autor

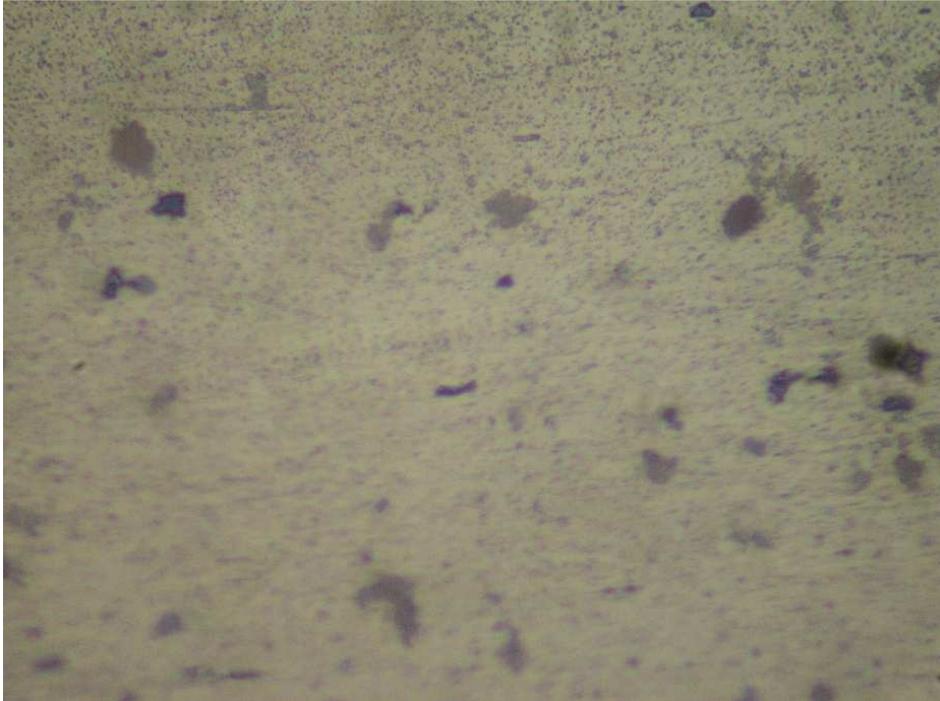
Comparando con el material base la cantidad de constituyente Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, es semejante y se debería esperar propiedades iguales, pero se debe recordar que el material base a sido endurecido por trabajado en frío hasta un grado determinado, con lo cual se mejora la dureza y resistencia. En cambio, la soldadura conserva la estructura en bruto procedente de la solidificación luego del proceso de fusión, ya que no se aplicó ningún tratamiento posterior.

**5.3.5** *Probeta soldada a una velocidad de avance de 550 mm/min.* En la microfotografía de la Figura 65, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las partículas grises al constituyente Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>.

Como la energía aportada a la soldadura es inversamente proporcionan a la velocidad de avance, las partículas del constituyente intermetálico aparecen con un mayor tamaño, y

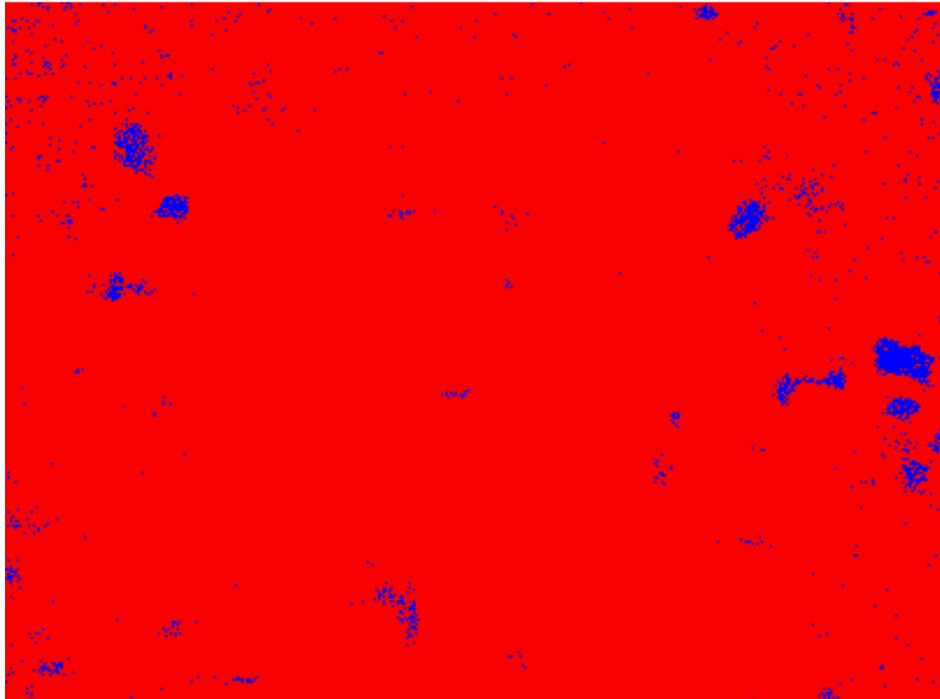
al no existir una distribución uniforme, afecta contrariamente a las propiedades de la soldadura.

Figura 65. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 550 mm/min a 500x atacada 15 s. con keller.



Fuente: Autor.

Figura 66. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 550 mm/min.



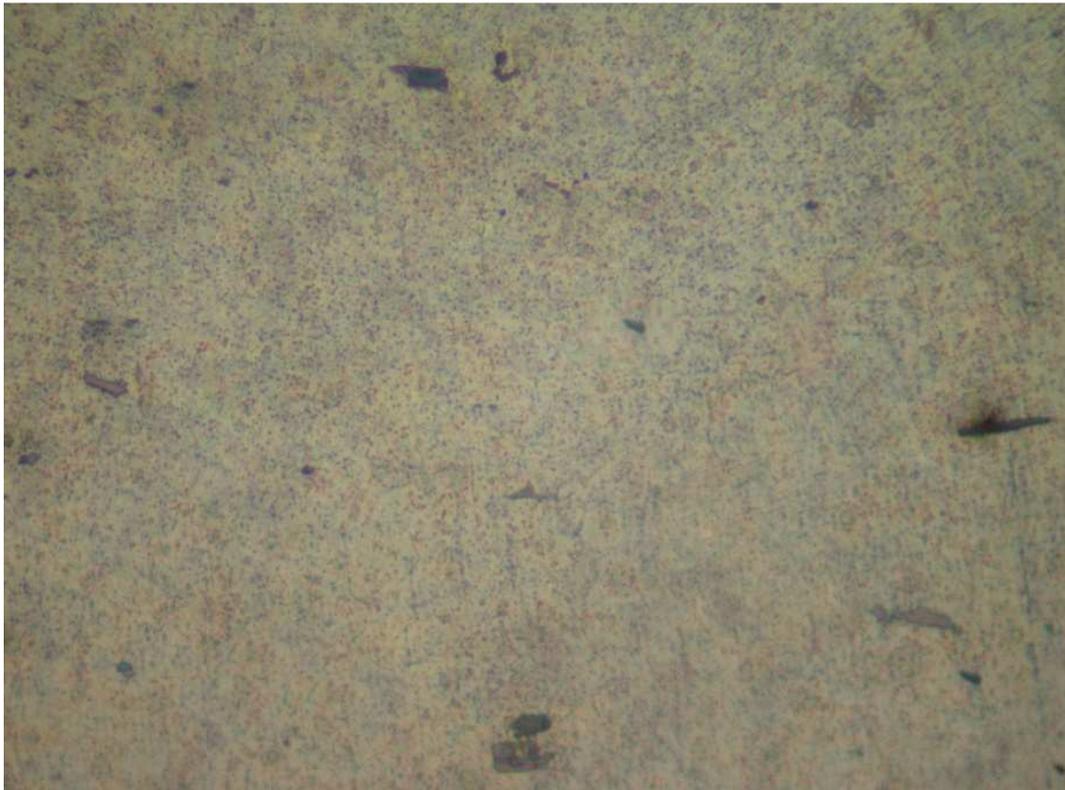
Fuente: Autor

En la Figura 66 obtenida del software, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 98,3 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $Al_3Mg_2$  en azul un 1,7 %.

La cantidad de partículas intermetálicas es menor a la del metal base, y su distribución no es uniforme. Esto se puede evidenciar con propiedades mecánicas ligeramente inferiores a las del metal base. La resistencia de esta probeta es  $24,47 \text{ kg/mm}^2$ , la dureza de aproximadamente 87,25 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 28 mm, alcanza 98 HV que es la dureza del metal base.

### 5.3.6 *Probeta soldada a una velocidad de avance de 600 mm/min*

Figura 67. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 600 mm/min a 500x atacada 15 s. con keller.

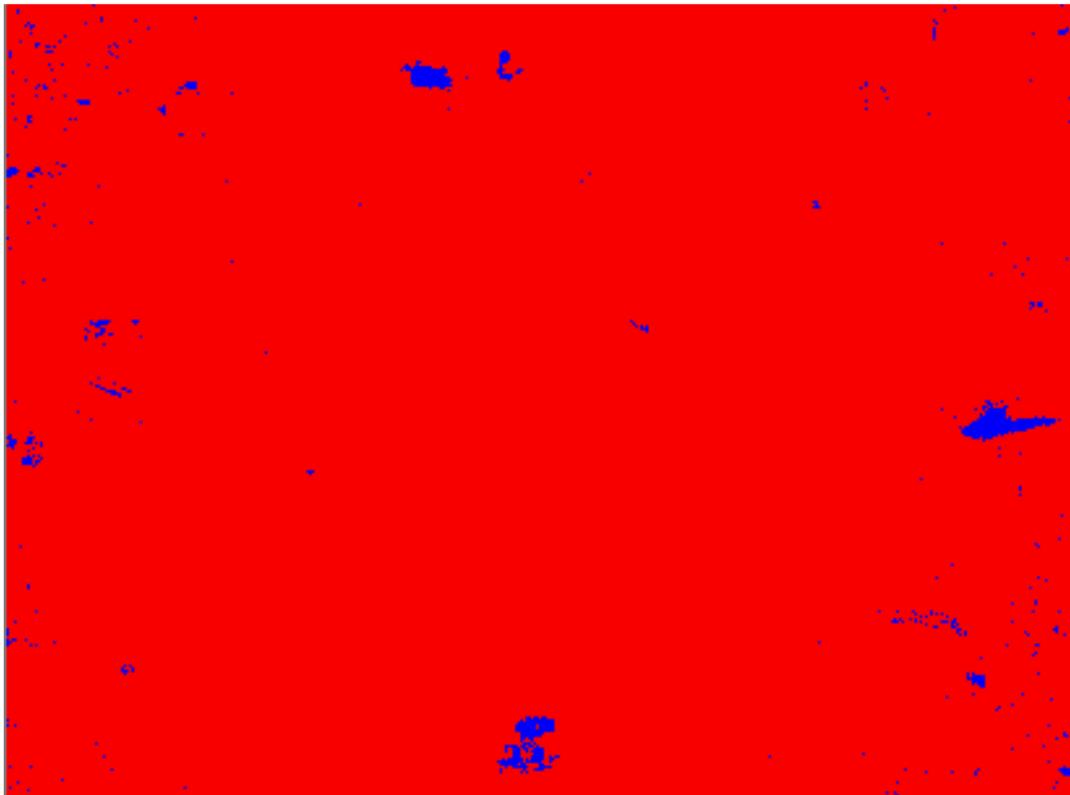


Fuente: Autor

En la microfotografía de la Figura 67, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las partículas grises al constituyente  $Al_3Mg_2$ , como la energía aportada a la soldadura es menor, las partículas intermetálicas son más grandes y no

presentan una distribución uniforme. Por otra parte su cantidad es menor lo que afecta contrariamente a sus propiedades mecánicas.

Figura 68. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 600 mm/min.



Fuente: Autor

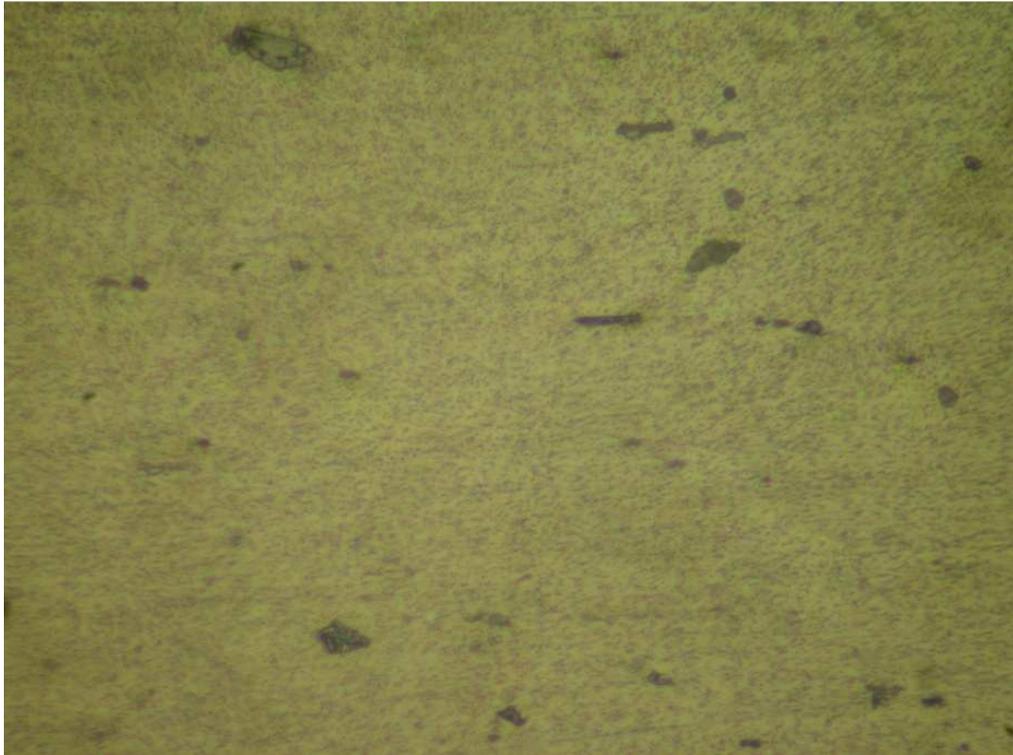
En la Figura 68 obtenida del software, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 99,1 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $Al_3Mg_2$  en azul un 0,9 %.

La cantidad de partículas intermetálicas es bastante menor a la del metal base, y su distribución no es uniforme debido a la menor energía aportada. Esto se puede evidenciar con propiedades mecánicas inferiores a las del metal base.

La resistencia de esta probeta es  $24,65 \text{ kg/mm}^2$ , la dureza de aproximadamente 86,55 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 25 mm, alcanza alrededor de 98 HV que es la dureza del metal base.

### 5.3.7 *Probeta soldada a una velocidad de avance de 700 mm/min*

Figura 69. Microfotografía de material soldado a una velocidad de avance de 700 mm/min a 500x atacada 15 s. con keller.



Fuente: Autor

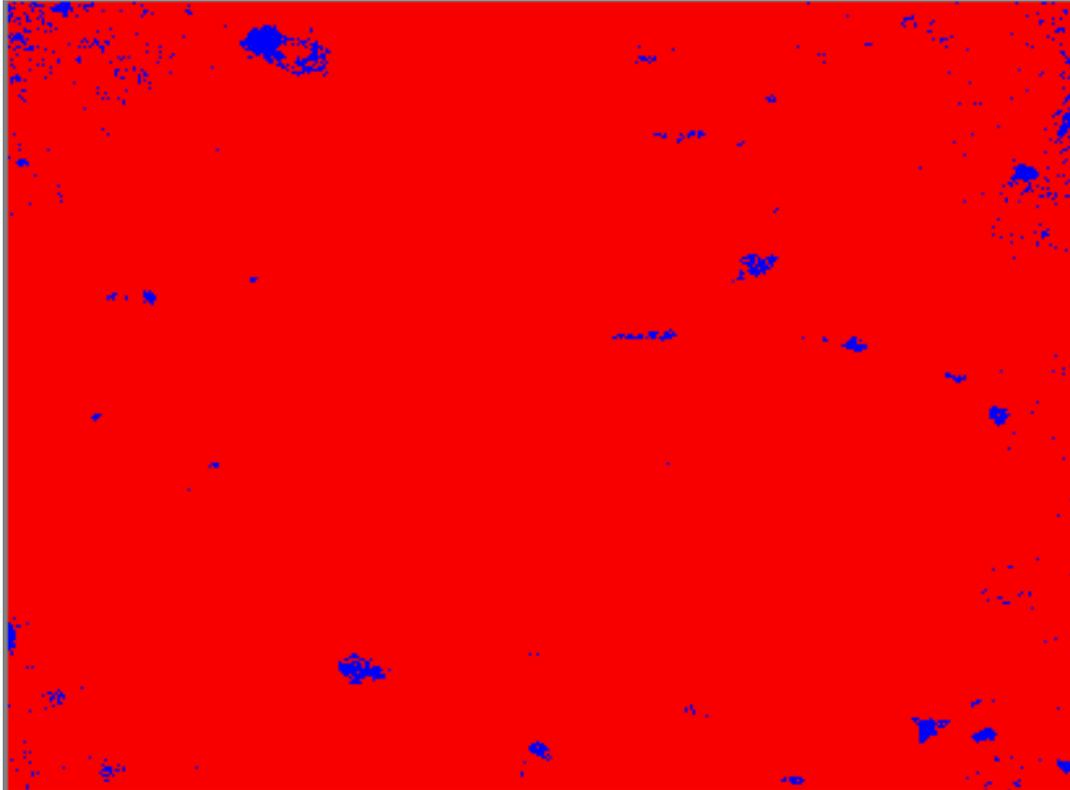
En la microfotografía de la Figura 69, se puede observar que la matriz corresponde a la solución sólida  $\alpha$  y las partículas grises al constituyente  $Al_3Mg_2$ , como la energía aportada a la soldadura es aun menor que en caso anterior (600 mm/min), las partículas intermetálicas son más grandes y no presentan una distribución uniforme.

En la Figura 70, obtenida del software, se puede observar que la matriz  $\alpha$  aparece en coloración roja y constituye el 98,7 % de la aleación y el constituyente intermetálico  $Al_3Mg_2$  en azul un 1,3 %.

La cantidad de partículas intermetálicas es menor a la del metal base, y su distribución no es uniforme debido a la menor energía aportada. Esto se puede evidenciar con propiedades mecánicas inferiores a las del metal base.

La resistencia de esta probeta es  $24,75 \text{ kg/mm}^2$ , la dureza de aproximadamente 82,21 HV en el eje de la soldadura, la misma que va incrementándose hasta que a una distancia de aproximadamente 21 mm, alcanza alrededor de 98 HV que es la dureza del metal base.

Figura 70. Imagen obtenida en el software para el análisis de imágenes de la microestructura de la aleación soldada a una velocidad de avance de 700 mm/min.



Fuente: Autor

#### 5.4 Análisis y discusión de resultados

De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se determinó que la velocidad de avance de la soldadura más adecuada es 500 mm/min (con un energía aportada de ), porque es la que permitió obtener las mejores propiedades mecánicas en la soldadura de la aleación 5086-H116, y a un amperaje de 148 A. A esta energía, se produce la menor pérdida de magnesio, el tamaño de las partículas de  $Al_3Mg_2$  es más fino y más fácilmente se distribuyen de manera uniforme en la matriz  $\alpha$ , lo que permite obtener las mejores propiedades mecánicas.

A velocidades menores, esto es 300 y 400 mm/min, la energía aportada es demasiado elevada lo cual produce una gran pérdida de Mg por evaporación, tanto en la solución sólida  $\alpha$ , como en la fase intermetálica  $Al_3Mg_2$ .

A velocidades mayores esto es, a 550, 600 y 700 mm, la energía aportada es insuficiente para disolver las partículas de  $Al_3Mg_2$  y conseguir una distribución uniforme en la matriz  $\alpha$ .

Entonces, es importante resaltar la influencia positiva sobre las propiedades mecánicas que tiene la cantidad, tamaño y distribución de las partículas intermetálicas de  $Al_3Mg_2$ . Por lo tanto, el proceso de soldadura se debe realizar bajo parámetros que permitan que las partículas de segunda fase se hallen en condiciones que brinden las mejores propiedades en la unión.

A continuación se tiene una tabla que presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 22. Resumen de los resultados obtenidos

Velocidad de avance mm/min.	Energía aportada J/mm	Zona afectada mm	Resistencia Kg/mm <sup>2</sup>	Dureza HV	AL <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> %
300	592	45	25,67	82,3	2
400	443,78	41	26,08	84,47	1,8
500	355,34	33	27,05	89,1	2,6
550	322,8	28	24,47	87,85	1,7
600	296	25	24,65	86,55	0,9
700	253,64	21	24,75	82,21	1,3

Fuente: Autor

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Se estudió el efecto de la energía en la soldadura GMAW de la aleación 5086-H116 sobre la microestructura y propiedades mecánicas de resistencia y dureza. El nivel de energía que permitió obtener los mejores resultados es 355,34 J/mm, que se obtuvo con una velocidad de avance de la soldadura de 500 mm/min.

Se construyó y preparó probetas que permitieron la realización de este estudio.

Se soldó probetas a diferentes velocidades manteniendo el amperaje constante a 148 amperios. Mediante el uso de un pirotopo se consiguió mantener constantes las velocidades de soldadura.

Se determinó las propiedades mecánicas de resistencia y dureza de las soldaduras en la aleación de aluminio 5086-H116.

Se determinó los cambios microestructurales en las juntas soldadas y su efecto en las propiedades mecánicas de resistencia y dureza. Determinando que es importante el porcentaje, tamaño y distribución de la fase intermetálica  $Al_3Mg_2$ .

#### 6.2 Recomendaciones

Realizar un estudio en el que se evalué la posible influencia que tendría un post calentamiento en las propiedades mecánicas de la soldadura.

Evaluar la influencia del flujo del gas protector en las propiedades de la soldadura.

Realizar una nueva investigación para la misma aleación pero con otras condiciones de tratamiento, ya que los resultados obtenidos solo son válidos para la aleación 5086-H116.

## Bibliografía

**ALTAMIRANO, Gerardo. 2009.** Optimización del cordón en una soldadura de filete de una aleación de aluminio para aplicaciones automotrices. Mexico : 2009.

**Alustock. 2013.** El libro del Aluminio. 2013. Vol. 5.

**ARTINAID. 2013.** El aluminio. [En línea] Abril de 2013.

<http://www.artinaid.com/en/2013/04/el-aluminio/>.

**ASKELAND, Donald. 2012.** Ciencia e ingeniería de materiales. Canada : CENGAGE LEARNING, 2012. 9786074816204.

**Electric, Lincoln. 2011.** Soldadura semiautomática con gas de protección. 2011.

**HIDALGO, Fredy. 2013.** Estudio de la Variación del Amperaje al realizar soldaduras a tope mediante proceso GMAW aplicado a la aleación de aluminio 5086-H116 y su efecto en las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor. Ambato : 2013.

**PASTOR, Mario. 1999.** Formación de porosidad durante la soldadura láser de Nd:YAG de onda continua en aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices. 1999.

**ROWE, Richard. 2008.** Manual de Soldadura Gmaw(Mig/Mag). Madrid : 2008.

**SMITH, Willian. 2004.** Ciencia e Ingeniería de Materiales. España : MCGRAW-HILL, 2004. 9788448129569.

**SOLVAY. 2012.** Soldadura de Aluminio con NOCOLOCK. 2012.

