



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE UN ACERO INOXIDABLE Y UN ACERO AL CARBONO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

**JAIME OSWALDO CHÁVEZ SARANGO**  
jaime.chavez@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. MARÍA VERÓNICA SOTOMAYOR GRIJALVA, M.Sc.**  
veronica.sotomayor@epn.edu.ec

**COLABORADOR: ING. GABRIEL EDMUNDO VELASTEGUÍ BALDA, M.Sc.**  
gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, junio 2017

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **Jaime Oswaldo Chávez Sarango**, bajo nuestra supervisión.

---

Ing. Verónica Sotomayor, M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Gabriel Velasteguí, M.Sc.

**COLABORADOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Jaime Oswaldo Chávez Sarango**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Jaime Oswaldo Chávez Sarango

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo plasmado en este documento está dedicado a todas las personas que me acompañaron durante este largo camino, en especial a mis padres, hermanos y a mi esposa e hija, gracias por el apoyo incondicional y por no permitirme claudicar en los momentos más duros.



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme la vida, salud y dicha de haber nacido en este país y de regalarme una hermosa familia.

A mi padre, Jaime Chávez, porque gracias a su amor, esfuerzo y sacrificio diario me ha permitido concluir esta etapa, por enseñarme el valor que tienen las cosas, su apoyo incondicional, confianza y conocimiento de la vida me ha hecho ser un mejor ser humano.

A mi madre, Esperanza Sarango, que siempre ha estado junto a mí en buenos y malos momentos, porque estuvo ahí para darme el aliento necesario sin el cual alcanzar esta meta hubiera sido imposible, por amarme y nunca juzgarme cuando tomaba mis decisiones, por hacerme la persona que soy.

A mis hermanos, Patricia, Ángelo y Geovanny por sus consejos y guía, por ayudarme a forjar mi carácter y siempre apoyarme.

A mi esposa, Consuelo y mi hija Emily, el motor que mueve mi vida, sin su motivación y amor no hubiera podido finalizar esta etapa.

A mis amigos, Marco, Meyfi, Galo, Byron, Andrés, Alejandro, Ricardo, Mollito, Juan, Gaby, Edith y a todos los que estuvieron presentes en mi día a día, por su amistad, por hacer más sencilla mi vida de estudiante y por esos hermosos momentos juntos.

A la Ing. Verónica Sotomayor, por permitirme aprender de ella y de sus conocimientos para poder concluir exitosamente con este proyecto.

Al Ing. Gabriel Velasteguí, por su gran apertura y colaboración durante todo el tiempo de desarrollo de este trabajo.

A la facultad de ingeniería mecánica, la mejor facultad del mundo, por acogerme y darme las herramientas necesarias para poder defenderme en mi vida.

## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
<b>Objetivo general</b> .....	1
<b>Objetivos específicos</b> .....	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	2
<b>1.2 Revisión Teórica</b> .....	2
1.2.1 Definición de Soldadura .....	2
1.2.2 Clasificación de la soldadura.....	3
1.2.2.1 Soldadura en estado sólido (SSW) .....	4
1.2.3 El acero .....	4
1.2.3.1 Clasificación de los aceros.....	5
1.2.3.2 Aceros Inoxidables.....	5
1.2.3.3 Aceros inoxidables austeníticos .....	6
1.2.3.4 Elementos aleantes del acero inoxidable y mejoras obtenidas con la aleación .	7
1.2.3.5 Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos .....	8
1.2.3.6 Aceros al carbono .....	9
1.2.3.7 Aceros de bajo carbono .....	9
1.2.3.8 Aceros de medio carbono .....	11
<b>1.3 Soldadura de metales disímiles</b> .....	11
1.3.1 Diagrama de Schaeffler .....	12
<b>1.4 Soldadura por fricción</b> .....	13
1.4.1 Soldadura por fricción lineal (LFW) .....	14
1.4.2 Soldadura por fricción y agitación (FSW) .....	15

1.4.3 Soldadura por fricción e inercia (IFW) .....	16
1.4.4 Soldadura por fricción de impulso directo.....	16
1.4.4.1 Velocidad de rotación.....	16
1.4.4.2 Presión de calentamiento.....	17
1.4.4.3 Presión de forja.....	17
1.4.4.4 Encogimiento axial.....	17
1.4.4.5 Tiempo de calentamiento.....	17
1.4.4.6 Tiempo de frenado.....	17
1.4.4.7 Tiempo de forja.....	17
1.4.5 Etapas del proceso de soldadura por fricción.....	18
1.4.6 Ventajas y desventajas de la soldadura por fricción rotacional.....	19
1.4.7 Características presentes en la zona de soldadura.....	20
1.4.8 Aplicaciones de la soldadura por fricción.....	20
<b>1.5 Ensayos</b> .....	21
1.5.1 Ensayos destructivos .....	22
1.5.1.1 Ensayo de tracción .....	22
1.5.1.2 Ensayo de Flexión .....	23
1.5.2 Ensayos no destructivos (END) .....	24
1.5.2.1 Clasificación de los END.....	24
1.5.2.2 Técnicas de inspección superficial.....	24
1.5.2.3 Técnicas de inspección volumétricas.....	25
1.5.2.4 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad.....	25
1.5.2.5 Inspección Visual (VT).....	25
1.5.3 Niveles de certificación .....	26
<b>1.6 Análisis Metalográfico</b> .....	27
1.6.1 Método de preparación de la muestra.....	27
1.6.1.1 Selección y extracción .....	27
1.6.1.2 Montaje.....	28
1.6.1.3 Esmerilado grueso.....	29

1.6.1.4 Esmerilado fino .....	29
1.6.1.5 Pulido mecánico.....	30
1.6.1.6 Ataque químico .....	30
1.6.2 Observación metalográfica .....	30
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Procesos previos a la soldadura por fricción .....</b>	<b>31</b>
2.1.1 Elección de materiales .....	31
2.1.2 Preparación de la máquina .....	31
2.1.3 Preparación de las probetas .....	33
2.1.4 Ubicación de las probetas en la máquina.....	34
<b>2.2 Proceso de soldadura por fricción .....</b>	<b>35</b>
2.2.1 Experimentación inicial .....	35
2.2.2 Relación entre los parámetros .....	36
2.2.3 Experimentación final.....	37
<b>2.3 Análisis químico de los materiales .....</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Ensayos .....</b>	<b>38</b>
2.4.1 Juntas soldadas .....	38
2.4.2 Material Base.....	39
<b>2.5 Análisis metalográfico .....</b>	<b>40</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1. Resultados.....</b>	<b>42</b>
3.1.1 Experimentación inicial .....	42
3.1.2 Relación entre parámetros.....	43
3.1.3 Experimentación final.....	48
3.1.4 Material base .....	54
3.1.5 Análisis Químico de los materiales base .....	55
3.1.6 Análisis Metalográfico .....	56
<b>3.2. Discusión.....</b>	<b>70</b>
3.2.1 Proceso de soldadura por fricción.....	70

3.2.2 Ensayos de tracción a las probetas soldadas .....	72
3.2.3 Ensayo de tracción al material base.....	73
3.2.4 Análisis químico de materiales base .....	73
3.2.5 Análisis metalográfico .....	74
3.2.5.1 Caracterización del acero inoxidable.....	74
3.2.5.2 Caracterización del acero al carbono .....	74
3.2.5.3 Caracterización de la junta soldada .....	75
3.2.5.4 Probeta 1EF.....	75
3.2.5.5 Probeta 2EF.....	76
3.2.5.6 Probeta 3EF.....	76
3.2.5.7 Probeta 4EF.....	76
3.2.5.8 Probeta 5EF.....	77
3.2.5.9 Probeta 6EF.....	77
3.2.5.10 Probeta 7EF.....	78
3.2.5.11 Probeta 8EF.....	78
3.2.5.12 Probeta 9EF.....	78
3.2.6 Análisis comparativo entre el proceso de soldadura por fricción (FRW) y el proceso SMAW .....	79
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1 Conclusiones .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2 Recomendaciones .....</b>	<b>84</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>85</b>
Anexos .....	i
ANEXO I.....	i
ANEXO II.....	iii
ANEXO III.....	vii
ANEXO IV.....	ix

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Clasificación de la soldadura. ....	3
Figura 1. 2. Clasificación del acero. ....	5
Figura 1. 3. Diagrama de Schaeffler. ....	13
Figura 1. 4. Secuencia de pasos para realizar la soldadura por fricción. ....	13
Figura 1. 5. Formas de las zonas de fusión en la soldadura por fricción, en función de la fuerza axial y la velocidad de rotación. ....	14
Figura 1. 6. Soldadura por fricción lineal.....	15
Figura 1. 7. Soldadura por fricción y agitación.....	15
Figura 1. 8. Gráfica del ciclo de soldadura por fricción.....	18
Figura 1. 9. Etapas de la soldadura por fricción (a) Contacto inicial (b) etapa de transición (c) forja.....	19
Figura 1. 10. Aplicaciones de la soldadura por fricción. ....	21
Figura 1. 11. Máquina universal de ensayos usada para el ensayo de tracción. ....	22
Figura 1. 12. Gráfica Esfuerzo-Deformación.....	23
Figura 1. 13. Ensayo de flexión.....	23
Figura 1. 14. Inspección visual.....	25
Figura 1. 15. Cortadora metalográfica y discos abrasivos.....	28
Figura 1. 16. Inclusiones metalográficas en caliente.....	28
Figura 1. 17. Inclusiones metalográficas en frío.....	29
Figura 1. 18. Papeles para esmerilado manual y mecánico.....	29
Figura 1. 19. Máquina para esmerilado mecánico.....	29
Figura 1. 20. Ataque químico.....	30
Figura 2. 1. Máquina para soldar por fricción.....	32
Figura 2. 2. Sistema de poleas de la máquina.....	32
Figura 2. 3. Bomba Hidráulica de la máquina.....	33
Figura 2. 4. Probetas de Acero al carbono AISI 1018.....	34
Figura 2. 5. Probetas de Acero inoxidable AISI 304.....	34
Figura 2. 6. Ubicación de las probetas en la máquina.....	35
Figura 2. 7. Obtención de la muestra para el análisis químico.....	38
Figura 2. 8. Ensayo de tracción.....	39
Figura 2. 9. Ensayo de flexión.....	39
Figura 2. 10. Corte y montaje de juntas soldadas.....	40
Figura 2. 11. Corte y montaje de material base.....	40
Figura 2. 12. Pulidora Forzipol con paño de 1 micrón.....	41
Figura 2. 13. Pulido de las probetas.....	41
Figura 2. 14. Ataque químico.....	41

Figura 3. 1. Probetas soldadas obtenidas en la experimentación inicial. ....	42
Figura 3. 2. Fuerza de forja vs encogimiento axial (experimentación inicial). ....	43
Figura 3. 3. Probetas soldadas en la primera prueba para relacionar parámetros. ....	43
Figura 3. 4. Probetas soldadas en la segunda prueba para relacionar parámetros. ....	44
Figura 3. 5. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la primera prueba (relación de parámetros). .....	45
Figura 3. 6. Tiempo de calentamiento vs encogimiento axial en la primera prueba (relación de parámetros). ....	45
Figura 3. 7. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la primera segunda prueba (relación de parámetros). ....	46
Figura 3. 8. Tiempo de calentamiento vs encogimiento axial en la segunda prueba (relación de parámetros). ....	47
Figura 3. 9. Probetas soldadas ensayadas a tracción. ....	48
Figura 3. 10. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la experimentación final. ....	49
Figura 3. 11. Tiempo de calentamiento vs Encogimiento axial en la experimentación final. ....	49
Figura 3. 12. Fuerza de forja vs Resistencia a la tracción en la experimentación final. ....	50
Figura 3. 13. Tiempo de calentamiento vs resistencia a la tracción en la experimentación final. .....	51
Figura 3. 14. Probetas soldadas (a) antes del ensayo de tracción (b) después del ensayo de tracción. ....	51
Figura 3. 15. (a) Probeta 1EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada. ....	52
Figura 3. 16. (a) Probeta 2EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada. ....	52
Figura 3. 17. (a) Probeta 3EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada. ....	52
Figura 3. 18. (a) Probeta 4EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base. ....	53
Figura 3. 19. (a) Probeta 5EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada. ....	53
Figura 3. 20. (a) Probeta 6EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base. ....	53
Figura 3. 21. (a) Probeta 7EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base. ....	54
Figura 3. 22. (a) Probeta 8EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base. ....	54
Figura 3. 23. (a) Probeta 9EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base. ....	54
Figura 3. 24. (a) Acero AISI 1018 Ensayado a tracción (b) Lugar de falla. ....	55
Figura 3. 25. (a) Acero AISI 304 Ensayado a tracción (b) Lugar de falla. ....	55
Figura 3. 26. (a) Metalografía material base (b) Metalografía de Pérez y otros. ....	74
Figura 3. 27. (a) Metalografía acero AISI 1018 (b) Metalografía de Aminul y otros. ....	75
Figura 3. 28. Probetas ensayadas (a) Soldadura SMAW (b) Soldadura por fricción. ....	80
Figura 3. 29. Comparación de resistencia a la tracción entre procesos. ....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Procesos relacionados a la soldadura en estado sólido.....	4
Tabla 1. 2. Designación de los aceros.....	6
Tabla 1. 3. Efecto de los elementos aleantes en los aceros inoxidables.....	7
Tabla 1. 4. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente de varios aceros inoxidables austeníticos.....	8
Tabla 1. 5. Composiciones de 4 aceros bajos en carbono y 2 aceros de baja aleación.....	10
Tabla 1. 6. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de 4 aceros de bajo carbono y 3 de baja aleación.....	10
Tabla 1. 7. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de aceros de medio carbono y de baja aleación.....	11
Tabla 2. 1. Parámetros utilizados para la experimentación inicial.....	35
Tabla 2. 2. Parámetros utilizados para la primera prueba para relacionar los parámetros.....	36
Tabla 2. 3. Parámetros utilizados para la segunda prueba para relacionar los parámetros.....	37
Tabla 2. 4. Parámetros utilizados en la prueba final.....	37
Tabla 3. 1. Longitudes de probetas soldadas en la experimentación inicial.....	42
Tabla 3. 2. Longitudes de probetas en primera prueba para relacionar parámetros.....	44
Tabla 3. 3. Longitudes de probetas en la segunda prueba para relacionar parámetros.....	46
Tabla 3. 4. Resistencia a la tracción de probetas ensayadas.....	47
Tabla 3. 5. Longitudes de probetas obtenidas en la experimentación final.....	48
Tabla 3. 6. Resistencia a la tracción de probetas ensayadas en la experimentación final.....	50
Tabla 3. 7. Resultados de ensayo de tracción a metales base.....	55
Tabla 3. 8. Análisis químico de metales base.....	56
Tabla 3. 9. Metalografías de los materiales base.....	56
Tabla 3. 10. Metalografías de la probeta 1EF.....	57
Tabla 3. 11. Metalografías de la probeta 2EF.....	58
Tabla 3. 12. Metalografías de la probeta 3EF.....	60
Tabla 3. 13. Metalografías de la probeta 4EF.....	61
Tabla 3. 14. Metalografías de la probeta 5EF.....	63
Tabla 3. 15. Metalografías de la probeta 6EF.....	64
Tabla 3. 16. Metalografías de la probeta 7EF.....	66
Tabla 3. 17. Metalografías de la probeta 8EF.....	67
Tabla 3. 18. Metalografías de la probeta 9EF.....	69
Tabla 3. 19. Parámetros de soldadura SMAW.....	80
Tabla 3. 20. Comparación de esfuerzos promedio de tracción entre procesos SMAW y FRW.....	81



## RESUMEN

En el presente estudio se analizó el comportamiento de una junta soldada de aceros disímiles mediante el proceso de soldadura por fricción, se determinó la relación que existe entre los parámetros que gobiernan la calidad de la soldadura y cuáles son los valores óptimos de los mismos variando cada uno de estos, para de esta manera garantizar una unión confiable que a su vez represente una alternativa aplicable en la industria. Mediante el uso de ensayos destructivos y no destructivos además de un análisis metalográfico se pudo obtener resultados que permitieron conocer tanto el comportamiento mecánico de la soldadura como la microestructura resultante de los materiales utilizados. Además, se comparó los resultados obtenidos en este documento con los que se presentaron usando el proceso SMAW, llegando a poder decir que la unión soldada por fricción presenta iguales e incluso mejores características que dicho proceso.

**Palabras clave:** acero, fricción, microestructura, parámetros.

## **ABSTRACT**

In the present study, the behavior of a welded joint of dissimilar steels using the friction welding process was analyzed, the relationship between the parameters that govern the quality of the weld and its optimum values were determined, in order to ensure a reliable union that in turn represents an applicable alternative in the industry. Through the use of destructive and non-destructive testing in addition to a metallographic analysis it was possible to obtain results that allowed to know both the mechanical behavior of the weld and the resulting microstructure of the materials used. In addition, the results obtained in this paper were compared with those presented using the SMAW process, and it can be said that the friction welded joint has the same and even better characteristics than this process.

**Keywords:** steel, friction, microstructure, parameters.

# **“ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO INOXIDABLE Y UN ACERO AL CARBONO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN”**

## **Objetivo general**

Estudiar la soldabilidad entre un acero inoxidable y un acero al carbono mediante el proceso de soldadura por fricción.

## **Objetivos específicos**

- Determinar la relación que existe entre los parámetros de soldadura y la junta final.
- Analizar la junta soldada.
- Estudiar las características de la microestructura resultante en la junta
- Realizar una comparación de resultados entre los procesos de fricción y SMAW.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Antecedentes**

En la industria actual se hace necesario el uso de nuevos materiales, tanto por el desarrollo de la misma, como por la necesidad de optimizar los procesos para la obtención de nuevos elementos para diferentes aplicaciones. La dificultad que presenta la unión de materiales disímiles ha sido un limitante, por lo que el desarrollo del presente proyecto represente un aporte a la generación de nuevo conocimiento ya que el mismo consistirá en el estudio de la soldabilidad de dos tipos de acero (inoxidable y de bajo contenido de carbono), de las variables que intervienen en el proceso y cuál es la afectación de estas en el mismo.

Cuando se habla sobre la unión de materiales disímiles se debe realizar un mejor análisis que cuando se unen metales iguales, ya que al tener diferentes propiedades la combinación de éstas puede generar inconvenientes al momento de unirlos, por lo que se hace necesario conocer el comportamiento interno y externo de las juntas soldadas.

El proceso de soldadura por fricción presenta grandes ventajas con respecto a los métodos comúnmente utilizados, ya sea porque no se necesita un material de aporte para unir las piezas o debido a que la zona afectada por el calor -tan importante en otros procesos- se ve considerablemente reducida, entre otras ventajas. Pero de igual manera se presentan problemas al momento de efectuar la soldadura, dichos problemas se desean reducir al mínimo para optimizarlo y mejorarlo por medio del proyecto que se va a desarrollar.

## **1.2 Revisión Teórica**

### **1.2.1 Definición de Soldadura**

Soldadura es un procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

Soldar consiste en reunir las partes integrantes de una construcción asegurando la continuidad de la materia entre ellas, entendiéndose por continuidad no sólo la de carácter geométrico sino la homogeneidad en todo tipo de propiedades.

También se puede considerar soldadura la aportación mediante fusión de material sobre una pieza para modificar las dimensiones iniciales de la misma, o para conseguir características superficiales diferentes a las de origen. (Soldar en la industria, 2009)

### 1.2.2 Clasificación de la soldadura

La AWS presenta una clasificación muy detallada de los diferentes procesos de soldadura, los mismos que se clasifican en ocho principales:

- Soldadura por arco
- Soldadura con oxígeno y gas combustible
- Soldadura en estado sólido
- Soldadura por resistencia
- Brazing (soldadura fuerte)
- Soldering (soldadura blanda)
- Soldadura de Haz de alta energía
- Otros tipos de soldadura y unión

En la figura 1.1 se muestra a grandes rasgos un esquema de la clasificación descrita anteriormente.

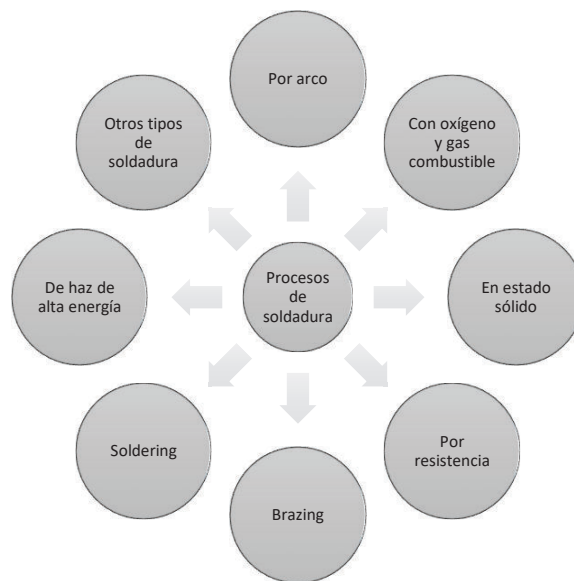


Figura 1. 1. Clasificación de la soldadura.

(Fuente, 2017)

### 1.2.2.1 Soldadura en estado sólido (SSW)

En este proceso de soldadura la unión de los materiales proviene de aplicar presión o combinando calor y presión, cuando se usa calor la temperatura de trabajo debe ser menor que la temperatura de fusión del material que se va a soldar. Para este tipo de proceso no es necesario material de aporte.

Para este tipo de soldadura existe una variedad de procesos detallados en la tabla 1.1

Tabla 1. 1. Procesos relacionados a la soldadura en estado sólido.

<b>SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO</b>	
<b>PROCESO</b>	<b>CODIFICACIÓN AWS</b>
Soldadura por coextrusión	CEW
Soldadura en frío	CW
Soldadura por difusión	DFW
Soldadura por presión isoestática en caliente	HIPW
Soldadura por explosión	EXW
Soldadura por forja	FOW
<b>Soldadura por fricción</b>	<b>FRW</b>
Soldadura a presión en caliente	HPW
Soldadura por rodillos	ROW
Soldadura ultrasónica	USW

(Fuente Propia, 2017)

### 1.2.3 El acero

Se denomina Acero a aquellos productos ferrosos cuyo porcentaje de Carbono está comprendido entre 0,05 y 1,7 %. El Acero es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable. Ampliamente usado y a un precio relativamente bajo, el Acero combina la resistencia y la trabajabilidad, lo que se presta a fabricaciones diversas. Asimismo, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones. El Acero funde entre 1400 y 1500°C pudiéndose moldear más fácilmente que el Hierro, resulta más resistente que este, pero es más propenso a la corrosión, además posee la cualidad de ser maleable, mientras que el hierro es rígido. (Construmática, s.f.). Las aleaciones ferrosas, incluyen aceros de bajo carbono, aleaciones y aceros para herramienta, aceros inoxidables y hierros colados. Estos son los materiales de más amplio uso en el mundo. (Askeland, Fulay, & Writght, 2011)

### 1.2.3.1 Clasificación de los aceros

Los aceros se pueden clasificar con base en su composición o en la forma en que han sido procesados. Los aceros al carbono contienen hasta alrededor del 2% de carbono. Estos aceros pueden contener otros elementos como el silicio, cobre, manganeso. En la figura 1.2 se muestra una breve clasificación de los diferentes aceros.

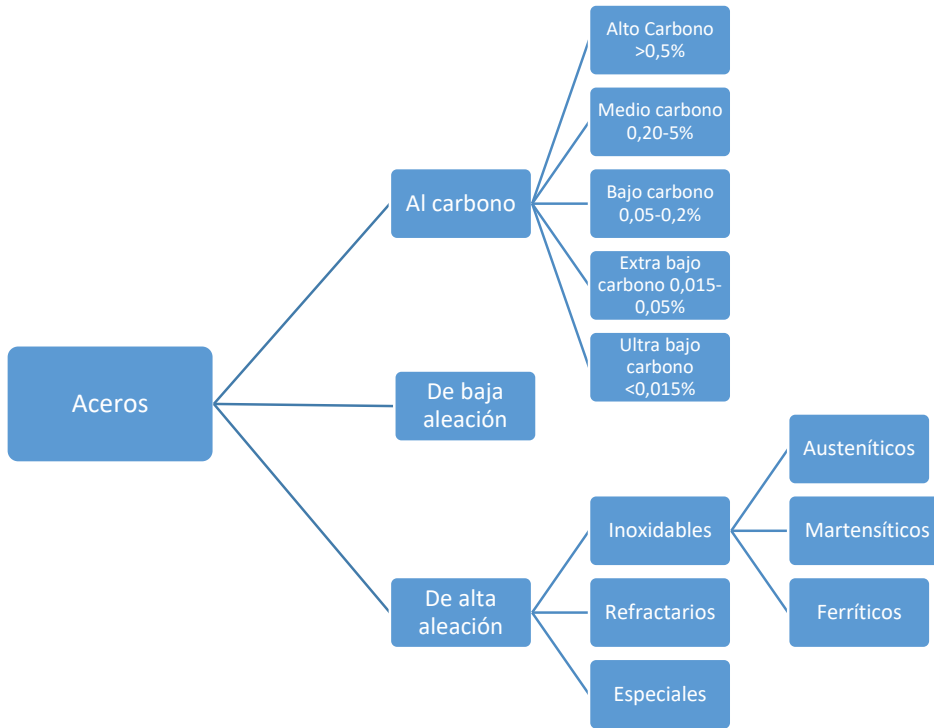


Figura 1. 2. Clasificación del acero.

(Fuente Propia, 2017)

### 1.2.3.2 Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables se seleccionan debido a su excelente resistencia a la corrosión. Todos los aceros verdaderamente inoxidables contienen un mínimo de alrededor de 11% de cromo, lo cual permite que se forme una capa delgada y protectora de óxido de cromo cuando el acero se expone al oxígeno. El cromo es lo que hace inoxidables a este tipo de aceros y además actúa como un elemento estabilizador de ferrita. El cromo hace que la austenita se contraiga y que la ferrita aumente de tamaño. (Askeland, Fulay, & Wright, 2011)

Hay un número importante de distintos aceros inoxidables. Su resistencia a la corrosión, soldabilidad, propiedades mecánicas y costo, varía en un rango muy amplio, por esa razón es importante especificar el acero inoxidable más apropiado para una dada aplicación. El costo se eleva entre 5 y 10 veces el de un acero al carbono.

Pueden estar aleados, además, con Cu, Al, Si, Ni, Mo. Nb, Ti, que también aumentan su resistencia a la corrosión, directa o indirectamente, en condiciones específicas. Algunos aceros se auto templean, otros no toman temple, resisten las altas temperaturas, se mecanizan con facilidad, tienen capacidad de deformarse plásticamente o son soldables. (Laufgang, 2003)

Este tipo de aceros se clasifican en:

- Aceros inoxidable ferríticos
- Aceros inoxidable martensíticos
- Aceros inoxidable endurecidos por precipitación
- Aceros inoxidable dúplex
- Aceros inoxidable austeníticos

Un sistema de numeración de tres números se utiliza para identificar los aceros inoxidable, en general los dos últimos números de esta designación no tienen un significado específico, pero el primero indica a que grupo pertenece. (Avner, 1988)

Tabla 1. 2. Designación de los aceros.

DESIGNACIÓN DE LA SERIE	GRUPOS
2XX	Cromo-níquel-manganeso; No endurecibles, austeníticos, no magnéticos.
3XX	Cromo-níquel; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos.
4XX	Cromo; endurecibles, martensíticos, magnéticos
4XX	Cromo; no endurecibles, ferríticos, magnéticos.
5XX	Cromo; bajo cromo, resistentes al calor.

Fuente:(Avner, 1988)

### 1.2.3.3 Aceros inoxidable austeníticos

El níquel es un elemento estabilizador de austenita que aumenta el tamaño de campo austenítico, al mismo tiempo que casi logra eliminar por completo la ferrita de las aleaciones de hierro-cromo-carbono. Si el contenido de carbono está por debajo de 0,03%, los carburos no se forman y el acero es prácticamente austenita a temperatura ambiente.

Esta clase de acero tiene una excelente ductilidad, capacidad para su conformación y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un largo endurecimiento por



solución sólida, y los aceros inoxidable austeníticos pueden ser trabajados en frío para darles resistencia más alta que los aceros inoxidable ferríticos. Debido a que no es ferromagnético presenta una gran ventaja para diferentes aplicaciones. (Askeland, Fulay, & Wright, 2011)

Además, esta clase de acero inoxidable presenta una buena soldabilidad y trabaja en un amplio rango de temperaturas, esto y lo anteriormente indicado hace que se convierta en el más usado en la industria como por ejemplo en la contención y soporte estructural, usos arquitectónicos, utensilios de cocina, herramientas médicas, buques y tuberías industriales.

Una de las pocas desventajas de este tipo de acero es que es más costoso que los martensíticos y ferríticos de medio y bajo cromo, debido a que tiene un mayor número de elementos aleantes.

Los aceros inoxidable austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 200 y 300 AISI. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. (Bonnet)

#### **1.2.3.4 Elementos aleantes del acero inoxidable y mejoras obtenidas con la aleación**

Las clasificaciones normalizadas de aceros como la AISI, ASTM y UNS, establecen valores mínimos o máximos para cada tipo de elemento. Estos elementos se agregan para obtener características determinadas como templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, soldabilidad o maquinabilidad. (Castillo, Díaz, & Tercero, 2014)

A continuación, en la tabla 1.3 se detalla el elemento y su efecto sobre la aleación.

Tabla 1. 3. Efecto de los elementos aleantes en los aceros inoxidable.

<b>ELEMENTO</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
Cromo	Proporciona resistencia a la corrosión.
Níquel	Formador de austenita, incrementa la resistencia contra los ácidos minerales, genera una fuerte adherencia a los óxidos a alta temperatura.
Molibdeno	Incrementa la resistencia contra los iones de cloruro
Cobre	Proporciona resistencia al ácido sulfúrico y es un endurecedor por precipitación junto al Aluminio y Titanio.

Manganeso	Formador de austenita, combinado con azufre aumenta la solubilidad del nitrógeno
Azufre	Formador de austenita, mejora la resistencia, la soldabilidad de algunos aceros inoxidable austeníticos y el maquinado de algunos aceros austeníticos inoxidables.
Titanio	Estabiliza los carburos, y previene la formación de carburos de cromo, favorece el endurecimiento por precipitación.
Niobio	Estabilizador de carburos, favorece el endurecimiento por precipitación.
Aluminio	Desoxidante, favorece el endurecimiento por precipitación.
carbono	Generador de resistencia y formador de carburos.

(Pérez, y otros, 2014)

### 1.2.3.5 Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos

Como ya se ha visto, existen varios tipos de aceros inoxidables y no todos son adecuados para aplicaciones estructurales, particularmente cuando se llevan a cabo operaciones de soldadura.

En la tabla 1.4 se presentan varios aceros inoxidables y los respectivos valores de sus propiedades mecánicas.

Tabla 1. 4. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente de varios aceros inoxidables austeníticos.

Aleación	Resistencia a la tensión		Resistencia a la fluencia		Elongación	Reducción
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	(%)	En área(%)
302	515	75	205	30	40	50
304	515	75	205	30	40	50
304L	480	70	170	25	40	50
308	515	70	205	30	40	50
309	515	75	205	30	40	50
310	515	75	205	30	40	50
316	515	75	205	30	40	50
316L	480	70	170	25	40	50
317	515	75	205	30	40	50
321	515	75	205	30	40	50
330	480	70	205	30	30	50

(Pérez, y otros, 2014)

### **1.2.3.6 Aceros al carbono**

Los aceros al carbono son aleaciones en base al hierro, con contenidos de carbono superiores al 0,05% e inferiores al 2% en peso; la gran mayoría de estos aceros tiene contenidos de carbono entre 0,1 y 1% de carbono. En los aceros comerciales siempre hay otros elementos, además de hierro y carbono, sin embargo, podemos hacer abstracción de estos otros elementos y suponer que ellos están dentro de rangos normales y que son constantes.

Los aceros al carbono se clasifican en:

- Aceros de bajo carbono
- Aceros de medio carbono
- Aceros de alto carbono

### **1.2.3.7 Aceros de bajo carbono**

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono. Este tipo de acero contiene menos de 0,25% de carbono, no responde al tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; además son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Se utilizan para fabricar carrocerías de automóviles, vigas (en forma de I, canales y ángulos) y láminas para construir tuberías, edificios, puentes y latas estañadas. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una ductilidad de 25% del límite elástico.

Otros aceros bajos en carbono son los de alta resistencia y baja aleación (HSLA), que contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en combinaciones combinadas de aproximadamente el 10% en peso y poseen mucho mayor resistencia mecánica que los aceros bajos en carbono simples. Se aumenta la resistencia por tratamiento térmico y el límite elástico excede de 480 MPa; además son dúctiles y mecanizables. Este tipo de acero es más resistente a la corrosión que los aceros de bajo carbono simples, a los que suele reemplazar en muchas aplicaciones donde la resistencia mecánica es crítica: puentes, torres, columnas de soporte de altos edificios y recipientes a presión. (Callister, 2005)

En las siguientes tablas se presentan tanto las composiciones como algunas propiedades mecánicas de varios aceros al carbono y aceros aleados:

Tabla 1. 5. Composiciones de 4 aceros bajos en carbono y 2 aceros de baja aleación.

DESIGNACIÓN		COMPOSICIÓN (% en peso)		
AISI/SAE o número ASTM	NÚMERO UNS	C	Mn	OTROS
<b>ACEROS BAJOS EN CARBONO</b>				
1010	G10100	0,10	0,45	
1020	G10200	0,20	0,45	
A36	K02600	0,29	1,00	0,20 Cu
A519 GRA. 60	K02700	0,31	1,00	0,25 Si
<b>ACEROS DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA</b>				
A633 GRA. E	K12002	0,22	1,35	0,3 Si; 0,08 V; 0,03 Nb
A656 GRA. 1	K11804	0,18	1,60	0,6 Si; 0,1 V; 0,2 Al; 0,015 N

(Callister, 2005)

Tabla 1. 6. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de 4 aceros de bajo carbono y 3 de baja aleación.

AISI/SAE o número ASTM	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	DUCTILIDAD (% EL en 2 pulgadas)	APLICACIONES TÍPICAS
<b>ACEROS BAJOS EN CARBONO</b>				
1010	325	26	28	Paneles de automóvil, clavos y alambre
1020	380	30	25	Tubos, aceros laminados y estructurales
A36	400	32	23	Estructuras
A516 GRA. 70	485	38	21	Recipientes a presión
<b>ACEROS DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA</b>				
A440	435	290	21	Estructuras atornilladas o remachadas
A633 GRA. E	520	380	23	Estructuras utilizadas a bajas temperaturas
A656 GRA. 1	655	552	15	Bastidores de camiones y vagones de tren

(Callister, 2005)

### 1.2.3.8 Aceros de medio carbono

Esta clase de acero tiene porcentajes de carbono comprendidos entre 0,25 y 0,6%. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas. Se suelen utilizar en la condición de revenido, con microestructura de martensita revenida. Se trata de aceros de baja templabilidad, solo tratables en piezas de delgada sección y velocidades de temple muy rápidas. Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así gran variedad de combinaciones resistencia ductilidad. Estos aceros son más resistentes que los aceros de bajo carbono, pero más dúctiles y tenaces.

Tabla 1. 7. Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de aceros de medio carbono y de baja aleación.

NÚMERO AISI	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	DUCTILIDAD (% EL en 2 pulgadas)	APLICACIONES TÍPICAS
<b>ACEROS MEDIOS EN CARBONO</b>				
1040	605-780	430-585	33-19	Cigüeñales, pernos
1080 <sup>a</sup>	800-1310	480-980	24-13	Cinceles, martillos
1095 <sup>a</sup>	760-1280	510-830	26-10	Cuchillos, hojas de sierra
<b>ACEROS ALEADOS</b>				
4063	786-2380	710-1770	24-4	Muelles, herramientas
4340	980-1960	895-1570	21-11	Casquillos, tubos
6150	815-2171	745-1860	22-7	Ejes, pistones, engranajes

(Callister, 2005)

### 1.3 Soldadura de metales disímiles

De acuerdo a la creciente necesidad de introducir nuevas características en el desarrollo de la industria, tanto en producción como en mantenimiento, una de las alternativas que más se ha desarrollado es la de unir distintos metales o materiales, para de esta manera sacar provecho de las propiedades específicas de los mismos.

Se consideran materiales disímiles a aquellos que son químicamente distintos, como los metales puros, cobre y aluminio, o a aquellos con distinto porcentaje de aleación, como acero al carbono y acero inoxidable; o que además puedan tener estructuras metalúrgicas distintas como los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos.

Generalmente la unión entre materiales disímiles se las realiza mediante procesos de soldadura en estado sólido (explosión, fricción, ultrasonido, etc.) o brazing (soldadura fuerte), debido a que en estos procesos la aleación de los metales es insignificante. Para estos casos de unión, solamente se considera la diferencia de las propiedades mecánicas y físicas de los metales base y su influencia en las condiciones de servicio de la unión. (Soldargen, 2015).

Cuando la unión de los metales es en cambio mediante procesos de fusión, la aleación entre metales base y el metal de aporte-cuando este es usado-se deberá tener un mayor cuidado, ya que el metal de soldadura resultantes puede comportarse muy diferente a uno o ambos metales base. La unión de metales con grandes diferencias en sus propiedades químicas, mecánicas y físicas puede presentar problemas durante y después de la soldadura. (Soldargen, 2015). Existe una cantidad de combinaciones de aleaciones metálicas distintas especificadas hasta la actualidad. La selección de procesos y aleaciones metálicas distintas depende sobre todo de la aplicación y las condiciones de servicio. (Lippold & Kotecki, 2005)

### **1.3.1 Diagrama de Schaeffler**

El diagrama de Schaeffler (figura 1.3), se usa principalmente para predecir la estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidables con aceros al carbono, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición.

Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a:

- Carbono: Máximo 0,2%
- Manganeso: Máximo 1,0%
- Silicio: Máximo 1,0%
- Molibdeno: Máximo 3,0%
- Niobio: Máximo 1,5%

Para su empleo se parte del cromo y el níquel del material base y del material de aporte. Estos se calculan a partir de las fórmulas dadas a continuación, para luego graficarlas en el diagrama de Schaeffler.

$$\text{Cromo equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5*\%Si + 0,5*\%Nb$$

$$\text{Níquel equivalente} = \%Ni + 30*\%C + 0,5*\%Mn$$

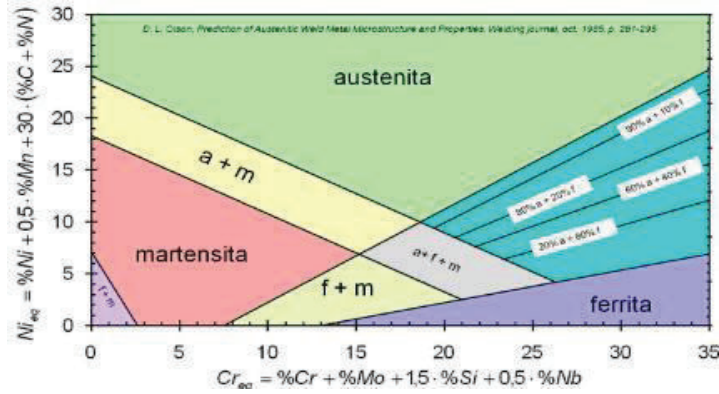


Figura 1. 3. Diagrama de Schaeffler.  
(Ebah, 2003)

### 1.4 Soldadura por fricción

La soldadura por fricción es un proceso comercial ampliamente usado y es conveniente para los métodos de producción automatizada. El proceso fue creado en la antigua unión soviética, y fue introducido en Estados Unidos alrededor de 1960. La soldadura por fricción (FRW por sus siglas en inglés) es un proceso en estado sólido en el cuál se obtiene la coalescencia mediante la combinación de calor por fricción y presión. La fricción se induce mediante el frotamiento mecánico entre las dos superficies, generalmente por la rotación de una pieza respecto a la otra, con el propósito de elevar la temperatura en a interfaz de unión hasta un rango de trabajo caliente para los metales involucrados. Después, las piezas se dirigen una hacia otra con suficiente fuerza para formar una unión metalúrgica.

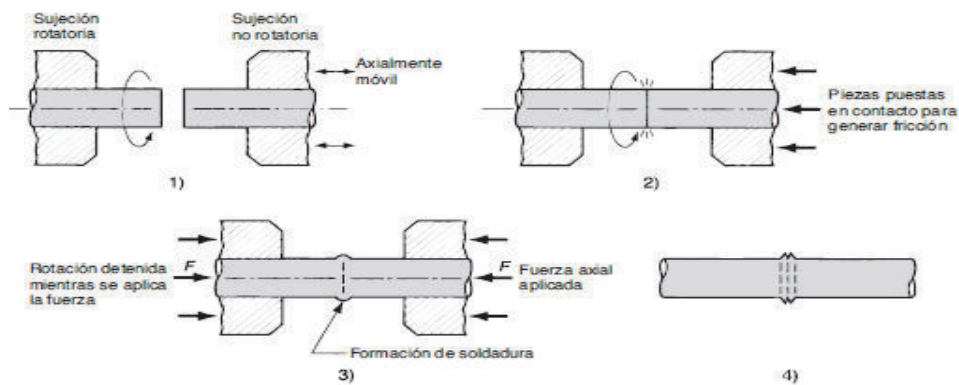


Figura 1. 4. Secuencia de pasos para realizar la soldadura por fricción.  
(Groover, 2007)

La figura 1.4 muestra la secuencia para soldar dos piezas cilíndricas, la aplicación típica del proceso. La fuerza de compresión axial recalca las piezas y se produce un reborde

para el material desplazado. Cualquier película superficial que se encuentre sobre las superficies de contacto es expulsada durante el proceso. Después debe emparejarse el reborde (por ejemplo, por torneado) para proporcionar una superficie lisa en la región soldada. Cuando se realiza de forma correcta, no ocurre una fusión en la superficie de empalme. Normalmente no se usa metal de relleno, ni fundentes o gases protectores. (Groover, 2007)

Es común que el tamaño de la zona de soldadura (generalmente una región angosta), dependa de los siguientes parámetros:

- La cantidad de calor generado.
  - La conductividad térmica de los materiales.
  - Las propiedades mecánicas de los materiales a temperaturas elevadas.
- (Kalpakjian & Schmid, 2008)

La forma de la unión soldada va a depender de la velocidad rotacional y de la presión axial aplicada como lo muestra la figura 1.5.

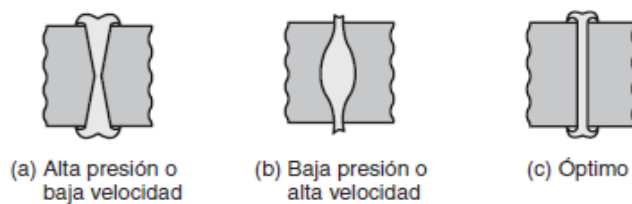


Figura 1. 5. Formas de las zonas de fusión en la soldadura por fricción, en función de la fuerza axial y la velocidad de rotación.

(Kalpakjian & Schmid, 2008)

La soldadura por fricción se puede utilizar para unir una amplia variedad de materiales, eso sí, se debe tener en cuenta que uno de los componentes debe tener una simetría rotacional. Este proceso produce una estrecha zona afectada por el calor y puede usarse para unir metales distintos. Generalmente deben removerse las rebabas y el recalcado reduce la longitud de las piezas (lo cual debe tomarse en cuenta para el diseño de los productos).

#### 1.4.1 Soldadura por fricción lineal (LFW)

En la soldadura por fricción lineal (figura 1.6) se aplican los mismos principios que en el método rotativo. Uno de los componentes se mantiene estático mientras se mueve el otro para unirlos. La diferencia es que el movimiento no es rotativo, se implementa una oscilación lateral. La soldadura por fricción lineal tiene varias aplicaciones importantes



en la industria aeroespacial. Soldar las palas a los discos supone grandes ventajas y reducción del costo sobre los métodos tradicionales de manufactura. (Thompson Friction Welding, 2014)

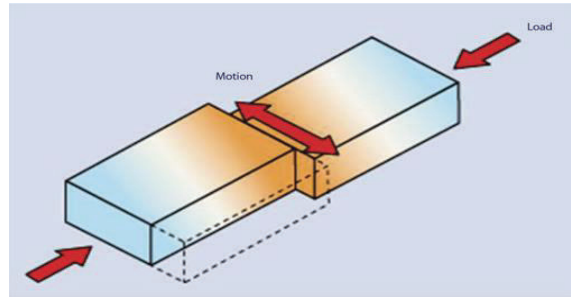


Figura 1. 6. Soldadura por fricción lineal.  
(Mateo, 2014)

#### 1.4.2 Soldadura por fricción y agitación (FSW)

En la soldadura por fricción y agitación (FSW, por sus siglas en inglés) desarrollado en 1991 (figura 1.7), se frota un tercer cuerpo en contra las dos superficies a unir. Una sonda rotatoria no consumible (por lo general de 5 a 6mm de diámetro y 5mm de altura) se inserta dentro de la unión. Las presiones de contacto provocan calentamiento por fricción, elevando la temperatura a un intervalo de 230 a 260 °C. La sonda en la punta de la herramienta giratoria fuerza el calentamiento y mezcla (o agita) el material en la unión como se muestra en la figura siguiente.

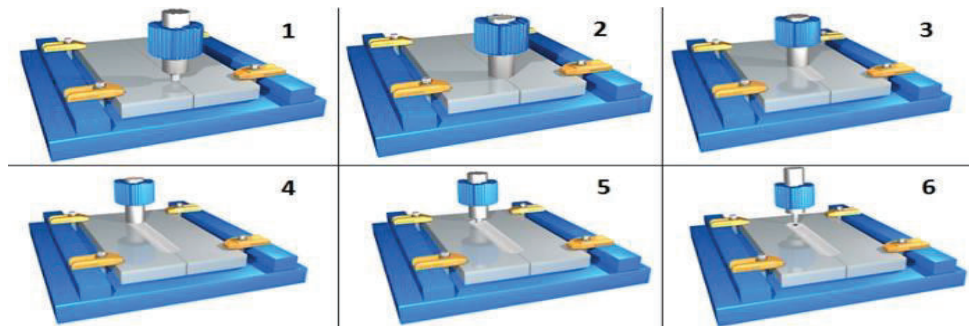


Figura 1. 7. Soldadura por fricción y agitación.  
(Wikipedia, 2016)

El equipo para realizar este tipo de soldadura puede ser una fresadora convencional con husillo vertical y es relativamente fácil implantar el proceso. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

### **1.4.3 Soldadura por fricción e inercia (IFW)**

En este proceso la energía cinética almacenada en una rueda giratoria se convierte en energía térmica de fricción para unir principalmente dos componentes de geometría cilíndrica. Un componente se sujeta a la rueda giratoria, mientras que el otro componente se sujeta en un mandril no giratorio conectado a un pistón hidráulico. Después del contacto inicial, la velocidad del volante comienza a desacelerarse debido a la conversión de la energía almacenada en energía térmica, haciendo que la temperatura aumente bruscamente en la interfaz debido a la fricción generada. En última instancia, una capa plastificada se forma entre los dos componentes, donde se produce la consolidación. La aplicación de presión hace que el material plastificado fluya fuera de la línea de la junta que forma un destello, que disipa parte de la energía de la soldadura causando que la zona de interfaz se enfríe ligeramente. (Attallah & Preuss, 2012).

La masa rotatoria en las máquinas de soldadura por fricción e inercia se puede ajustar para aplicaciones que requieren diferentes niveles de energía (estos dependen de las propiedades y el tamaño de la pieza de trabajo). (Kalpakjian & Schmid, 2008)

### **1.4.4 Soldadura por fricción de impulso directo**

En la soldadura por impulso directo o por fricción convencional la energía o calor producido se genera manteniendo la una pieza de trabajo fija (mandril fijo) y la otra móvil (conectada a un motor), la pieza móvil gira a una velocidad constante al mismo tiempo que se junta con la pieza fija mediante la aplicación de presión, la fricción generada entre las superficies de contacto produce calor, esto continua hasta que se cumpla un tiempo de soldadura predeterminado o un encogimiento o vuelco fijado de antemano, entonces se deja de aplicar la fuerza impulsora rotacional y la pieza de trabajo giratoria se detiene por la aplicación de una fuerza de frenado, la presión de soldadura final (presión de forja) se mantiene o incrementa aun después de que se detiene el mandril giratorio. La combinación de la presión y el calor generado por la fricción entre las piezas produce la soldadura de las mismas sin ningún material de aporte. (Lincango & Viteri, 2016)

#### **1.4.4.1 Velocidad de rotación**

Es un parámetro importante para determinar el calor que se va a generar para producir la unión de los materiales a soldarse. Es el parámetro que menos influye en la calidad de la junta. Se debe utilizar una velocidad adecuada, sino se lo hace así, con velocidades muy bajas se extraen partículas profundas del material base, y si la

velocidad es muy elevada, se genera un efecto de limpiado en las superficies (desgaste de la capa superficial).

#### **1.4.4.2 Presión de calentamiento**

Es la presión que se genera al aplicar la fuerza axial (de calentamiento) predeterminada sobre las superficies de los elementos a soldarse, esta presión es la encargada de generar el rozamiento entre las caras de los elementos y producir el calor necesario antes de la forja.

#### **1.4.4.3 Presión de forja**

Es la presión que se genera al aplicar una fuerza mayor (de forja) sobre los elementos a soldarse, se aplica al terminar la rotación debido al frenado que se genera con el pedal, con el fin de lograr la unión, es muy importante, ya que determina la calidad de la soldadura.

#### **1.4.4.4 Encogimiento axial**

Se forma debido a la fuerza de forja que se aplica, y se da por la formación de rebabas hacia el exterior, en estas rebabas se encuentran ubicadas las impurezas de las superficies en contacto, es de primordial importancia ya que de este depende el desperdicio de material.

#### **1.4.4.5 Tiempo de calentamiento**

Este tiempo se determina por pruebas experimentales, es el tiempo que toma en calentar el material a soldar hasta el punto de plastificación, no existe un rango fijo de valores para este tiempo ya que depende completamente de las propiedades propias de cada material.

#### **1.4.4.6 Tiempo de frenado**

Es un valor instantáneo, aproximadamente varía de 1 a 5 segundos, mismo que depende de los diámetros del material base, el estado del conjunto de frenado de la máquina soldadora y la sensibilidad del operador. (Almeida Robalino, 1989)

#### **1.4.4.7 Tiempo de forja**

No es de gran interés ya que su duración se resume al tiempo que tarda en realizar el encogimiento axial en los materiales a soldar después de la aplicación de la presión de forja que es aproximadamente menor a 5 segundos. (Almeida Robalino, 1989)

### 1.4.5 Etapas del proceso de soldadura por fricción.

Generalmente se utiliza un modelo de tres etapas (figura 1.8) para definir las etapas dependientes de la fluctuación en el par friccional debido al contacto entre los componentes giratorios, o cuatro etapas si una etapa inicial es añadida durante la cual se alcanza la velocidad de rotación deseada

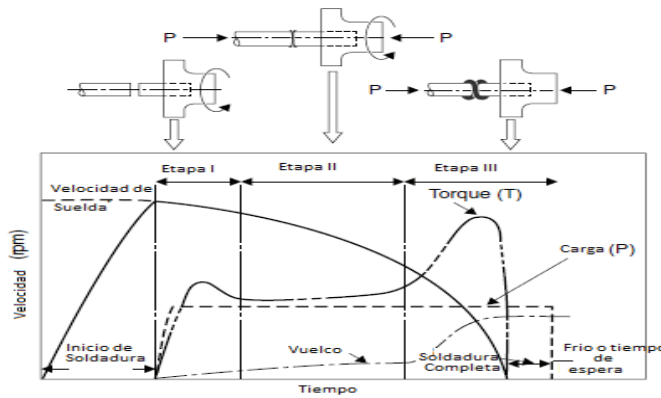


Figura 1. 8. Gráfica del ciclo de soldadura por fricción.

(Attallah & Preuss, 2012)

- Etapa I (contacto inicial). - Los dos componentes son puestos en contacto, lo que se traduce en un incremento rápido del torque friccional, una desaceleración de la velocidad de rotación y, por consiguiente, a una disipación considerable de la energía almacenada debido a la fricción en seco entre las interfaces. La fricción también conduce a la eliminación de cualquier irregularidad superficial y asperezas, similar a lo que ocurre durante el desgaste, hasta que se alcanza un contacto perfecto. Se forma una capa plastificada (figura 1.9 a).
- Etapa II (etapa de transición). - La deformación termomecánica inducida por fricción hace que el material en la interfaz delgada esté completamente plastificado (viscoplástico). Así, el proceso alcanza una condición transitoria de estado estacionario, donde el endurecimiento por deformación es superado por calentamiento por fricción. Esto se manifiesta en un par aproximadamente constante, y una velocidad de rotación (y potencia) gradualmente decreciente. También se produce un aumento gradual de las rebabas de material debido a la combustión y al inicio de la formación de flamas en la interfase. Sin embargo, el calentamiento por fricción continua conduce al ensanchamiento de la región plastificada (figura 1.9 b).
- Etapa III (fase de forjado). - Con la disminución de la velocidad de rotación mientras se sigue aplicando la presión de forjado, el par aumenta hasta otro pico para superar el enfriamiento y endurecimiento. Se cree que este aumento en el

par refina la microestructura de la junta en esta fase final, así como de igual forma provoca la expulsión de cualquier óxido o inclusiones por medio del calor generado por el contacto de las superficies. La rebaba de material aumenta y se forman más chispas, lo que conduce a un enfriamiento adicional de la interfaz (figura 1.9 c). Después de alcanzar el máximo trastorno, la carga de forjado se mantiene aplicada hasta que la soldadura se enfría. (Attallah & Preuss, 2012)

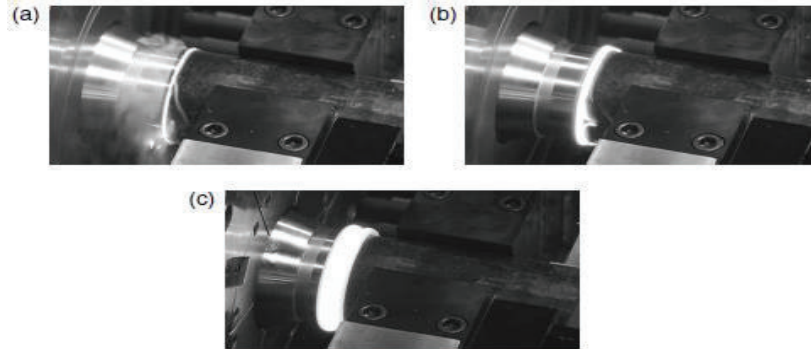


Figura 1. 9. Etapas de la soldadura por fricción (a) Contacto inicial (b) etapa de transición (c) forja.

(Attallah & Preuss, 2012)

#### **1.4.6 Ventajas y desventajas de la soldadura por fricción rotacional.**

El uso de este proceso provee de varias ventajas, tanto desde el punto de vista de la manufactura como en lo concerniente a la integridad estructural. A continuación, se presentan las ventajas y desventajas más significativas del proceso:

##### Ventajas

- Es completamente automatizable y repetible.
- No requiere el uso de material de relleno.
- No es necesario tener una atmósfera protectora gracias a su mecanismo de auto limpieza.
- El sistema para optimizar y controlar el proceso es simple ya que solo se necesita controlar dos variables.
- Se pueden unir materiales iguales o disímiles.
- Debido a que no utiliza un material de aporte se reduce el peso, que en ciertas aplicaciones es crítico.
- Es seguro y amigable con el medio ambiente, ya que no produce gases dañinos.
- La zona afectada por el calor es relativamente más estrecha en comparación con otros procesos de soldadura.

## Desventajas

- Se requiere una inversión inicial significativa en cuanto a equipos y herramientas.
- Es necesario que una de las piezas tenga un eje de simetría y pueda girar alrededor del mismo.
- Es un proceso muy especializado, y si es necesario solo para un número limitado de existencias, la inversión no será rentable.

### **1.4.7 Características presentes en la zona de soldadura**

En las uniones soldadas por fricción como en el caso de los metales, se puede observar que el grano en la interfase es equiaxial y de 10 a 30 veces más fino que el grano del metal base. Un crecimiento de grano no muy grande se puede observar en la zona afectada por el calor, se puede decir que las causas para que se produzca este fenómeno son las siguientes:

- El corto tiempo del efecto de la elevada temperatura y la alta tasa de enfriamiento de pequeños volúmenes del metal calentado hasta puntos críticos.
- El refinamiento mecánico del grano durante la fricción.
- La formación de granos durante el proceso de desgaste de las superficies sometidas a fricción. (Lincango & Viteri, 2016)

Ya que los cuerpos ajenos a los materiales son destruidos como parte de la deformación plástica del metal y son expulsados en el eje radial para que el contacto se dé entre las superficies limpias, se puede ver una ausencia de macro defectos.

Si el proceso de soldadura no se realiza adecuadamente la junta final puede presentar varios defectos como: ausencia de unión en el centro de la sección transversal, si el tiempo de precalentamiento fue insuficiente, falta de unión en la periferia de la sección transversal por la baja presión de calentamiento.

Además, para evitar que se produzcan más defectos, se debe realizar una excelente preparación superficial, es decir, realizar un corte correcto de los elementos, que la superficie esté completamente libre de impurezas y además verificar la alineación de la máquina utilizada.

### **1.4.8 Aplicaciones de la soldadura por fricción**

Este método es especialmente útil para la producción en serie. El costo relativamente alto se equilibra con una mayor tasa de producción y un menor requerimiento de mano de obra. El proceso tiene varias ventajas y el hardware podría ser fácilmente ajustado. Por lo tanto, el método también resulta útil para la producción de partes relativamente

más pequeñas. Con estas ventajas, la soldadura por fricción ha encontrado una aplicación generalizada en la industria. La soldadura por fricción generalmente se puede aplicar en las siguientes industrias con aplicaciones listadas:

- Máquina de producción y repuestos: ruedas dentadas, pistones, cilindros hidráulicos, pistones radiales, eje con tornillo sin fin, cigüeñales, brocas, válvulas.
- Automática de la industria: válvulas, válvulas, ejes de transmisión, palancas de engranajes, sujetadores de ejes, mecanismos de transmisión, salas de precalentamiento, tubos, ejes de banjo.
- Aviación e industria espacial: cámaras de combustión, husillos, turbinas, rotores, tuberías, accesorios, bridas.
- Industria de trabajos: Taladros espirales, fresas, taladradoras, escariadores, herramientas de corte.
- Industria eléctrica, electrónica y química: cámara receptora para análisis de gas, columnas de segregación cromatográficas, conectores eléctricos, top de soldadura continua, contactos oscilantes, racores de tuberías. (Uskut, Unlu, Yilmaz, & Akdag)



Figura 1. 10. Aplicaciones de la soldadura por fricción.  
(Uskut, Unlu, Yilmaz, & Akdag)

## 1.5 Ensayos

Son procedimientos normalizados experimentales que se realizan en los materiales con la finalidad de determinar las propiedades de los mismos, o de validar y determinar las características del proceso.

Mediante el desarrollo de normas universales y procedimientos de ensayos, se pueden garantizar buenos resultados, ya que la forma en la que se realiza un ensayo es primordial sobre los resultados obtenidos. Al realizar los ensayos se pueden determinar propiedades, definir especificaciones, validar procesos y establecer un control de calidad.

Los ensayos se pueden clasificar en:

- Ensayos de características
- Ensayos tecnológicos
- Ensayos destructivos
- Ensayos no destructivos

### **1.5.1 Ensayos destructivos**

Se denomina así, ya que luego de realizarlos el elemento ensayado no puede realizar su función y es destruido, los ensayos destructivos mayormente utilizados dentro de la industria son: ensayo de tracción/compresión, ensayo de doblado o flexión y el ensayo de impacto.

#### **1.5.1.1 Ensayo de tracción**

El ensayo de tracción es uno de los más importantes para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

El ensayo consiste en someter una pieza de forma cilíndrica o prismática de dimensiones normalizadas a una fuerza de tracción continua, este ensayo se realiza mediante una máquina universal de tracción que provoca la deformación de la probeta del material a ensayar al aplicarle una carga progresiva en sentido axial.



Figura 1. 11. Máquina universal de ensayos usada para el ensayo de tracción.  
(Solucoes Industriais, 2017)



La probeta se sujeta por sus extremos en la máquina por medio de mordazas que a su vez someten la muestra a tensión progresiva. Esta carga provoca que la probeta se vaya alargando en longitud y adelgazando en sección (estricción) de un modo progresivo hasta alcanzar la fractura de la pieza. Es, por tanto, un ensayo destructivo y, para que sea válido, la rotura debe producirse en la zona central de la probeta.

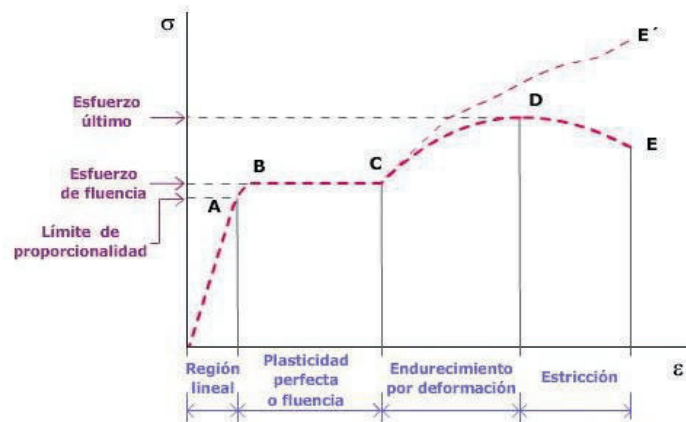


Figura 1. 12. Gráfica Esfuerzo-Deformación.  
(Fuente Propia, 2017)

### 1.5.1.2 Ensayo de Flexión

El objetivo de este ensayo (figura 1.13) es observar el comportamiento y la deformación de un material al aplicarle una fuerza transversal, dependiendo de su longitud, diámetro, etc.

El ensayo de flexión se basa en la aplicación de una fuerza al centro de una barra soportada en cada extremo, para determinar la resistencia del material hacia una carga estática o aplicada lentamente. Normalmente se usa para materiales frágiles.

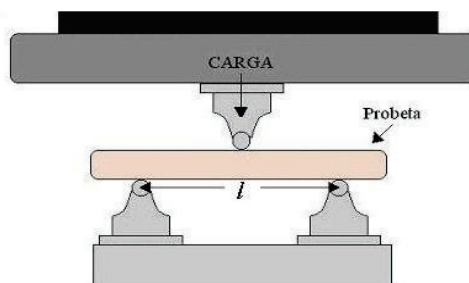


Figura 1. 13. Ensayo de flexión.  
(Construmática, s.f.)

Este ensayo también se puede realizar en la máquina universal de ensayos (figura 14) con sus respectivas adecuaciones.

### **1.5.2 Ensayos no destructivos (END)**

Los ensayos no destructivos (END) aparecen como una expresión de la actividad inteligente del hombre en sus primeros deseos de dominar y transformar la naturaleza. Pese a su aplicación continuada en el tiempo sólo se les reconoce como medio sistemático de ensayo de los materiales a principios de la era industrial y recién hace algunas décadas como una nueva disciplina tecnológica. El poder asegurar que las condiciones de funcionalidad y contabilidad de un producto se cumplan dentro de las especificaciones de su diseño, ha sido una preocupación constante en el desarrollo industrial. Los END constituyen una herramienta de importancia relevante con un campo muy importante de aplicación a nivel de ingeniería que se puede definir como las disciplinas tecnológicas que reúnen una serie de métodos que permiten obtener una información sobre propiedades, estructuras y condiciones de un material o componente, sin modificar su aptitud para el servicio. (Aquize Luna, 2011)

#### **1.5.2.1 Clasificación de los END**

De acuerdo con su aplicación, los ensayos no destructivos se dividen en:

- Técnicas de inspección superficial
- Técnicas de inspección volumétricas
- Técnicas de inspección de integridad o hermeticidad

#### **1.5.2.2 Técnicas de inspección superficial**

Mediante estas sólo se comprueba la integridad superficial de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie, abiertas a ésta o a profundidades menores a 3mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Inspección visual (VT).
- Líquidos penetrantes (PT).
- Partículas magnéticas (MT).
- Electromagnetismo (ET).
- Corrientes Inducidas
- Termografía

### 1.5.2.3 Técnicas de inspección volumétricas

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. Este tipo de inspección se realiza por medio de los siguientes ensayos:

- Radiografía Industrial (RT).
- Ultrasonido Industrial (UT).
- Radiografía neutrónica (NT).
- Emisión Acústica (AET).

### 1.5.2.4 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad

Son aquellas en las que se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica. (Aqize Luna, 2011)

### 1.5.2.5 Inspección Visual (VT)

La inspección visual (figura 1.14) es el ensayo no destructivo por excelencia. La luz, su agente físico, no produce daño alguno a la inmensa mayoría de los materiales. La excepción son las emulsiones fotográficas. El ensayo de inspección visual es un método óptico cuyo examen se efectúa empleando el sentido de la vista humana y como energía interactuante la luz (380 a 770 nm de longitud de onda) y que puede ser directo e indirecto. En el primer caso se emplea la vista directa sin ayuda de accesorios y en el segundo caso se emplean estos tales como: reglas, lupas, espejos, endoscopios, binoculares. Este método, proporciona indicaciones inmediatas que frecuentemente no precisan de interpretación elaborada. Sin embargo, no debe concluirse que todo “lo que se ve” es “como se ve”. (Ruiz, 2011)



Figura 1. 14. Inspección visual.  
(PND Soluciones Integrales, 2016)

### 1.5.3 Niveles de certificación

Las certificaciones son herramientas de reconocimiento formal por una tercera parte independiente, del cumplimiento de un conjunto de requisitos por parte de personas. Tiene como objetivo el aportar confianza en la competencia de las personas certificadas para realizar determinadas actividades. Existen tres niveles de certificación: 1, 2 y 3.

- Nivel 1:
  - Llevar a cabo los END según instrucciones escritas y bajo supervisión de un nivel 2 o 3.
  - Ajustar los equipos de END
  - Realizar los ensayos
  - Registrar y clasificar resultados
  - Informar resultados
- Nivel 2:
  - Llevar a cabo los END de acuerdo a procedimientos establecidos
  - Definir las limitaciones de la aplicación
  - Traducir códigos, normas, etc., de END adaptándolos a las condiciones reales de trabajo.
  - Ajustar y verificar los ajustes de los equipos
  - Realizar y supervisar los ensayos
  - Interpretar y evaluar los resultados de acuerdo a códigos y otros
  - Llevar a cabo y supervisar todas las tareas del nivel 2 o inferior
  - Proveer guía personal del nivel 1,2 o inferior
  - Informar de resultados de los END
- Nivel 3.
  - Llevar a cabo y operar directamente los END
  - Asumir la responsabilidad total de las instalaciones, centro examinador y personal
  - Establecer, revisar la redacción y corrección técnica y validez de los procedimientos y de las instrucciones de END
  - Interpretar códigos, normas, especificaciones y procedimientos
  - Indicar el método de ensayo particular, procedimiento e instrucciones de END a ser realizadas
  - Llevar a cabo y supervisar los trabajos de todos los niveles
  - Demostrar competencia para evaluar e interpretar resultados de acuerdo a códigos, etc.

- Demostrar conocimientos prácticos suficientes en los materiales, fabricación y procesos tecnológicos, aplicables para seleccionar los métodos de END, establecer las técnicas de END, y asistir en el establecimiento de criterios de aceptación cuando no están disponibles.
- Demostrar conocimiento general de los otros métodos de END

(Aaende, 2017)

## **1.6 Análisis Metalográfico**

El análisis metalográfico es el estudio microscópico de las características estructurales de un metal o aleación. Es posible determinar el tamaño de grano, y el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

El estándar más común para el análisis metalográfico es el ASTM E-3.

Las probetas utilizadas son de varias formas y tamaños mientras puedan ser colocadas en la platina del equipo. La metalografía es esencialmente, el estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas.. (Ruiz Martínez, 2015)

Entonces el análisis metalográfico tiene por objetivo revelar la estructura verdadera, llamando en teoría estructura verdadera a la cual no posea deformaciones. Esto se logra con la relación de un método sistemático de preparación.

### **1.6.1 Método de preparación de la muestra**

La preparación de una muestra consiste en los pasos necesarios para poder analizar la misma de forma correcta. Específicamente se describen a continuación, los pasos para la preparación de muestras observadas en microscopio. Se divide en varias etapas:

- Selección y extracción
- Montaje (en caso de ser necesario)
- Esmerilado grueso y fino
- Pulido final

#### **1.6.1.1 Selección y extracción**

Hay veces que una vez recibido el material es necesario seccionarlo o cortarlo en una forma determinada. Se trata de lograr superficies planas con la menor deformación posible. En general, los mejores resultados se obtienen con corte por abrasivo húmedo (disco abrasivo: de  $Al_2O_3$  para metales ferrosos y SiC para no ferrosos). En general,

materiales blandos se cortan con discos duros y viceversa. Un factor a tener en cuenta es la temperatura generada por rozamiento en el corte, el cual debe realizarse con un líquido lubrificante, (en el caso del disco abrasivo y/o serrucho mecánico o manual), de lo contrario se estaría modificando la estructura original. El método de preparación de muestras metalográficas como ya se ha mencionado se encuentra normalizado en la norma ASTM E 3.

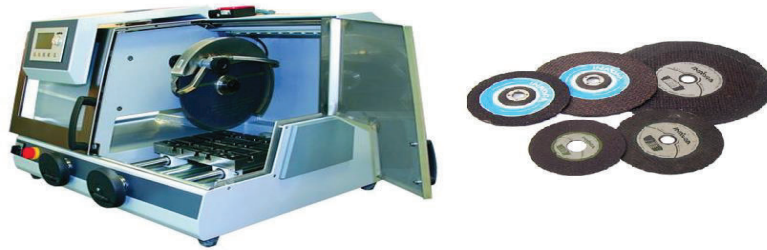


Figura 1. 15. Cortadora metalográfica y discos abrasivos.

(Fuente Propia, 2017)

### 1.6.1.2 Montaje

Cuando se considere necesario para una mejor manipulación de la muestra o para evitar la conservación de los bordes o alguna capa constituyente, es necesario montar la muestra en lo que llamamos "inclusión".

- Montaje en caliente. - La muestra se coloca en una prensa generalmente hidráulica, se añade luego un polímetro o baquelita. Los polímetros pueden ser de dos tipos: termoendurecibles o termoplásticos. Luego se somete el polímetro o baquelita a una presión y temperatura determinada según el caso y posteriormente se enfría. Luego se saca la muestra de la prensa (figura 1.16).



Figura 1. 16. Inclusiones metalográficas en caliente.

(Exámen Metalográfico, 2010)

- Montaje en frío. - La muestra se coloca en un molde, y luego se añaden las partes necesarias de las resinas mezclándolas previamente y luego se vierten sobre la muestra (figura 1.17).



Figura 1. 17. Inclusiones metalográficas en frío.  
(Exámen Metalográfico, 2010)

### 1.6.1.3 Esmerilado grueso

Su objetivo es eliminar la superficie de la muestra que fue deformada por el proceso anterior y lograr un solo plano de pulido para las etapas posteriores. Se utilizan abrasivos de grano grueso (figura 1.18), discos o papeles abrasivos al agua. (Exámen Metalográfico, 2010)



Figura 1. 18. Papeles para esmerilado manual y mecánico.  
(Struers, 2017)

### 1.6.1.4 Esmerilado fino

Es la etapa final del esmerilado. El procedimiento es igual al anterior con papeles (400 a 1200) o diamante en pasta desde 3 a 0,25 micrones.

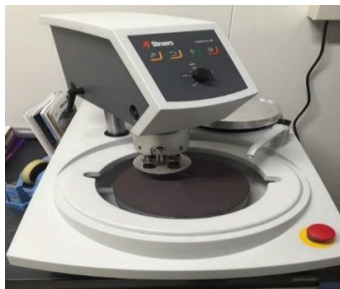


Figura 1. 19. Máquina para esmerilado mecánico.  
(Struers, 2017)

### 1.6.1.5 Pulido mecánico

Para realizar este proceso existen algunas alternativas descritas a continuación:

- Con diamante. - Se utiliza para lograr una eliminación efectiva y rápida de material, en cuanto a plenitud esta alternativa es la que consigue mejores resultados en cuanto a plenitud.
- Con óxidos. - Se usan para materiales muy blandos y dúctiles
- Electrolítico. - El mecanismo general está asociado a la disolución anódica, las aristas salientes y las protuberancias de la probeta desbastada que se eliminan por dilución selectiva, mientras que los valles existentes entre las salientes quedan protegidos porque en ellos la velocidad de disolución es mucho menor. (Exámen Metalográfico, 2010)

### 1.6.1.6 Ataque químico

El ataque químico (figura 1.20) que se realiza al material, consiste en utilizar un agente químico que reaccione con la superficie a examinar, este es el paso de mayor importancia durante la metalografía, ya que, si el agente no es el indicado, no se podrán observar las características deseadas sobre la pieza, la selección del agente químico varía según el material y sus características, existen las normas ASTM E 304 (macroataque) y E 407 (microataque).



Figura 1. 20. Ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

### 1.6.2 Observación metalográfica

Finalmente, las muestras se llevan a un microscopio óptico y se observan a diferentes aumentos. Si el interés es observar la microestructura en forma macro, se puede observar a 50X o 100X, pero si se quieren observaciones con mayor detalle, se pueden usar desde 200 hasta 2000X en un microscopio óptico y hasta 100000X y más en microscopios electrónicos de barrido y de transmisión. (Ruiz Martínez, 2015)



## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Procesos previos a la soldadura por fricción**

Para realizar la soldadura por fricción se emplea una máquina para soldar por fricción de tipo torque continuo, esta se encuentra equipada con un sistema de frenado, el mismo que es adecuado para garantizar que la máquina pare cuando se ha obtenido la soldadura deseada. Además, cuenta con una bomba hidráulica manual con la que se aplicará la fuerza axial necesaria para soldar los materiales, de acuerdo a esta fuerza y al área transversal de las probetas se podrán calcular tanto las presiones de precalentamiento y de forja, la máquina cuenta con un sistema de poleas que permite variar las velocidades.

#### **2.1.1 Elección de materiales**

Se va a soldar acero al carbono y acero inoxidable, pero dentro de estos existe una gran variedad, por lo que, debido a la facilidad de adquisición y por las propiedades mecánicas de los materiales, se decide trabajar con acero al carbono AISI 1018 y con un acero inoxidable austenítico AISI 304.

#### **2.1.2 Preparación de la máquina**

La máquina usada para realizar el proceso de soldadura se encuentra en el laboratorio de procesos de producción mecánica de la facultad de ingeniería mecánica de la escuela politécnica nacional. La máquina para soldar por fricción permite variar parámetros básicos: las fuerzas de calentamiento y forja, la velocidad de rotación, anteriormente se podía controlar y preestablecer el encogimiento axial pero debido al uso y a varias circunstancias este encogimiento axial se lo realiza de manera manual, cabe mencionar que los tiempos de calentamiento y forja se los toma con un cronómetro digital externo a la máquina.

Con la finalidad de garantizar el proceso de soldadura se inspecciona que el equipo tenga un funcionamiento correcto en todos los sistemas que lo componen (mecánico, eléctrico e hidráulico). En la figura 2.1 se muestra un esquema general de la máquina utilizada para soldar.

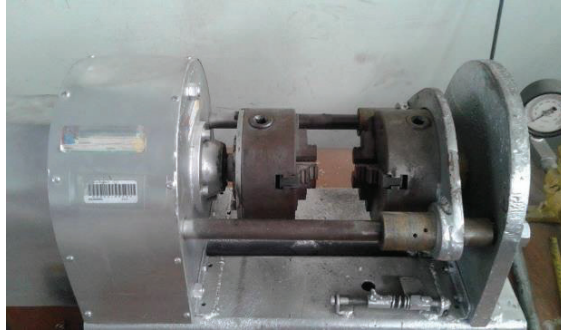


Figura 2. 1. Máquina para soldar por fricción.  
(Fuente Propia, 2017)

El sistema mecánico cuenta con un sistema de poleas (figura 2.2), mandriles de sujeción y el sistema de frenado, el buen funcionamiento de este último es de vital importancia para la obtención de una soldadura adecuada, por lo que se hace primordial su verificación. Se debe verificar que las poleas no deslicen en el momento de puesta en marcha para así garantizar que la velocidad sea la seleccionada. El sistema eléctrico debe ser chequeado para garantizar sobre todo la alimentación de energía al motor de la máquina y para que el operario de la misma no esté expuesto a riesgos eléctricos. Ahora, la bomba hidráulica (figura 2.3) se debe calibrar para que pueda aplicar las fuerzas necesarias sin fallos y de esta forma unir correctamente las probetas.



Figura 2. 2. Sistema de poleas de la máquina.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 2. 3. Bomba Hidráulica de la máquina.  
(Fuente Propia, 2017)

La máquina cuenta con dos mandriles, uno giratorio y otro fijo (figura 2.1), mientras la máquina se encuentra en operación el mandril fijo se acerca mediante el uso de la bomba hidráulica (figura 2.3) que aplica la fuerza de calentamiento, entonces el extremo de la probeta que se encuentra fija ejerce presión sobre la que se encuentra girando, produciendo así un calentamiento en ambas probetas debido al rozamiento.

Este calor que se genera, lleva a los materiales a su punto de plasticidad, entonces se observa el encogimiento axial deseado, se frena la máquina por completo e inmediatamente se aplica la fuerza de forja que completa el proceso de soldadura. Si no se realiza correctamente el proceso, sobre todo en el calentamiento y el frenado, la soldadura no se realiza correctamente y además se corre el riesgo de fracturar el material base.

### **2.1.3 Preparación de las probetas**

Para la preparación de las probetas se toma en consideración las limitaciones geométricas de la máquina y sus especificaciones de diseño como se indica a continuación

“Se ha proyectado el diseño y construcción de un tipo de máquina que tenga la posibilidad de soldar probetas de acero de hasta 10 mm de diámetro y una longitud recomendada de 8 cm” (Arguello, 1987)

Por lo que para los dos materiales utilizados se trabaja con un diámetro de 6,25 mm (1/4 de pulgada) con una sección transversal de  $3,068 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>] y una longitud de 8 cm. Para el corte de las probetas con las dimensiones establecidas se procede primero a limpiar

los materiales y con la ayuda de un flexómetro se mide la longitud de cada probeta, luego con una herramienta que para el caso será una sierra de arco de grano fino, se procede a realizar los cortes a medida, este corte se debe realizar a una temperatura que no varíe las propiedades de los materiales base.

Las probetas ya cortadas se muestran se muestran en las figuras 2.4 y 2.5.



Figura 2. 4. Probetas de Acero al carbono AISI 1018.

(Fuente Propia, 2017)



Figura 2. 5. Probetas de Acero inoxidable AISI 304.

(Fuente Propia, 2017)

Para garantizar el correcto contacto entre los materiales, las superficies son lijadas y desbastadas con la ayuda de un esmeril siempre teniendo cuidado de no elevar la temperatura de los materiales base, con esto se eliminan las impurezas e irregularidades que se generan al momento de realizar el corte a medida.

#### **2.1.4 Ubicación de las probetas en la máquina**

De acuerdo a los parámetros de diseño de la máquina, se recomienda no dejar más de 10 mm de longitud libre de cada probeta. (Arguello, 1987). Ahora, debido a limitaciones propias de la máquina en un principio no es posible cumplir con esta recomendación lo que hace que la soldadura no sea ejecutada correctamente como se ve más adelante, pero gracias a la experimentación se puede solucionar este problema. En la figura 2.6 se muestra como se deben ubicar las probetas.



Figura 2. 6. Ubicación de las probetas en la máquina.

(Fuente Propia, 2017)

## 2.2 Proceso de soldadura por fricción

### 2.2.1 Experimentación inicial

Con el objetivo de conocer el comportamiento de los materiales y la influencia de los parámetros que se pueden variar en la máquina sobre los mismos, se procede a realizar pruebas iniciales, para observar si la máquina para soldar funciona adecuadamente y verificar que el proceso de soldadura es factible de realizar. Se procede a soldar variando las fuerzas axiales aplicadas para generar la presión de forja con dos velocidades diferentes 4200 y 2500 rpm pruebas en las cuales se ubica en el mandril fijo el acero inoxidable y el acero al carbono en el mandril móvil, en la tabla 2.1 se muestran los parámetros utilizados para realizar lo anteriormente descrito.

Tabla 2. 1, Parámetros utilizados para la experimentación inicial.

4200 rpm (Acero inoxidable AISI 304 Fijo)						
Designación	F_calent[Kgf]	F_forja [Kgf]	P_calentamiento		P_forja	
			Psi	Mpa	Psi	Mpa
1EI	100	750	4632,95	31,94	34747,15	239,57
2EI	100	700	4632,95	31,94	32430,68	223,60
3EI	100	170	4632,95	31,94	7876,02	54,30
4EI	100	250	4632,95	31,94	11582,38	79,86
2500 rpm (Acero al carbono AISI 1018 Fijo)						
	F_calent [Kgf]	F_forja[Kgf]	P_calentamiento		P_forja	
			Psi	Mpa	Psi	Mpa
5EI	85	800	3938,01	27,15	37063,63	255,54
6EI	85	750	3938,01	27,15	34747,15	239,57
7EI	85	100	3938,01	27,15	4632,95	31,94
8EI	85	800	3938,01	27,15	37063,63	255,54
9EI	85	800	3938,01	27,15	37063,63	255,54
10EI	85	1000	3938,01	27,15	46329,54	319,43

(Fuente Propia, 2017)

### 2.2.2 Relación entre los parámetros

Luego de haber verificado que la máquina para soldar funciona correctamente y de observar la influencia de las presiones en el aumento o decremento de la ZAC superficial, se procede a realizar una nueva experimentación en la cual se seleccionan 3 velocidades de rotación 2500, 4200 y 4900 rpm, con la finalidad de observar la relación existente entre los parámetros y su influencia sobre la junta soldada. Se ejecutan dos pruebas, la primera, de la misma forma como se realizó la experimentación inicial, se varía la ubicación de los materiales en el mandril fijo y se unen 15 probetas con los parámetros que se muestran en la tabla 2.2. Para la segunda prueba se sueldan 9 probetas, 3 muestras para cada velocidad, y además se toma el tiempo de calentamiento, esta parte se basa en los resultados obtenidos en la primera prueba, en los cuales se observa que para una mejor soldadura es conveniente ubicar en el mandril fijo el acero inoxidable por lo que se procede de esta manera, los parámetros usados en esta segunda prueba se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2. 2. Parámetros utilizados para la primera prueba para relacionar los parámetros.

Id.	Carb-Fijo	Inox-Fijo	Velocidad [rpm]	F_Prec [Kgf]	F_forja [Kgf]	t_calent [s]
1RP			2500	100	160	12,3
2RP			2500	100	250	11,5
3RP			2500	100	400	11
4RP			2500	100	150	12,8
5RP			2500	100	100	13,3
6RP			4200	85	250	9,2
7RP			4200	85	150	8,2
8RP			4200	85	750	7,6
9RP			4200	85	500	9,7
10RP			4200	85	750	9,7
11RP			4900	85	500	6,4
12RP			4900	85	400	12,1
13RP			4900	85	250	6,9
14RP			4900	85	500	7,2
15RP			4900	85	500	5,7

(Fuente Propia, 2017)

Tabla 2. 3. Parámetros utilizados para la segunda prueba para relacionar los parámetros.

Prueba	Velocidad	F_Prec (Kgf)	F_forja (Kgf)	t_calent [s]
1RP'	2500	200	750	14,9
2RP'	2500	85	500	17,8
3RP'	2500	85	600	12,6
4RP'	4200	85	170	9,3
5RP'	4200	85	500	9,4
6RP'	4200	85	500	8,3
7RP'	4900	85	200	5,9
8RP'	4900	85	250	7,6
9RP'	4900	85	500	4,9

(Fuente Propia, 2017)

De las probetas soldadas en las 2 pruebas anteriores, se seleccionan 6 probetas de cada prueba para realizar ensayos de tracción y flexión, los resultados de las mismas se presentarán en un capítulo posterior.

### 2.2.3 Experimentación final

Luego de haber determinado la relación de los parámetros de soldadura y basado en los resultados obtenidos en las pruebas, se seleccionan los parámetros óptimos y se procede a realizar una prueba más, se efectúan nueve soldaduras, tres para cada velocidad y con los parámetros adecuados como se muestra en la tabla 2.4. Con la finalidad de realizar ensayos y análisis metalográfico, se sueldan 9 probetas “gemelas” con los mismos parámetros de las primeras.

Tabla 2. 4. Parámetros utilizados en la prueba final.

Prueba	Velocidad [rpm]	F_Prec [Kg]	F_forja [Kg]	t_calent [s]
1	2500	100	400	8,55
2	2500	100	500	11,07
3	2500	100	850	19
4	4200	85	600	9,6
5	4200	85	500	9,06
6	4200	85	750	9,2
7	4900	85	850	9,8
8	4900	85	750	7,5
9	4900	85	600	5

(Fuente Propia, 2017)

De igual forma como para las probetas usadas en la relación entre variables se realizan ensayos de tracción en las probetas finales además de un análisis metalográfico.



## 2.3 Análisis químico de los materiales

Con la finalidad de garantizar la calidad de los materiales utilizados en el proceso de soldadura, se procede a realizar un análisis químico para comprobar y asegurar que las propiedades de los materiales concuerdan con lo que se describe en los catálogos entregados por el vendedor.

Para realizar este análisis se debe montar una muestra de forma similar a la que se monta para un análisis metalográfico, tanto del acero al carbono AISI 1018 como del acero inoxidable AISI 304, estas muestras se las obtiene fácilmente al embeber una porción de la varilla en resina y esperar hasta que polimerice como se muestra en la figura 2.7, al realizar este proceso se garantiza que las muestras resultantes sean adecuadas para el análisis.



Figura 2. 7. Obtención de la muestra para el análisis químico.

(Fuente Propia, 2017)

## 2.4 Ensayos

### 2.4.1 Juntas soldadas

Para determinar si las juntas soldadas que se obtienen cumplen con los requerimientos necesarios para que la soldadura sea considerada como buena, con la colaboración de Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN, se procede a realizar ensayos destructivos (tracción y flexión) a las probetas.

De la experimentación realizada para la relación de los parámetros (tablas 2.2 y 2.3) se seleccionan 12 probetas, una probeta por cada velocidad y por cada prueba (6 en total) tanto para el ensayo de tracción como para el de flexión como se muestra en las figuras 2.8 y 2.9 respectivamente.





Figura 2. 8. Ensayo de tracción.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 2. 9, Ensayo de flexión.  
(Fuente Propia, 2017)

Además, cabe mencionar que todas las probetas obtenidas en la experimentación final (tabla 2.4) deben ser sometidas a un ensayo de tracción.

#### **2.4.2 Material Base**

Para realizar una comparación con los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las juntas soldadas y de igual forma para conocer las propiedades mecánicas de los materiales base, se someten a ensayos de tracción a dichos materiales, se realizan 6 pruebas sobre 6 probetas de veinte centímetros de longitud (3 ensayos por cada material).

Cabe mencionar que los resultados obtenidos en todas las pruebas anteriormente descritas se presentan en el siguiente capítulo.

## 2.5 Análisis metalográfico

Con la finalidad de observar la microestructura de las juntas soldadas se realiza un análisis metalográfico de las probetas obtenidas de la experimentación final (tabla 2.4), y de los materiales base, este análisis se lo realiza con la colaboración del Laboratorio de Metalografía de la EPN.

Para esto se procede a realizar el corte y montaje en frío en resina tanto de las juntas soldadas como de los materiales base como se muestran en las figuras 2.10 y 2.11 respectivamente.



Figura 2. 10. Corte y montaje de juntas soldadas.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 2. 11. Corte y montaje de material base.  
(Fuente Propia, 2017)

Una vez que las juntas soldadas y los materiales están montados, con la ayuda de una pulidora marca Forzipol que se puede equipar con diferentes lijas y paños, como el paño de diamante de un micrón (figura 2.12), se procede a realizar el pulido de las probetas como se muestra en la figura 2.13.



Figura 2. 12. Pulidora Forzipol con paño de 1 micrón.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 2. 13. Pulido de las probetas.  
(Fuente Propia, 2017)

Las probetas ya pulidas, son limpiadas con alcohol al 99,8 y se secan para garantizar una correcta visualización, para luego proceder al ataque químico, para el acero al carbono se usa nital al 2% y para el acero inoxidable se usa marble (figura 2.14). Una vez que se ha realizado este proceso, se ubican en el microscopio digital del laboratorio las 9 juntas soldadas y las 2 muestras de los materiales base para la observación.

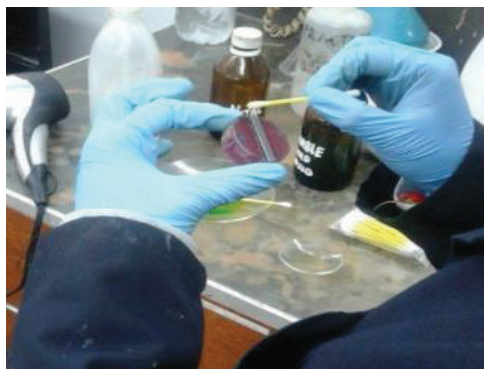


Figura 2. 14. Ataque químico.  
(Fuente Propia, 2017)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1 Experimentación inicial

En la figura 3.1 se muestran las probetas luego del proceso y en la tabla 3.1 las longitudes iniciales y finales de las mismas además del encogimiento axial resultante.



Figura 3. 1. Probetas soldadas obtenidas en la experimentación inicial.

(Fuente Propia, 2017)

Tabla 3. 1. Longitudes de probetas soldadas en la experimentación inicial.

Id.	Longitud inicial AISI 1018 [cm]	Longitud inicial AISI 304 [cm]	Longitud inicial total [cm]	Longitud total luego del proceso [cm]	Encogimiento axial [cm]
1	7,8	7,7	15,5	14,95	0,55
2	7,9	7,9	15,8	15,3	0,5
3	7,8	8,1	15,9	15,5	0,4
4	7,8	8	15,8	15,35	0,45
5	7,9	7,9	15,8	15,1	0,7
6	8,1	7,9	16	15,4	0,6
7	8,2	7,7	15,9	15,6	0,3
8	7,9	8,1	16	15,29	0,71
9	7,8	8,1	15,9	15,2	0,7
10	7,8	7,8	15,6	14	1,6

(Fuente Propia, 2017)

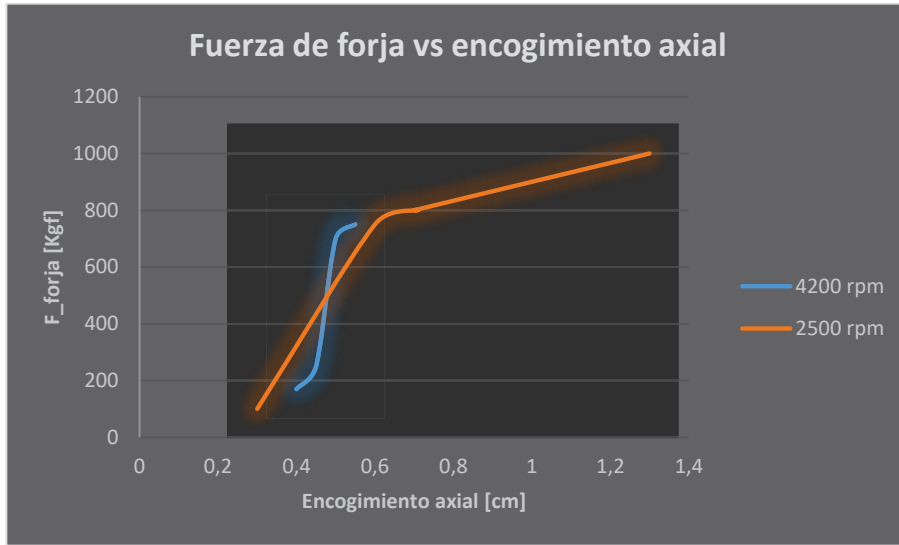


Figura 3. 2. Fuerza de forja vs encogimiento axial (experimentación inicial).  
(Fuente Propia, 2017)

### 3.1.2 Relación entre parámetros

Las probetas soldadas obtenidas tanto de la primera y segunda prueba que componen esta parte del proceso experimental para relacionar los parámetros que gobiernan la soldadura por fricción se muestran en la figura 3.3 y 3.4 respectivamente.



Figura 3. 3. Probetas soldadas en la primera prueba para relacionar parámetros.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 4. Probetas soldadas en la segunda prueba para relacionar parámetros.

(Fuente Propia, 2017)

De igual forma, las longitudes iniciales y finales además del encogimiento axial de la primera y segunda prueba se muestran en las tablas 3.2 y 3.3 respectivamente.

Tabla 3. 2. Longitudes de probetas en primera prueba para relacionar parámetros.

<b>Id.</b>	<b>Longitud inicial AISI 1018 [cm]</b>	<b>Longitud inicial AISI 304 [cm]</b>	<b>Longitud inicial total [cm]</b>	<b>Longitud total luego del proceso [cm]</b>	<b>Encogimiento axial [cm]</b>
1RP	7,9	7,9	15,8	15,2	0,6
2RP	7,7	8	15,7	14,8	0,9
3RP	7,8	8,2	16	15,2	0,8
4RP	7,9	7,7	15,6	15,06	0,54
5RP	8,2	7,8	16	15,6	0,4
6RP	8,1	7,8	15,9	15,2	0,7
7RP	8	7,8	15,8	15,35	0,45
8RP	7,8	7,9	15,7	14,7	1
9RP	7,9	8,1	16	15	1
10RP	7,9	7,8	15,7	14,6	1,1
11RP	7,8	8	15,8	14,9	0,9
12RP	7,7	8,2	15,9	15,04	0,86
13RP	7,9	7,7	15,6	15,05	0,55
14RP	8,1	7,9	16	15,05	0,95
15RP	7,9	8,1	16	15,2	0,8
16RP	8	7,8	15,8	15,3	0,5

(Fuente Propia, 2017)

Las figuras 3.5 y 3.6 muestran cómo se relacionan la fuerza de forja aplicada y el tiempo de calentamiento con el encogimiento axial para la primera prueba.

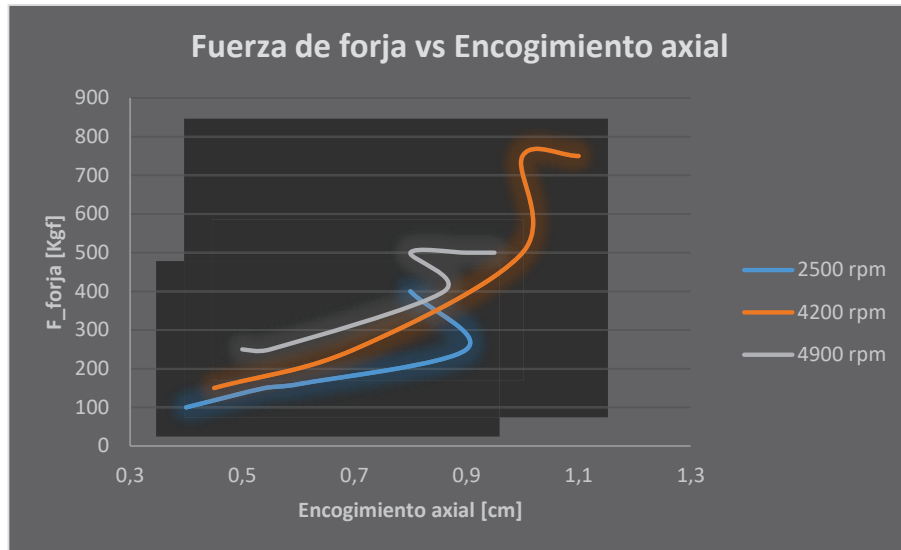


Figura 3. 5. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la primera prueba (relación de parámetros).

(Fuente Propia, 2017)

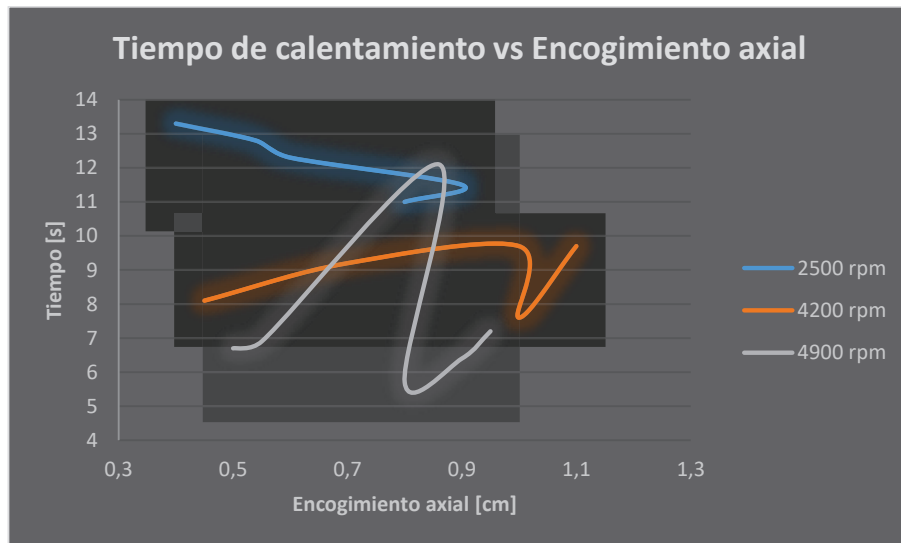


Figura 3. 6. Tiempo de calentamiento vs encogimiento axial en la primera prueba (relación de parámetros).

(Fuente Propia, 2017)

Tabla 3. 3. Longitudes de probetas en la segunda prueba para relacionar parámetros.

Id.	Longitud inicial AISI 1018 [cm]	Longitud inicial AISI 304 [cm]	Longitud inicial total [cm]	Longitud total luego del proceso [cm]	Encogimiento axial [cm]
1RP'	7,8	8	15,8	14,7	1,1
2RP'	7,8	8,1	15,9	15,05	0,85
3RP'	7,8	8,2	16	15,19	0,81
4RP'	8,1	7,9	16	15,6	0,4
5RP'	8	7,9	15,9	15,1	0,8
6RP'	8,1	7,9	16	15,24	0,76
7RP'	7,9	7,8	15,7	15,1	0,6
8RP'	7,9	8	15,9	15,18	0,72
9RP'	7,9	8,2	16,1	15,54	0,56

(Fuente Propia, 2017)

Los gráficos 3.7 y 3.8 muestran cómo se relacionan la fuerza de forja aplicada y el tiempo de calentamiento con el encogimiento axial para la segunda prueba.

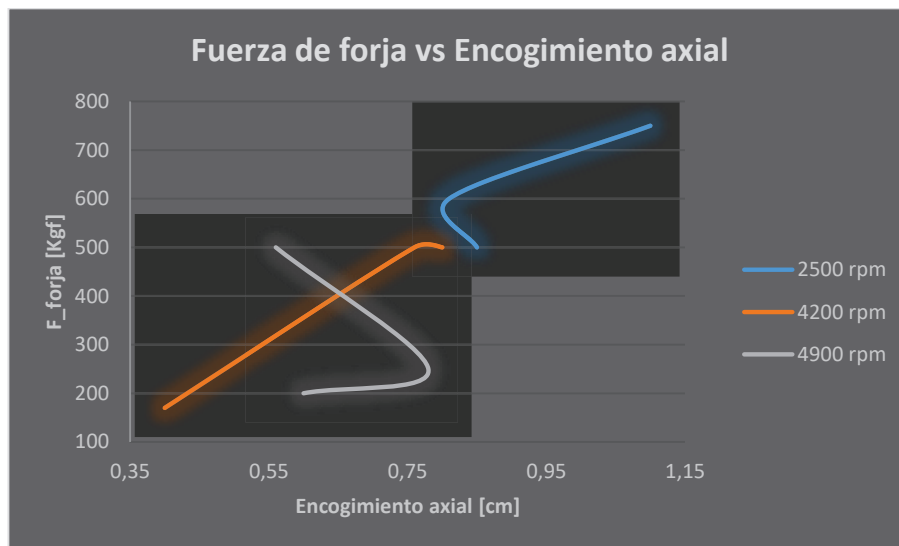


Figura 3. 7. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la primera segunda prueba (relación de parámetros).

(Fuente Propia, 2017)



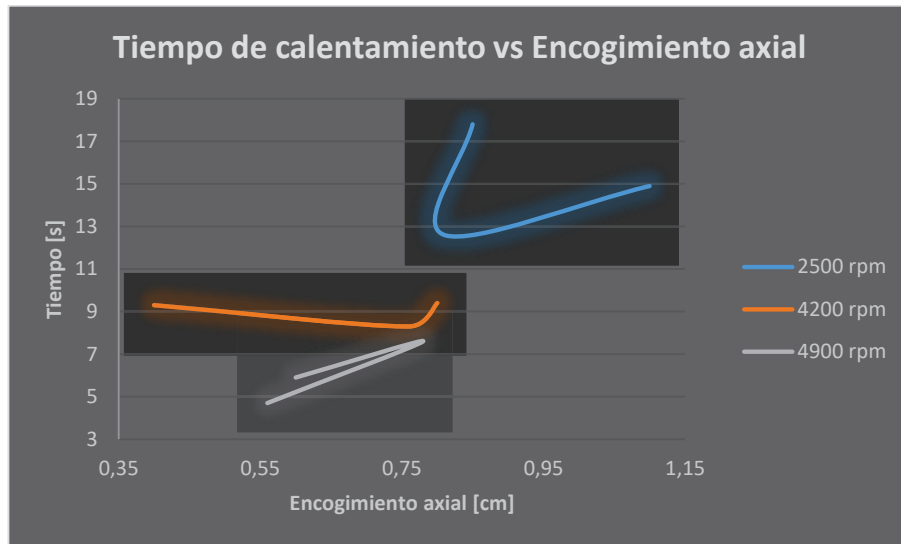


Figura 3. 8. Tiempo de calentamiento vs encogimiento axial en la segunda prueba (relación de parámetros).

(Fuente Propia, 2017)

De las probetas soldadas en las dos pruebas se seleccionan 12 probetas para los ensayos de tracción (6) y flexión (6), los parámetros utilizados y los resultados de los ensayos se presentan en la tabla 3.4, además las probetas luego del ensayo se muestran en la figura 3.9.

Tabla 3. 4. Resistencia a la tracción de probetas ensayadas.

Id.	Velocidad [rpm]	F_calent [Kgf]	F_forja [Kgf]	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción			Observación
				Lbf	N	Ksi	MPa	Kg/mm2	
1RP'	2500	200	750	3750	16681	78,9	544	55,46	FJS
2RP	2500	100	250	2350	10453	49,4	341	34,75	FJS
5RP'	4200	85	500	2900	12900	61	420	42,89	FJS
7RP	4200	85	150	1700	7562	35,7	246	25,14	FJS
8RP'	4900	85	250	1675	7451	35,2	243	24,77	FJS
12RP	4900	85	400	4025	17904	84,6	584	59,53	FJS

(LAEV, 2017)

El informe técnico entregado por el LAEV en el que se pueden verificar los resultados presentados en la tabla 3.4 se encuentra en el ANEXO 1.



Figura 3. 9. Probetas soldadas ensayadas a tracción.

(Fuente Propia, 2017)

### 3.1.3 Experimentación final

Los resultados obtenidos en esta parte son los más importantes ya que, para realizarlos, se tomaron en cuenta las experiencias previamente descritas y así obtener soldaduras más fuertes y confiables, los resultados de longitudes y encogimiento axial de estas probetas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Longitudes de probetas obtenidas en la experimentación final.

Id.	Longitud inicial AISI 1018 [cm]	Longitud inicial AISI 304 [cm]	Longitud inicial total [cm]	Longitud total luego del proceso [cm]	Encogimiento axial [cm]
1EF	7,9	8	15,9	14,98	0,92
2EF	8	8	16	15,04	0,96
3EF	7,9	8,1	16	14,9	1,1
4EF	7,9	7,9	15,8	14,85	0,95
5EF	8	7,9	15,9	14,91	0,89
6EF	8,1	7,8	15,9	15	1,1
7EF	8,2	7,7	15,9	14,64	1,26
8EF	7,8	7,9	15,7	14,7	1
9EF	7,9	7,9	15,8	15	0,8

(Fuente Propia, 2017)

Los gráficos 3.10 y 3.11 muestran cómo se relacionan la fuerza de forja aplicada y el tiempo de calentamiento con el encogimiento axial para la experimentación final.

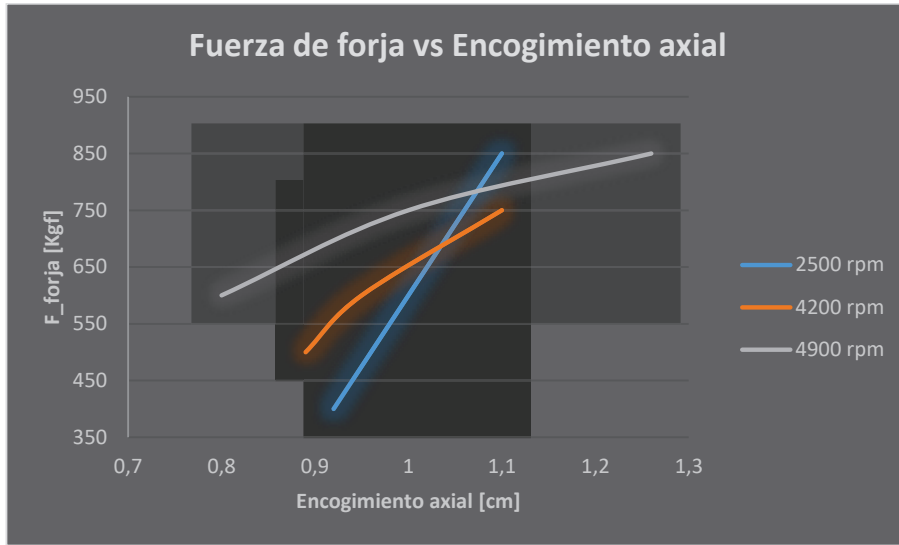


Figura 3. 10. Fuerza de forja vs encogimiento axial en la experimentación final.  
(Fuente Propia, 2017)

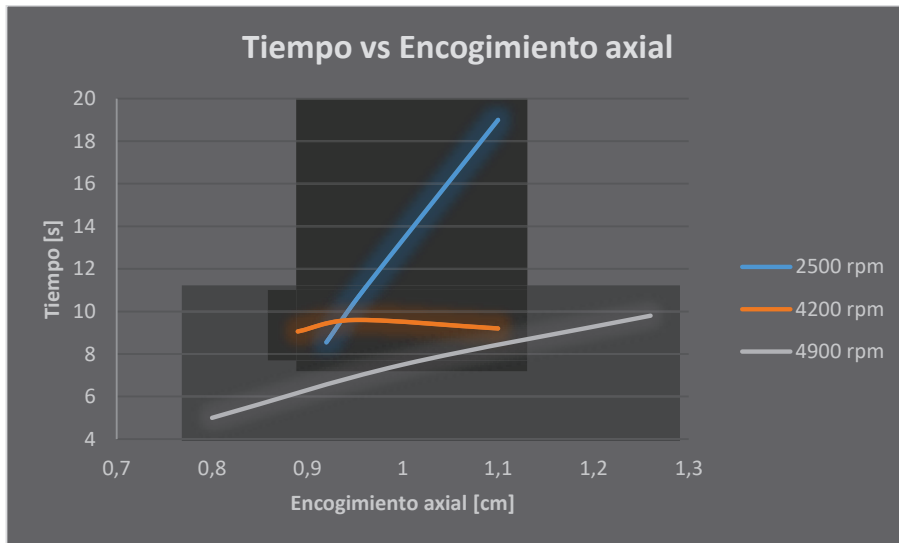


Figura 3. 11. Tiempo de calentamiento vs Encogimiento axial en la experimentación final.  
(Fuente Propia, 2017)

De igual forma se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados a las juntas soldadas en la tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Resistencia a la tracción de probetas ensayadas en la experimentación final.

Id.	Velocidad [rpm]	F_calent [Kgf]	F_forja [Kgf]	t_calent [s]	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción			Obs.
					Lbf	N	Ksi	MPa	Kg/mm2	
1EF	2500	100	400	8,55	4200	18683	88,32	609	62,11	FJS
2EF	2500	100	500	11,07	4125	18349	86,74	599	61,00	FJS
3EF	2500	100	850	19	5000	22241	105,14	726	73,94	FJS
4EF	4200	85	600	9,6	5375	23909	113,03	783	79,49	FMB
5EF	4200	85	500	9,06	5700	25355	119,87	825	84,30	FJS
6EF	4200	85	750	9,2	5475	24354	115,13	799	80,97	FMB
7EF	4900	85	850	9,8	5475	24354	115,13	801	80,97	FMB
8EF	4900	85	750	7,5	5500	24465	115,66	803	81,34	FMB
9EF	4900	85	650	5	5475	24354	115,13	801	80,97	FMB

\*FJS: Falla en la junta soldada

\*FMB: Falla en el metal base

(LAEV, 2017)

Los gráficos 3.12 y 3.13 muestran la relación que existe entre la fuerza de forja y el tiempo de calentamiento con la resistencia a la tracción soportada por las probetas.

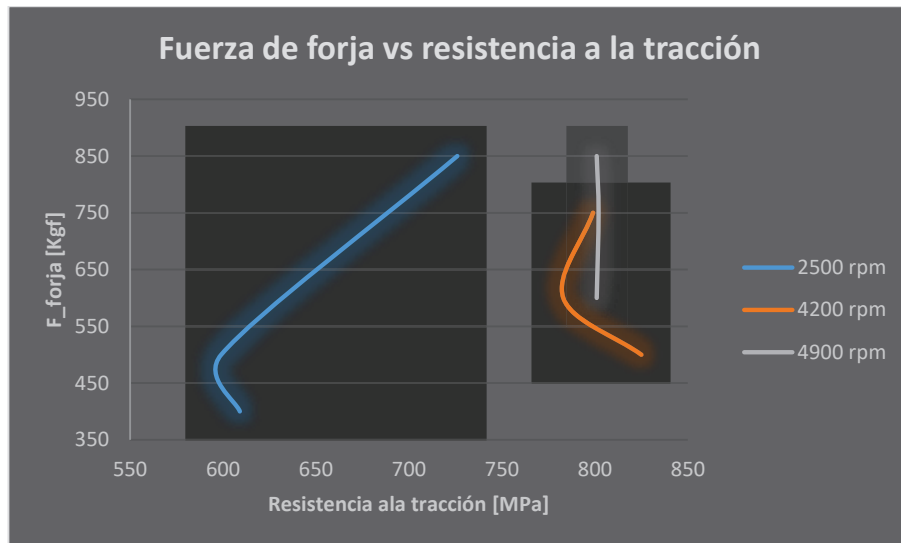


Figura 3. 12. Fuerza de forja vs Resistencia a la tracción en la experimentación final.

(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 13. Tiempo de calentamiento vs resistencia a la tracción en la experimentación final.

(Fuente Propia, 2017)

El informe técnico entregado por el LAEV en el que se pueden verificar los resultados presentados en la tabla 3.6 se encuentra en el ANEXO 2.

Las probetas obtenidas en este ensayo, en su mayoría presentaron un mejor comportamiento al momento de soportar los esfuerzos de tracción, por lo que a continuación se mostrarán las probetas soldadas antes de realizar el ensayo de tracción y luego de haberlo ejecutado (figura 3.14), y además varias figuras (3.14-3.23) en las que se muestra cada junta y el lugar de falla de cada una de estas.

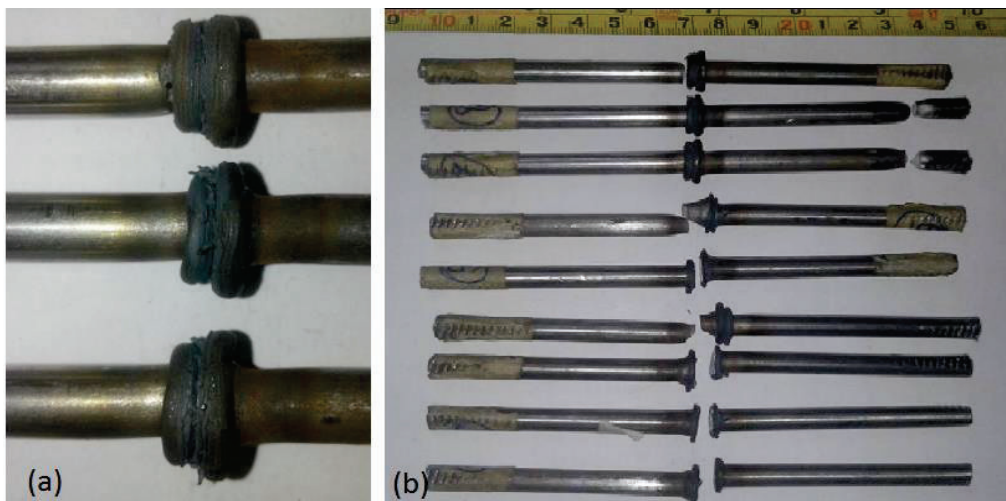


Figura 3. 14. Probetas soldadas (a) antes del ensayo de tracción (b) después del ensayo de tracción.

(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 15. (a) Probeta 1EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 16. (a) Probeta 2EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 17. (a) Probeta 3EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 18. (a) Probeta 4EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 19. (a) Probeta 5EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo junta soldada.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 20. (a) Probeta 6EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 21. (a)Probeta 7EF luego del ensayo de tracción (b)Fallo metal base.  
(Fuente Propia, 2017)

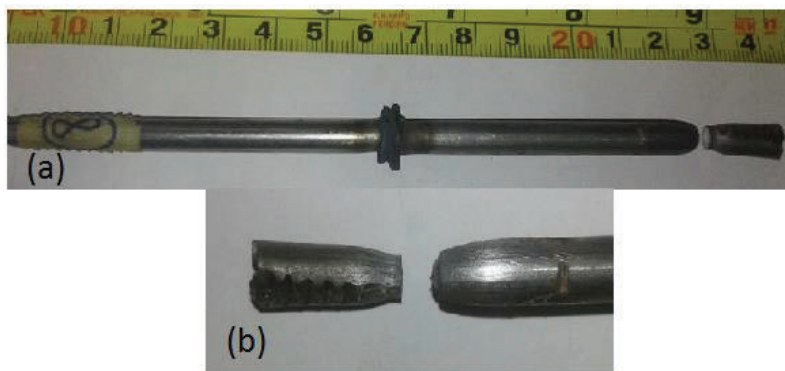


Figura 3. 22. (a)Probeta 8EF luego del ensayo de tracción (b) Fallo metal base.  
(Fuente Propia, 2017)



Figura 3. 23. (a)Probeta 9EF luego del ensayo de tracción (b)Fallo metal base.  
(Fuente Propia, 2017)

### 3.1.4 Material base

Para garantizar la calidad de los materiales utilizados se realizan ensayos de tracción a tres probetas de cada uno obteniéndose los resultados que se reflejan en la tabla 3.7.



Tabla 3. 7. Resultados de ensayo de tracción a metales base.

Desig.	Diámetro nominal [mm]	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción			% de Elongación en 50 mm
		Lbf	N	Ksi	MPa	Ksi	MPa	Kg/mm2	
AC-1	6,23	5520	24554	99,6	686,7	116,8	805,5	82,14	8,4
AC-2	6,24	5580	24821	96,6	666	117,7	811,6	82,77	9
AC-3	6,24	5540	24643	96,8	667	116,9	806	82,21	9,8
INOX-1	6,25	6190	27534	112,8	778	130,2	897	91,56	19,1
INOX-2	6,24	6130	27268	109,3	754	129,3	892	90,93	24,5
INOX-3	6,26	6180	27490	110	758	129,5	893	91,07	20

(LAEV, 2017)

Así mismo en las gráficas 3.24 y 3.25 se muestran las probetas ensayadas.

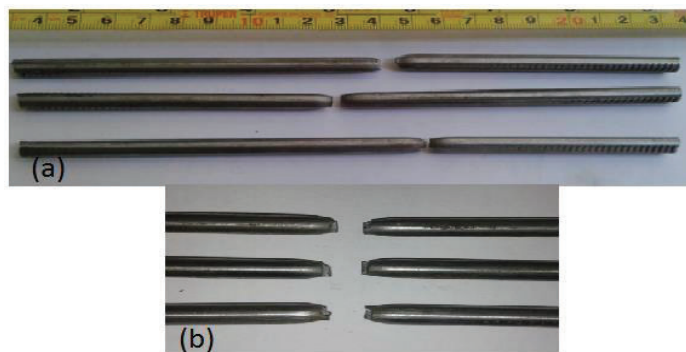


Figura 3. 24. (a) Acero AISI 1018 Ensayado a tracción (b) Lugar de falla.

(Fuente Propia, 2017)

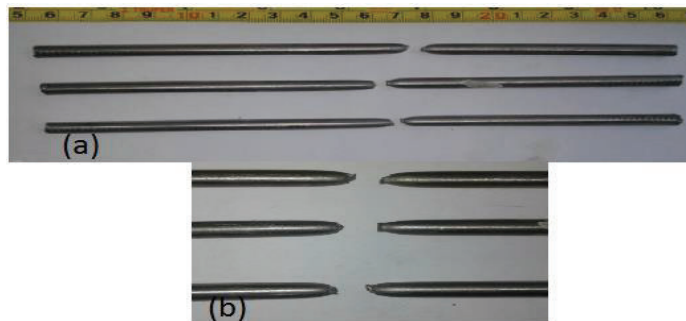


Figura 3. 25. (a) Acero AISI 304 Ensayado a tracción (b) Lugar de falla.

(Fuente Propia, 2017)

Cualquiera de los resultados presentados aquí, pueden ser verificados en el ANEXO 2.

### 3.1.5 Análisis Químico de los materiales base

Los resultados del análisis químico a los materiales base se obtienen gracias a un espectrómetro de chispa ubicado en el laboratorio de fundición de la FIM-EPN, dichos resultados se muestran en la tabla 3.8. y el ANEXO 3.

Tabla 3. 8. Análisis químico de metales base.


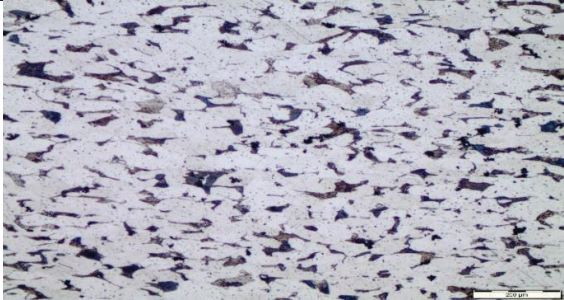


ANÁLISIS QUÍMICO					
AISI 1018			AISI 304		
Elemento	% Permitido	% Obtenido	Elemento	% Permitido	% Obtenido
Carbono	0,14-0,2	0,209	Carbono	0-0,08	0,116
Silicio	0-0,25	0,22	Silicio	0-1	0,412
Manganeso	0,6-0,9	0,809	Manganeso	0-2	1,495
Fósforo	0-0,04	0,034	Fósforo	0-0,045	0,069
Azufre	0-0,05	0,0089	Azufre	0-0,03	0,015
			Cromo	18-20	14,67
			Níquel	8-10,5	9,358

(Fundición, 2017)

### 3.1.6 Análisis Metalográfico

A continuación, en la tabla 3.9 se presentarán las micrografías de los materiales base y en las tablas 3.10 a 3.18 las micrografías obtenidas de las 9 probetas soldadas en la experimentación final.

Tabla 3. 9. Metalografías de los materiales base.

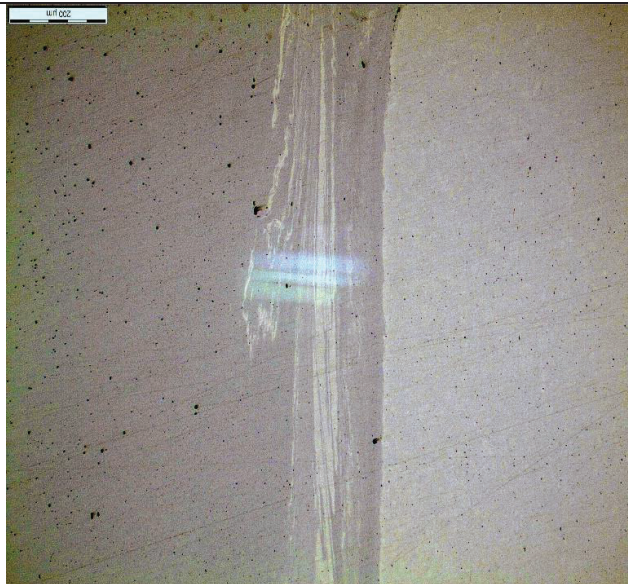
MATERIALES BASE	
ACERO AL CARBONO AISI 1018	
	
<b>Figura C1.</b> Microestructura del acero al carbono AISI 1018. Aumento 100X con ataque químico con Nital al 2%	<b>Figura C2.</b> Microestructura del acero AISI 1018. Aumento 500X con ataque químico con Nital al 2%
ACERO INOXIDABLE AISI 304	
	
<b>Figura I1.</b> Microestructura del acero inoxidable AISI 304. Aumento 100X con ataque químico con Marble.	<b>Figura I2.</b> Microestructura del acero inoxidable AISI 304. Aumento 500X con ataque químico con Marble.

(Fuente Propia, 2017)

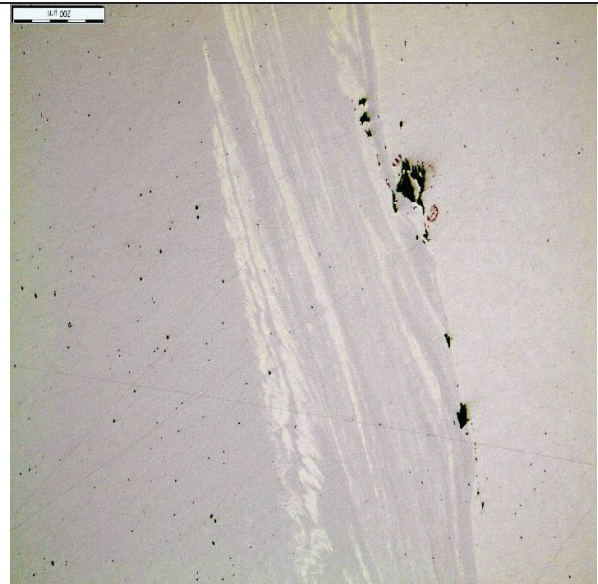


Tabla 3. 10. Metalografías de la probeta 1EF.

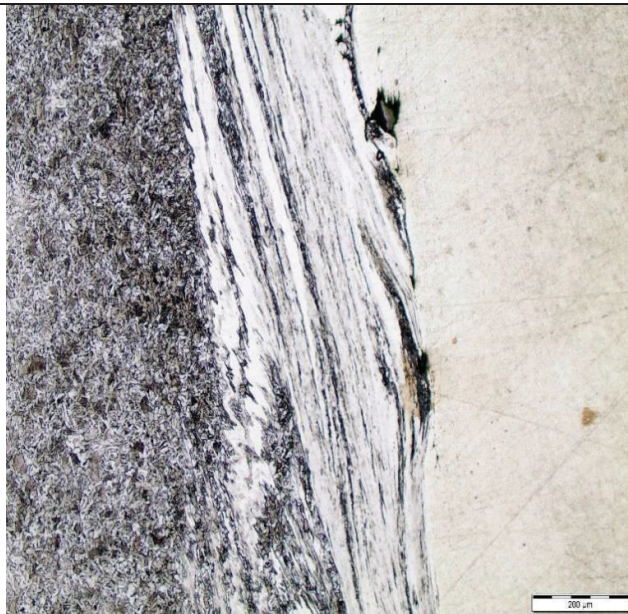
**PROBETA 1EF**



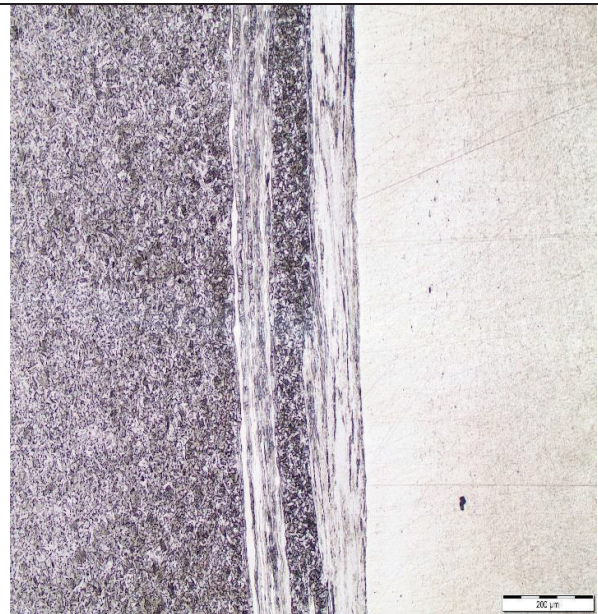
**Figura A.** Zona de la junta de las probetas, se observa una mezcla mecánica de materiales en varias partes de a interfase de soldadura, no se observa defectos en la unión. Aumento 100X sin ataque químico



**Figura B.** Zona de la junta de las probetas, se observa coalescencia y mezcla mecánica en varios sitios, así como defectos en el acero inoxidable. Aumento de 100X sin ataque químico.

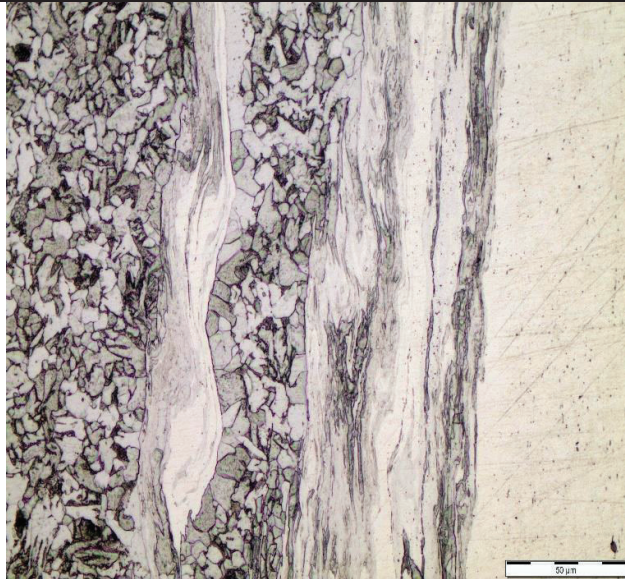


**Figura C.** Zona de la junta de las probetas, se observa mezcla mecánica de los metales y defectos en el acero inoxidable. Aumento de 100X con ataque químico.

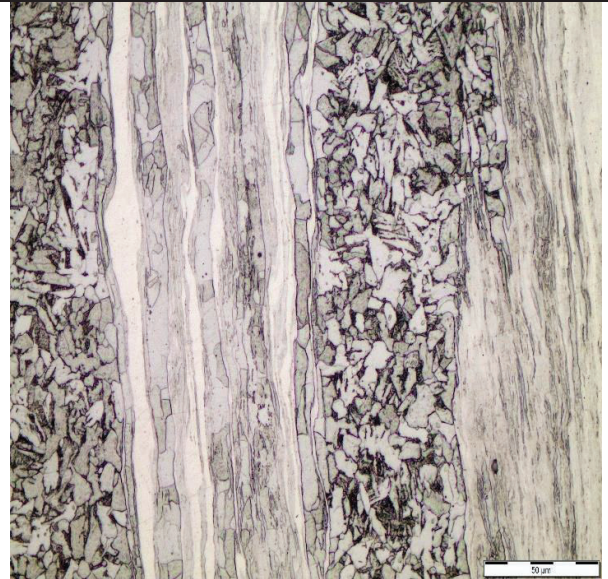


**Figura D.** Zona de la junta de las probetas, se observa una mezcla mecánica de materiales, no se observan defectos en la unión. Aumento de 100X con ataque químico.





**Figura E.** Zona de la junta que se observa coalescencia de materiales y mezcla mecánica, además los bordes de grano de la perlita (áreas oscuras) y ferrita (áreas claras). Aumento de 500X con ataque químico.

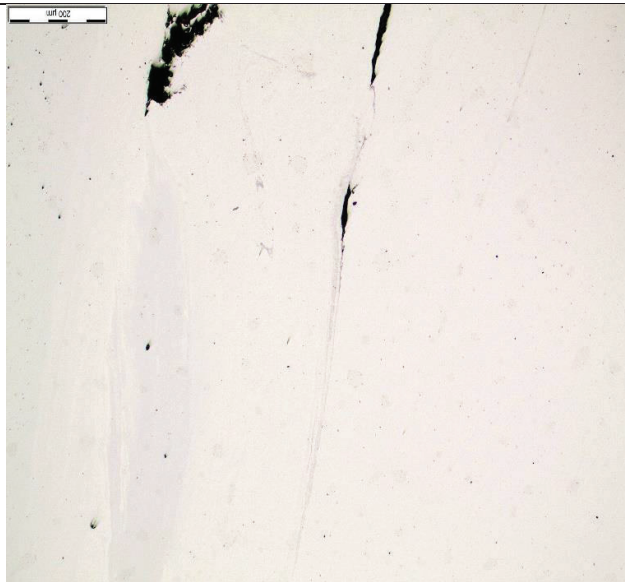


**Figura F.** Zona de la junta en la que se observa la mezcla mecánica entre los materiales, además de los granos de perlita y ferrita del acero al carbono. Aumento de 500X con ataque químico.

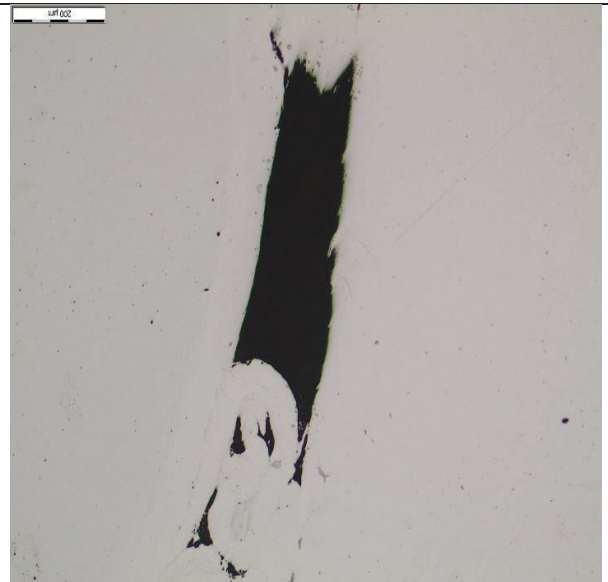
(Fuente Propia, 2017)

Tabla 3. 11. Metalografías de la probeta 2EF.

**PROBETA 2EF**

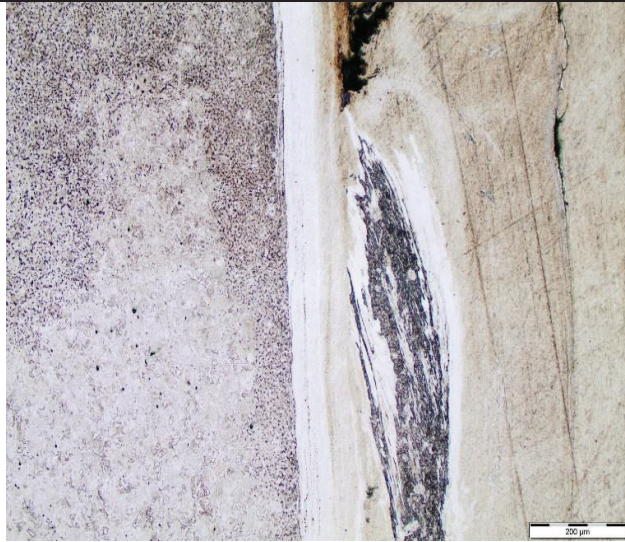


**Figura F.** Zona de la junta que se observa falta de unión entre los materiales en dos lugares de la interfase con un tamaño significativo. Aumento de 100 X sin ataque químico.

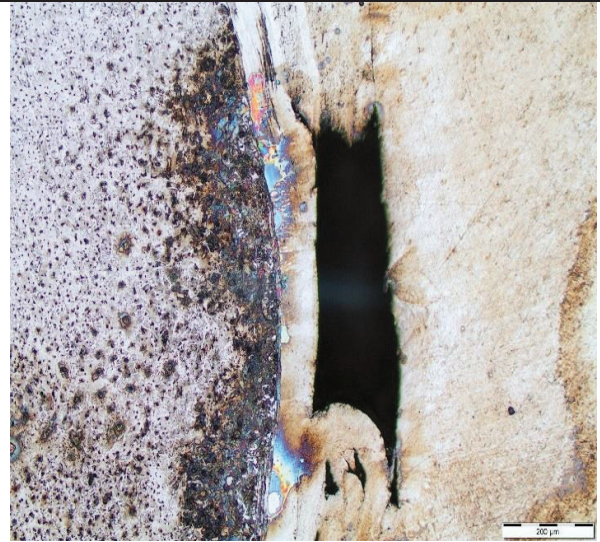


**Figura G.** Zona de la junta que muestra una gran discontinuidad en la interfase de soldadura por la mala unión de los materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.

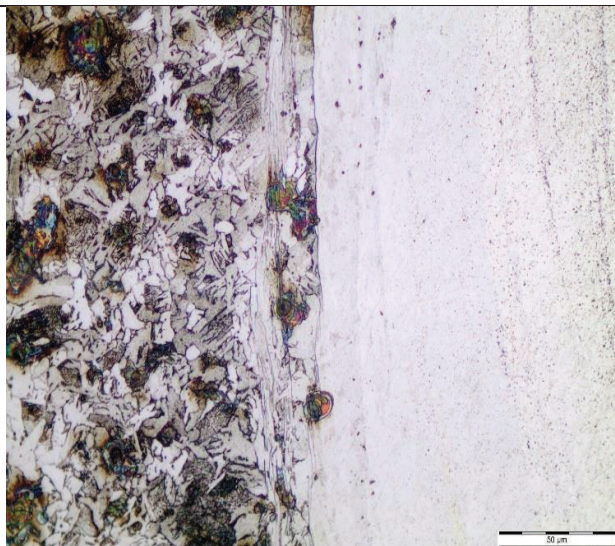




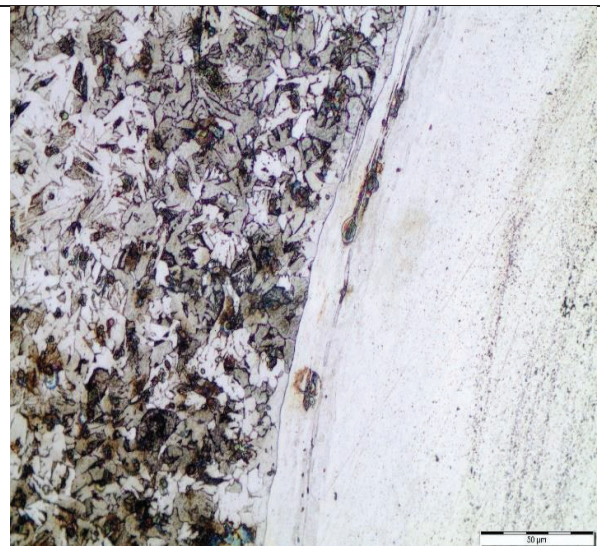
**Figura H.** Zona de la junta que se observa la interfase de la unión sin defectos, además se puede ver la trasposición de parte del acero al carbono hacia la zona del inoxidable. Aumento 100X con ataque químico.



**Figura I.** Zona de la junta tomada en el mismo lugar que la **Figura G**, se puede observar que el defecto presente no está en la interfase de la unión, sino en el acero inoxidable. La ZAC se ve con un color diferente. Aumento 100X con ataque químico.



**Figura J.** Zona de la junta que se observa la interfase de la unión sin defectos o falta de unión, además se ve claramente la microestructura del acero al carbono. Aumento de 500X con ataque químico.



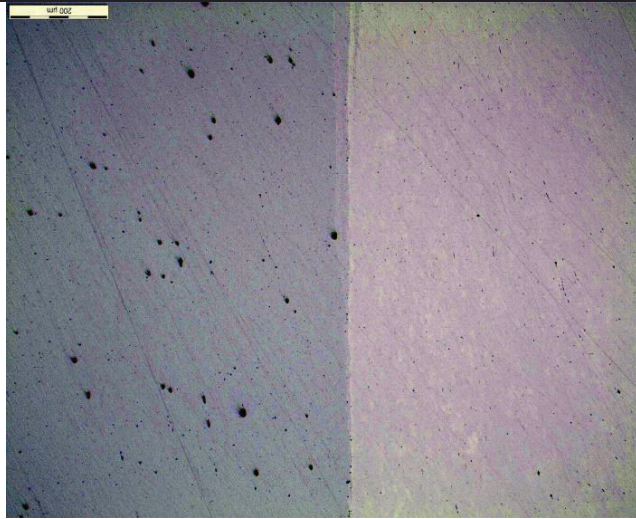
**Figura K.** Zona de la junta que se observa la interfase de la unión sin defectos o falta de unión, la inclinación que se observa es debido a que la micrografía se tomó al inicio de la espira de la rebaba. Aumento de 500X con ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

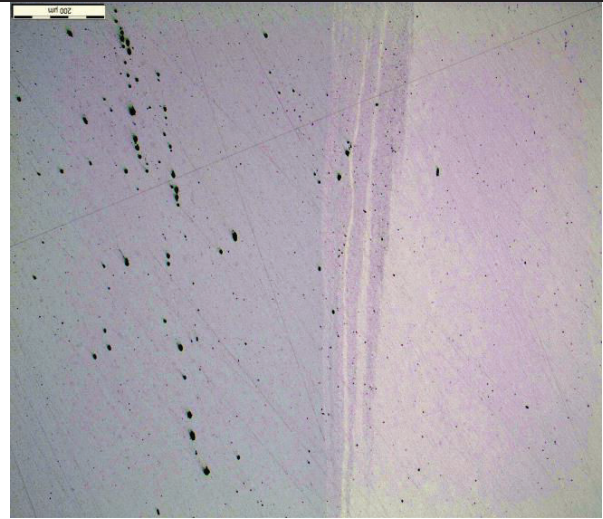


Tabla 3. 12. Metalografías de la probeta 3EF.

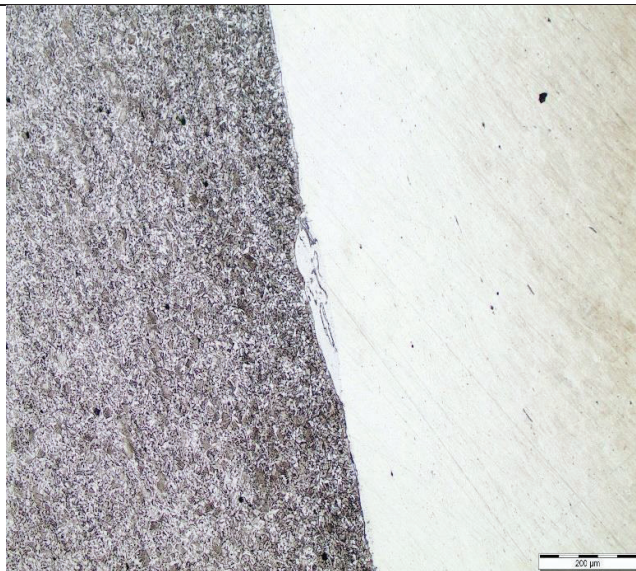
**PROBETA 3EF**



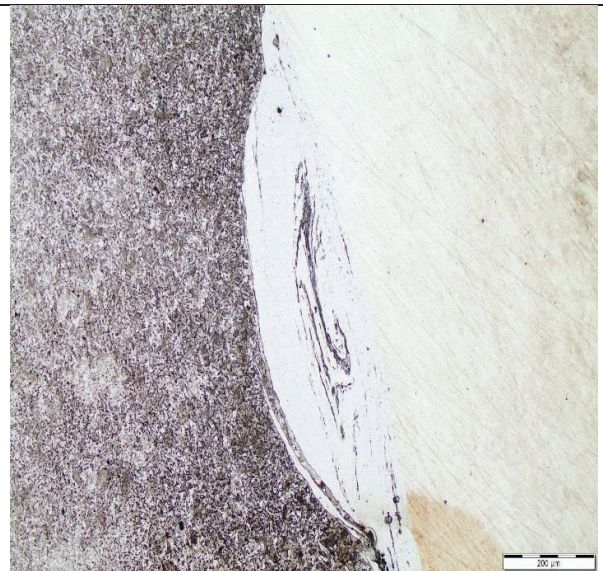
**Figura L.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, se pueden ver pequeñas inclusiones en el acero al carbono. Aumento de 100X sin ataque químico.



**Figura M.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, no se observa una mezcla mecánica entre los materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.

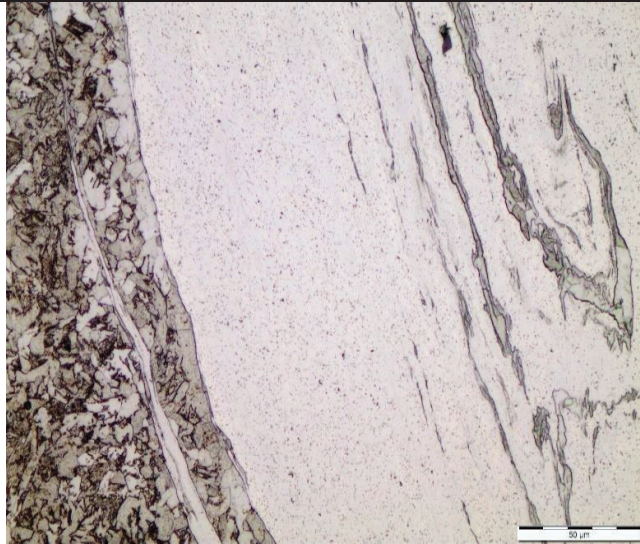


**Figura N.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, también se ve con claridad la microestructura del acero al carbono. Aumento de 100X con ataque químico.

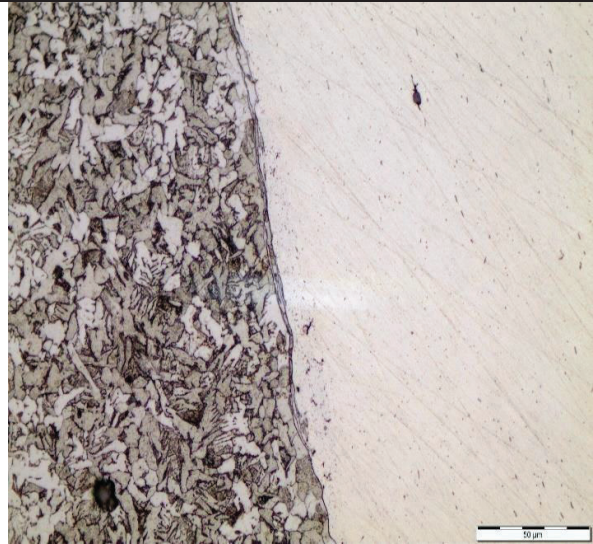


**Figura Ñ.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, el arco que se ve hace que las microestructuras que conforman el acero al carbono se replieguen y a la vez se junten más. Aumento de 100X con ataque químico.





**Figura O.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, el arco que se ve es el mismo de la figura Ñ con un mayor aumento, se nota una pequeña mezcla entre los materiales. Aumento de 500X con ataque químico.

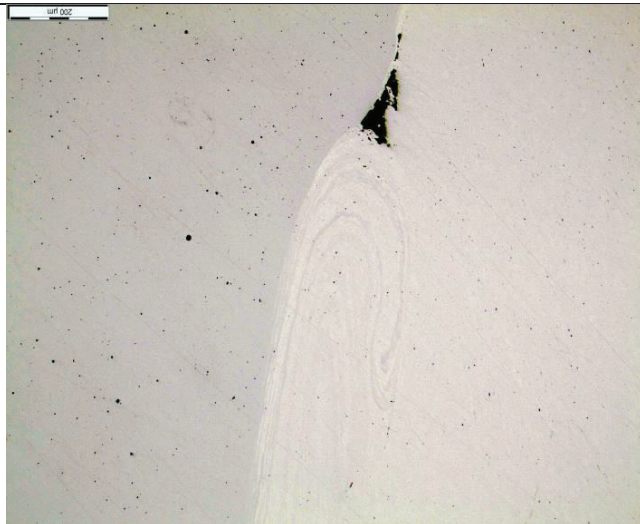


**Figura P.** Zona de la junta que se observa sin defectos o falta de unión en la interfase de soldadura, se puede observar como la microestructura del acero al carbono se encuentra relativamente junta en comparación con el metal base. Aumento de 100X con ataque químico.

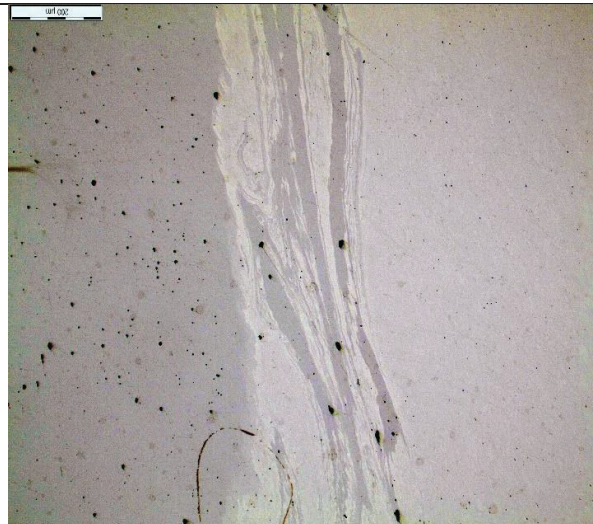
(Fuente Propia, 2017)

Tabla 3. 13. Metalografías de la probeta 4EF.

**PROBETA 4EF**

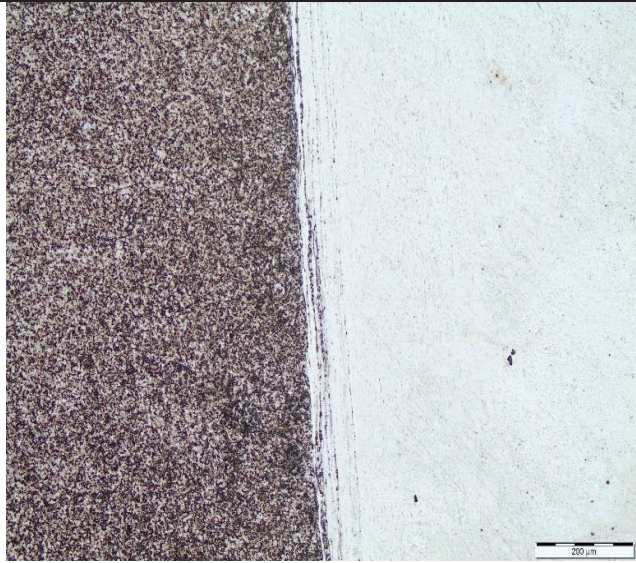


**Figura Q.** Zona de la junta en la que se observa falta de union en la interfase de soldadura, debajo de esta se puede apreciar claramente la mezcla mecánica de los materiales y una interfase de soldadura muy buena y continua. Aumento de 100X sin ataque químico

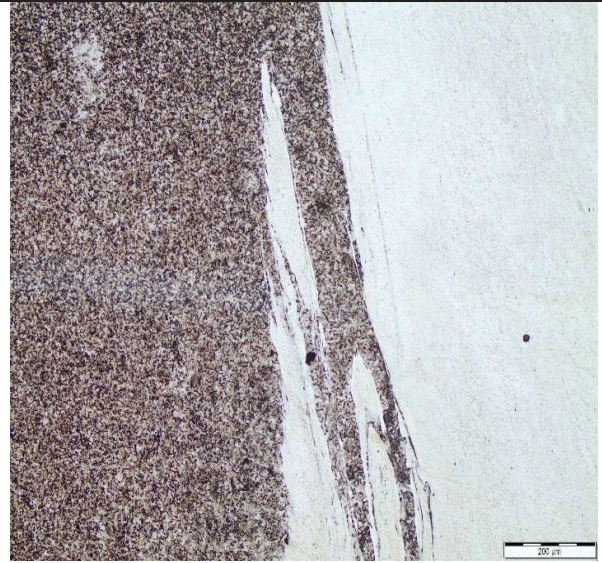


**Figura R.** Zona de la junta que muestra una mezcla mecánica de materiales en la interfase de soldadura, no se aprecian defectos en la misma, pero se puede notar gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono. Aumento de 100X sin ataque químico.

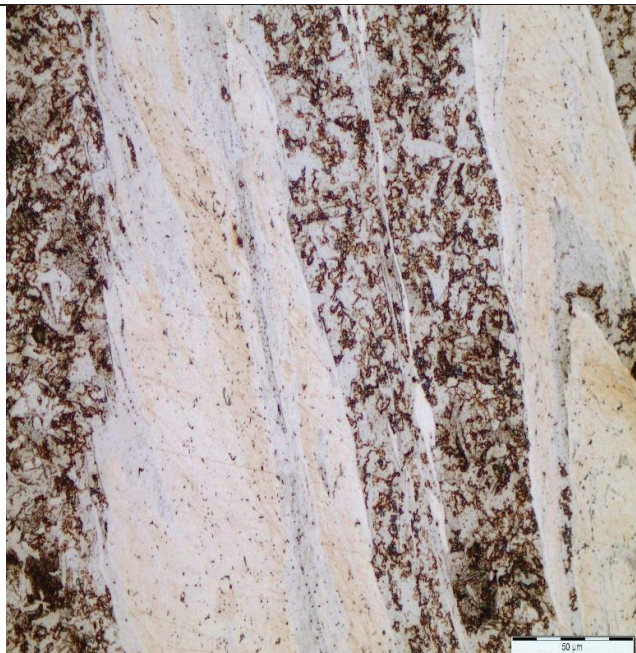




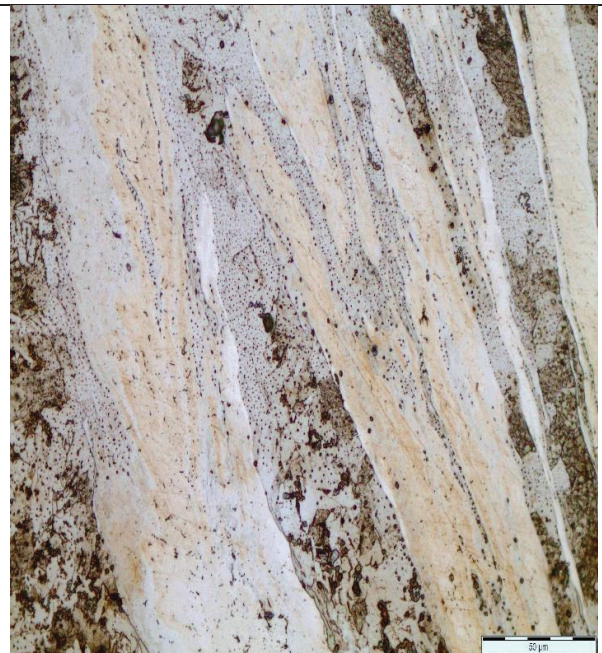
**Figura S.** Zona de la junta en la que se observa una interfase de soldadura consolidada, no se aprecian defectos en la misma, se puede observar cierta mezcla de materiales. Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura T.** Zona de la junta en la que se observa mezcla mecánica de materiales en la interfase de soldadura, sin rastros de defectos, Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura U.** Zona de la junta en la que se observa claramente una mezcla mecánica de materiales en la interfase de soldadura, se aprecia con facilidad la microestructura de los dos metales. Aumento de 500X con ataque químico.



**Figura V.** Zona de la junta en la que se observa la mezcla mecánica de los materiales en la interfase de soldadura, no se aprecian defectos en la misma y se diferencian con claridad las microestructuras de los materiales. Aumento de 500X con ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

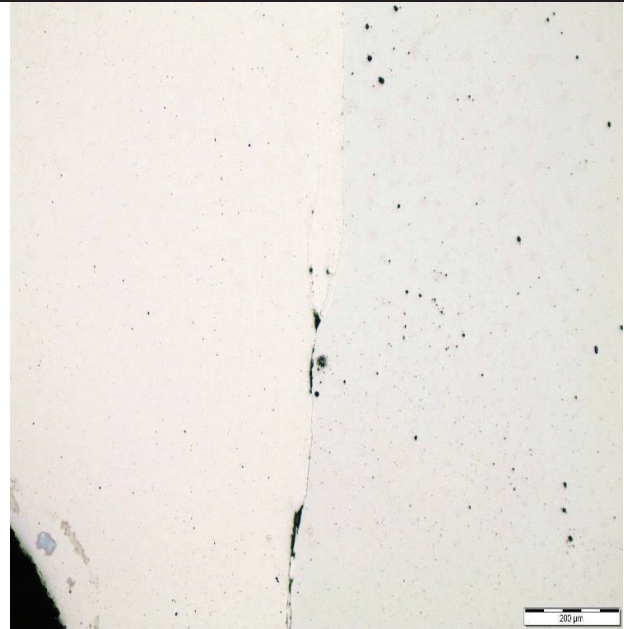


Tabla 3. 14. Metalografías de la probeta 5EF.

**PROBETA 5EF**



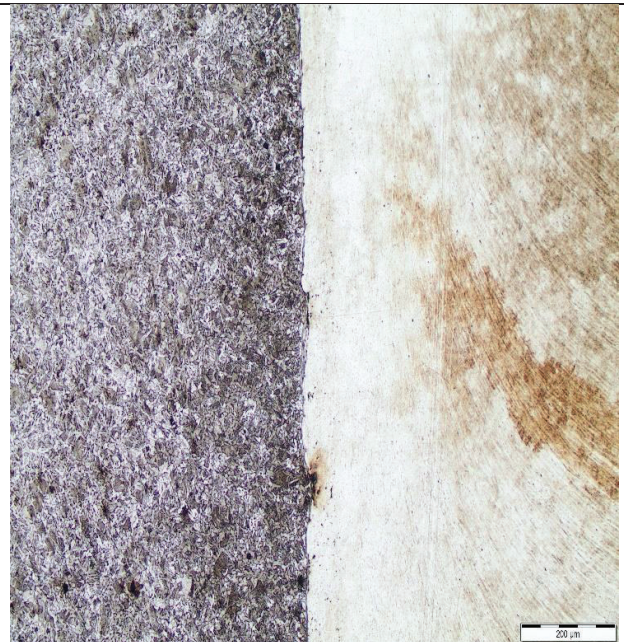
**Figura W.** Zona de la junta en la que se observa una gran discontinuidad en la interfase de la soldadura, no se distingue una mezcla de materiales. Aumento 100X sin ataque químico.



**Figura X.** Zona de la junta en la que se observa al igual que en la **Figura W** varios lugares que presentan una falta de unión en la interfase de soldadura. Aumento de 100X sin ataque químico.

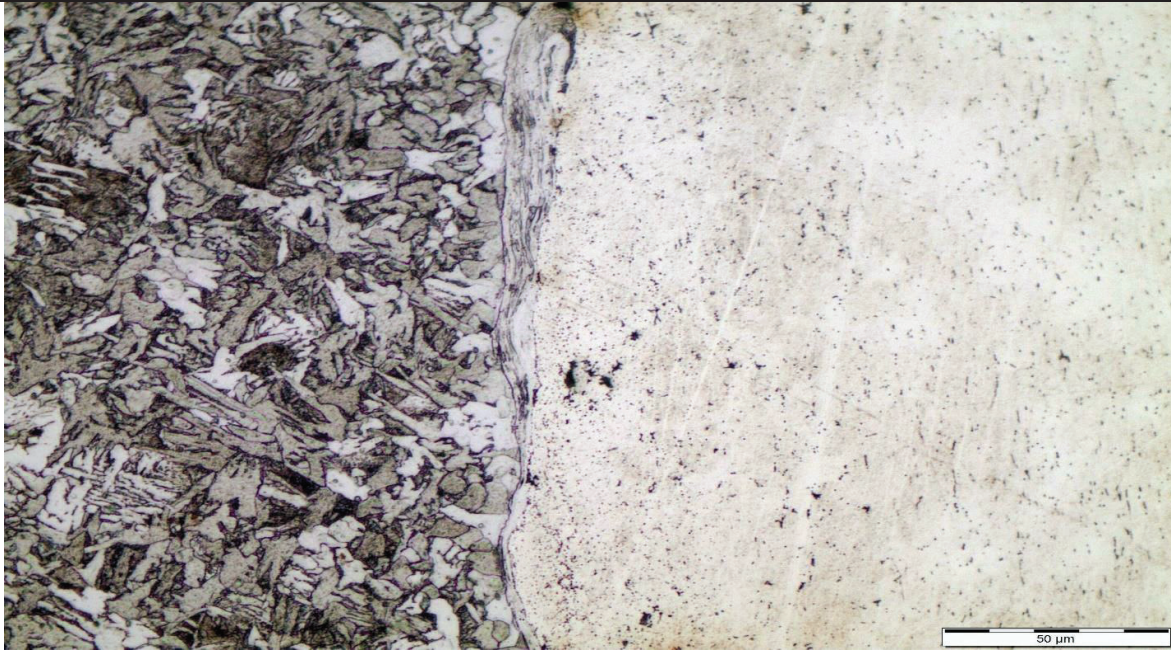


**Figura Y.** Zona de la junta en la que se observa varios lugares de la interfase de soldadura en los que no se tiene buena unión ni mezcla de materiales. Aumento de 100X con ataque químico



**Figura Z.** Zona de la junta en la que se observa una clara falta de unión y no existe rastro de que se haya producido una mezcla de materiales. Aumento de 100X con ataque químico.



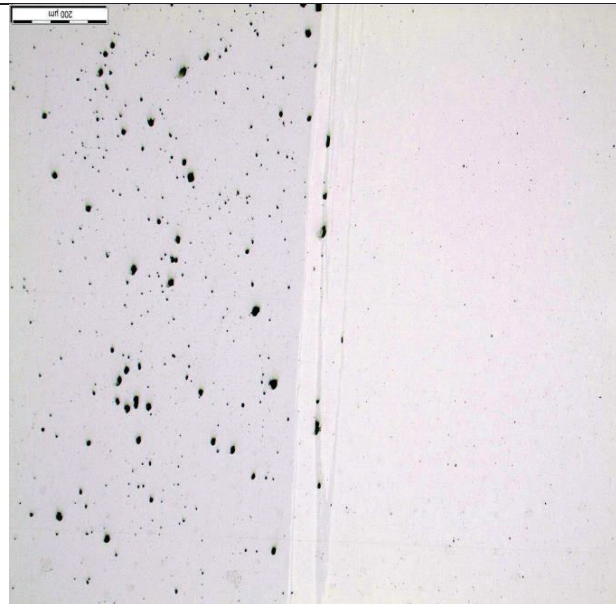


**Figura AA.** Zona de la junta en la que se observa una superposición de un material sobre otro pero sin mezclarse como se ha visto en otras micrografías, de igual manera se ve que en ciertos lugares no se produjo una unión adecuada, se distinguen con claridad los granos distorsionados del acero al carbono. Aumento 500X con ataque.

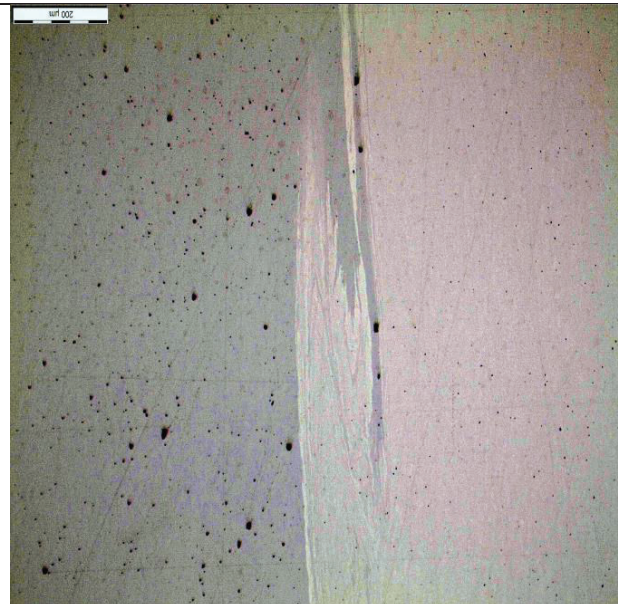
(Fuente Propia, 2017)

Tabla 3. 15. Metalografías de la probeta 6EF.

**PROBETA 6EF**

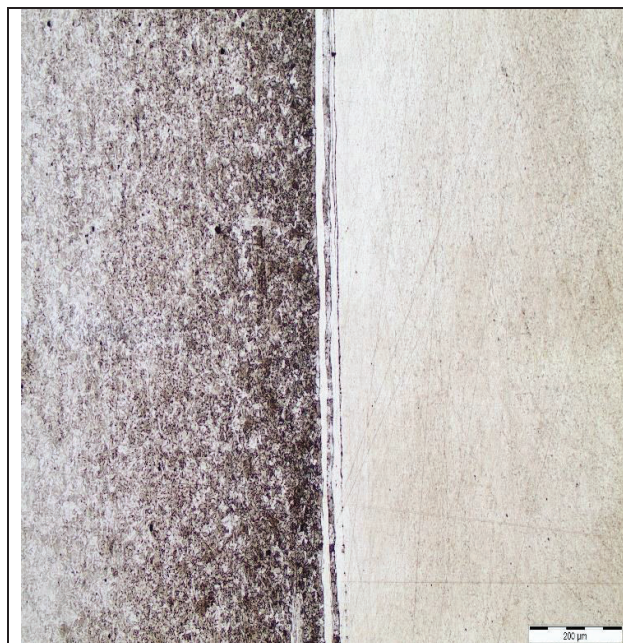


**Figura AB.** Zona de la junta en la que se observa buena unión en la interfase de soldadura, además se puede ver gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono. Aumento de 100X sin ataque químico.



**Figura AC.** Zona de la junta en la que se observa mezcla de materiales en la interfase de soldadura, también se notan gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono. Aumento de 100X sin ataque químico.





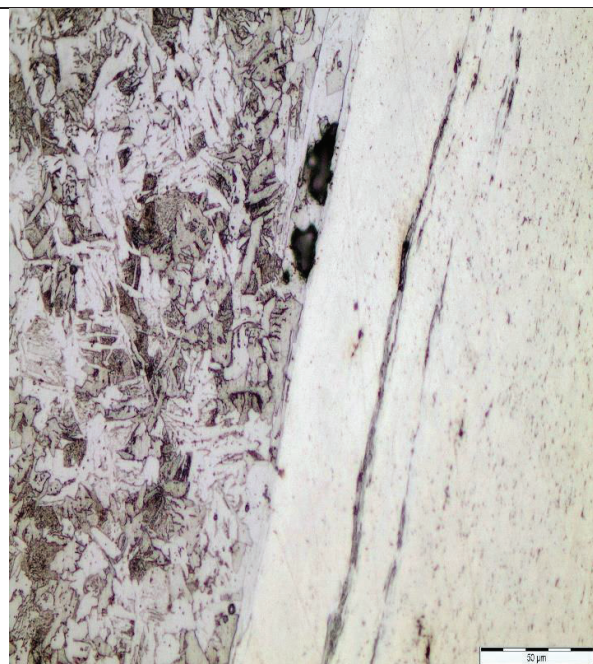
**Figura AD.** Zona de la junta en la que se observa unión en toda la interfase de soldadura y cierta mezcla mecánica de los materiales, además se nota como varía la forma de los granos con la distancia a la unión. Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura AE.** Zona de la junta en la que se observa buena unión en la interfase de la soldadura además de mezcla de materiales, las inclusiones presentes en el acero al carbono son notorias. Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura AF.** Zona de la junta en la que se observa una interfase de soldadura buena sin defectos, mezcla de materiales y la distorsión de los granos. Aumento de 500X con ataque químico.



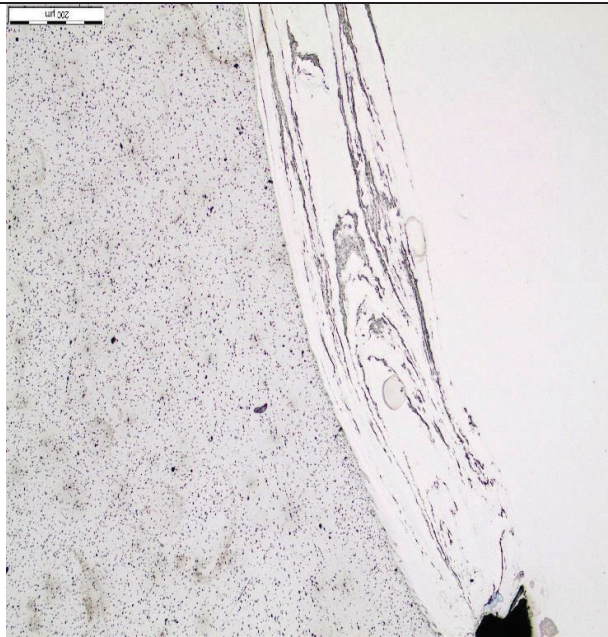
**Figura AG.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida y con mezcla de materiales. Aumento de 500X con ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

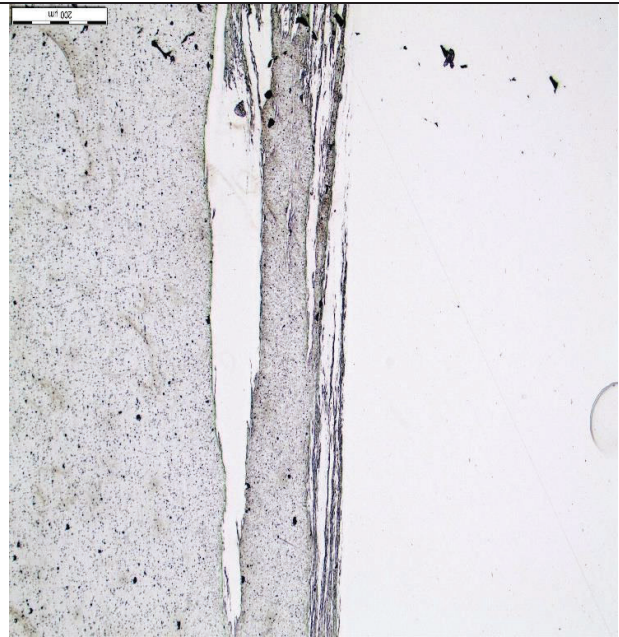


Tabla 3. 16. Metalografías de la probeta 7EF.

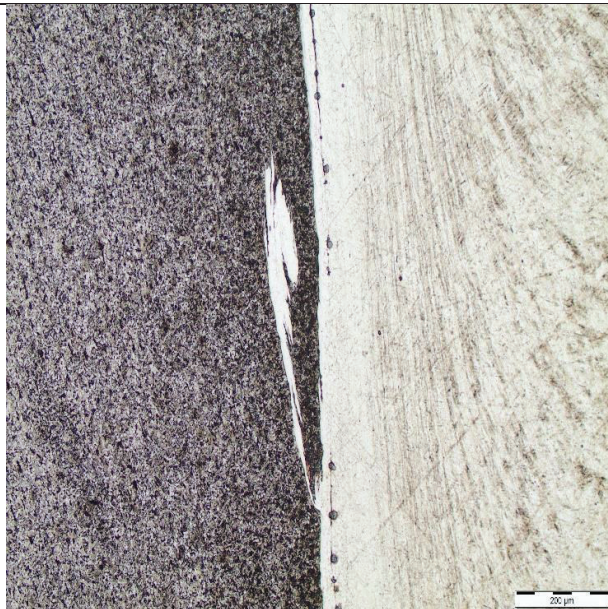
**PROBETA 7EF**



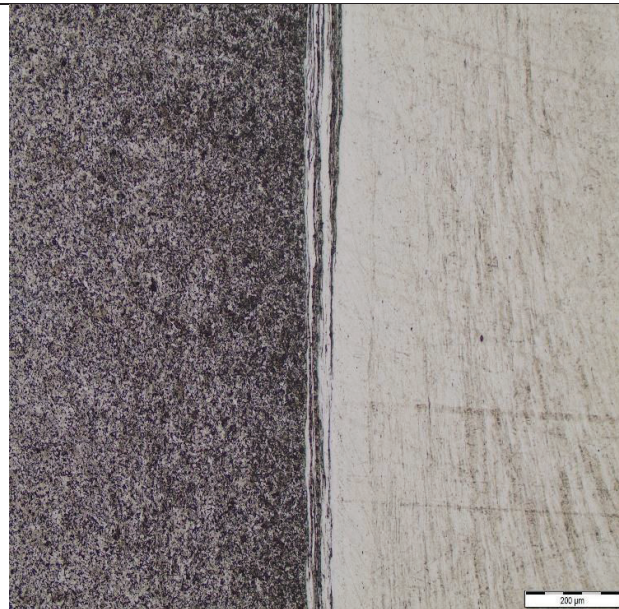
**Figura AH.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unido y con una clara zona en la que se mezclan los materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.



**Figura AI.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida, la mezcla mecánica de los materiales se visualisa claramente. Aumento de 100X sin ataque químico.

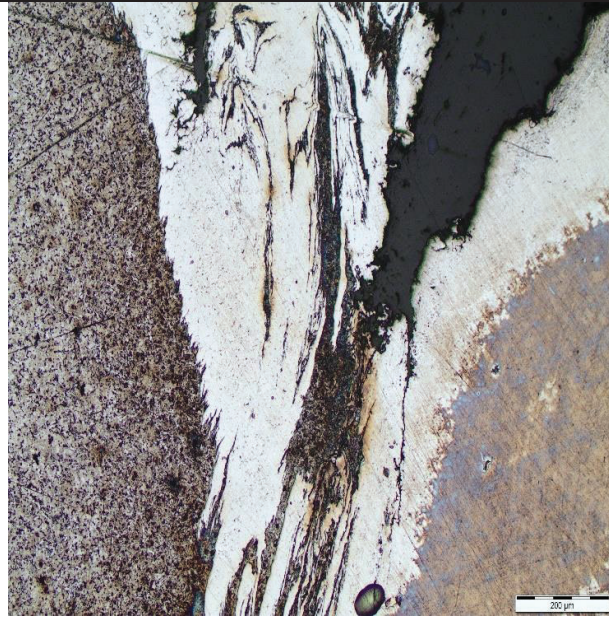


**Figura AJ.** Zona de la junta en la que la interfase de soldadura está correctamente unida y con una cierta zona mezclada. También se ve la microestructura distorsionada de los materiales. Aumento de 100X con ataque químico.



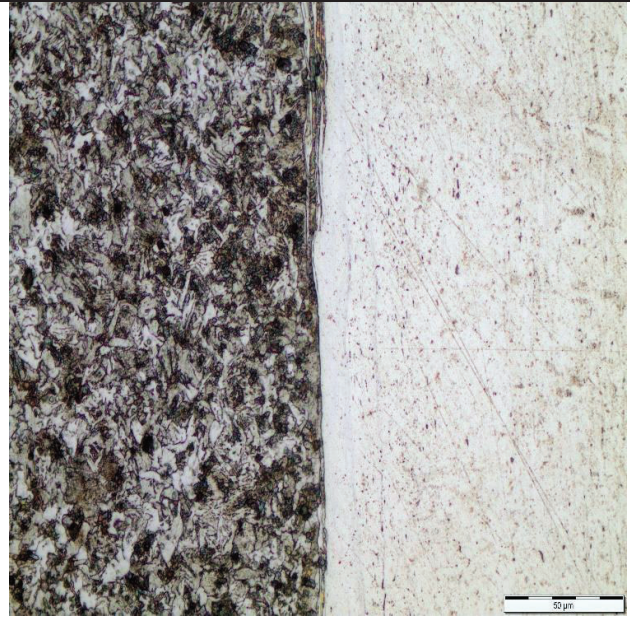
**Figura AK.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida a lo largo de la misma con varias zonas mezcladas. Aumento de 100X con ataque químico.





**Figura AL.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de la soldadura, exactamente en el punto en donde se empieza a formar la rebaba causada por el proceso, se nota claramente que los materiales se unen correctamente. Aumento de 100X con ataque químico.

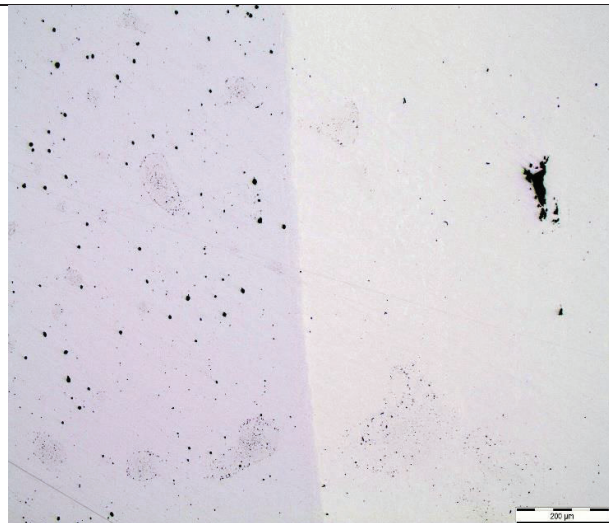
(Fuente Propia, 2017)



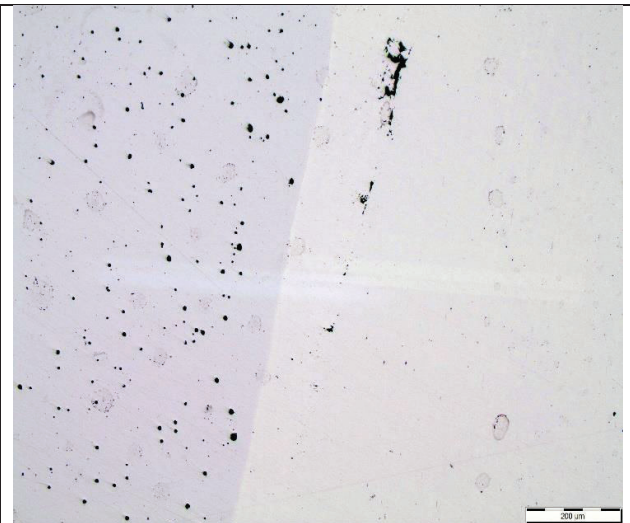
**Figura AM.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unido a lo largo de la misma sin defectos, los granos distorsionados son fácilmente visualizados. Aumento de 500X con ataque químico.

Tabla 3. 17. Metalografías de la probeta 8EF.

**PROBETA 8EF**

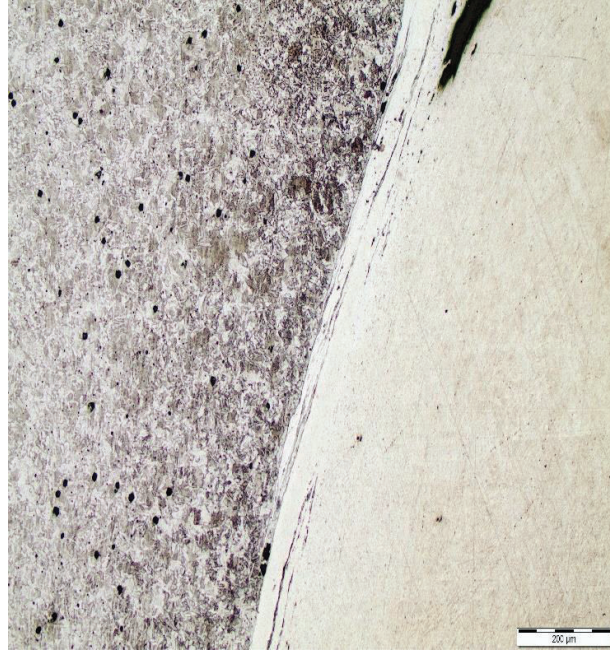


**Figura AN.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura perfectamente unida, se ve gran cantidad de inclusiones en ambos materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.

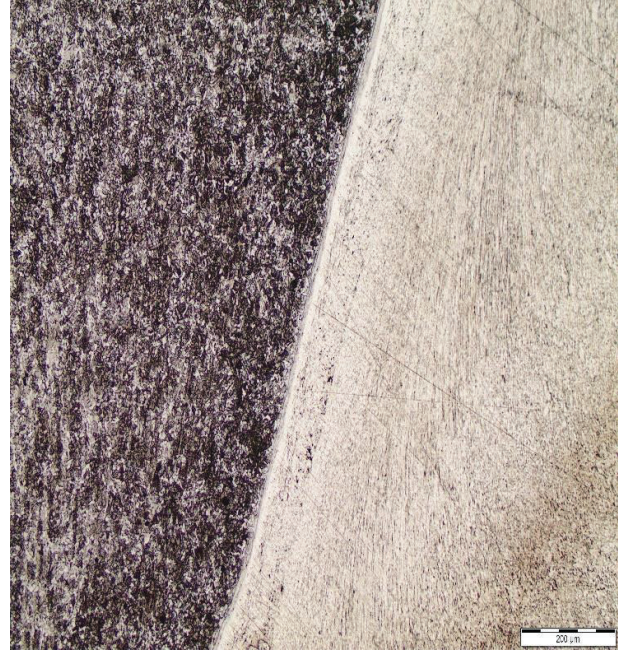


**Figura AÑ.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura perfectamente unida, las inclusiones en el acero al carbono son muchas, se ven pequeños defectos en el acero inoxidable. Aumento de 100X sin ataque químico.

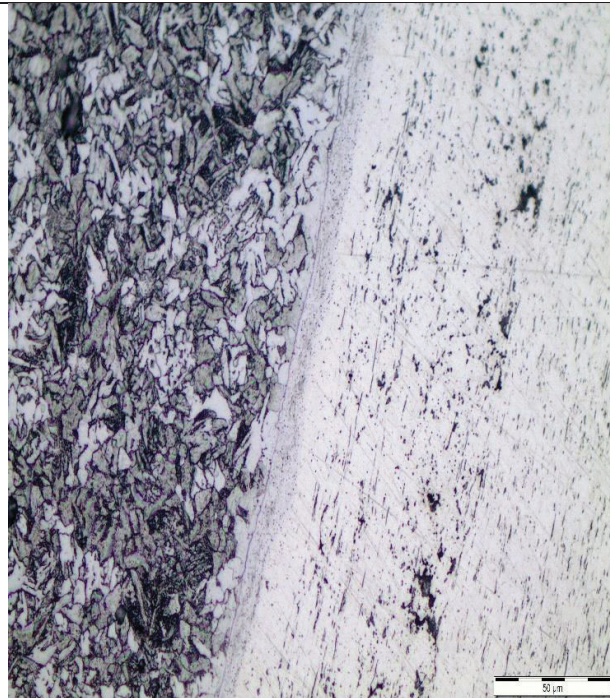




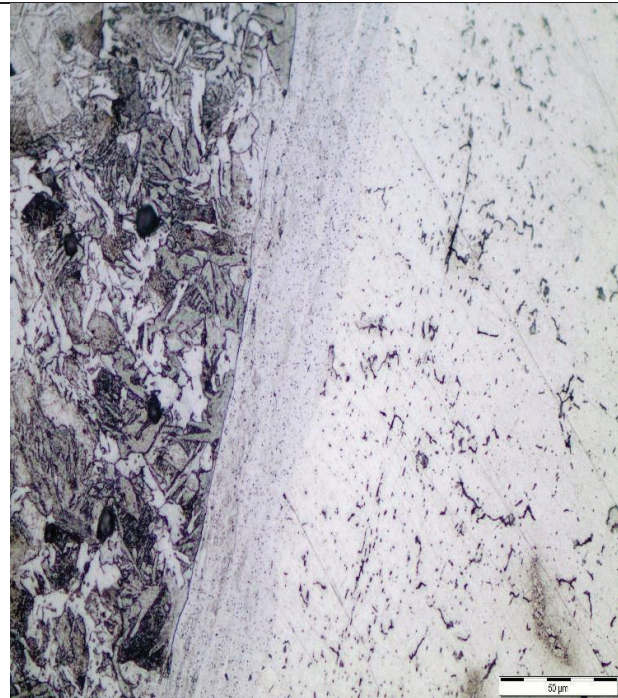
**Figura AO.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida, con poca mezcla en la parte superior de la unión. Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura AP.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura perfectamente unida, las microestructuras de ambos materiales también son visibles. Aumento de 100X con ataque químico.



**Figura AQ.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida con mezcla de materiales, se observa la distorsión de los granos. Aumento de 500X con ataque químico.



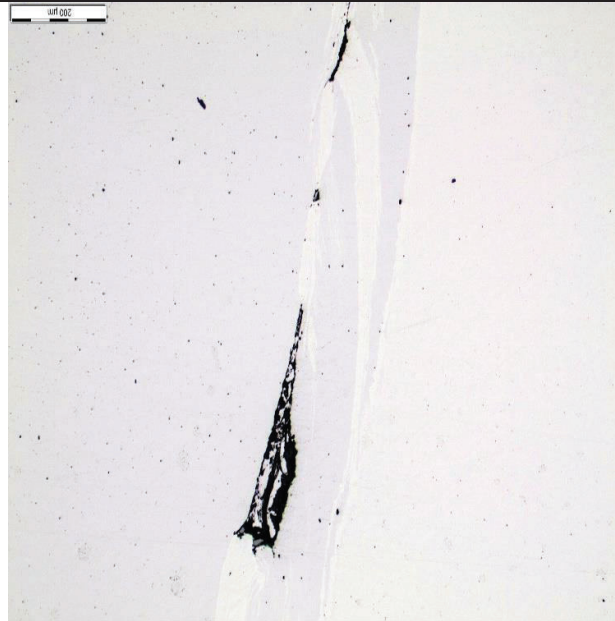
**Figura AR.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida, los granos distorsionados son similares a los de la **Figura AQ.** Aumento de 500X con ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

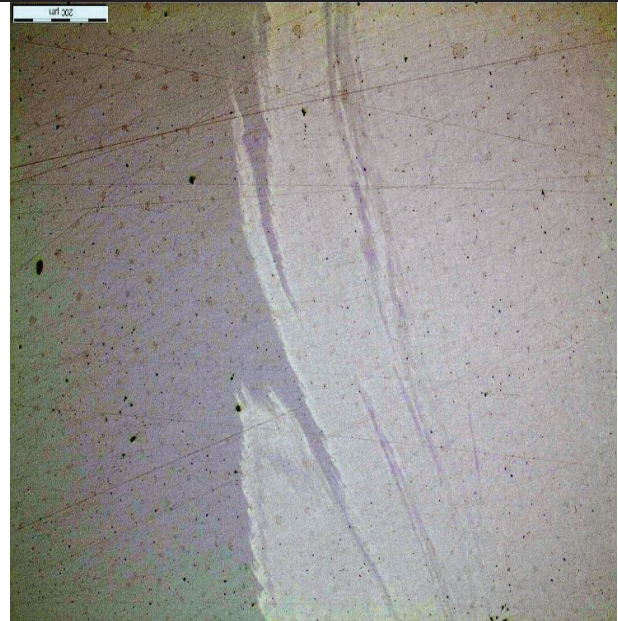


Tabla 3. 18. Metalografías de la probeta 9EF.

**PROBETA 9EF**



**Figura AS.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura con una falta de unión considerable, pero se ve que también hay mezcla de materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.



**Figura AT.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unido, y con mezcla de materiales. Aumento de 100X sin ataque químico.

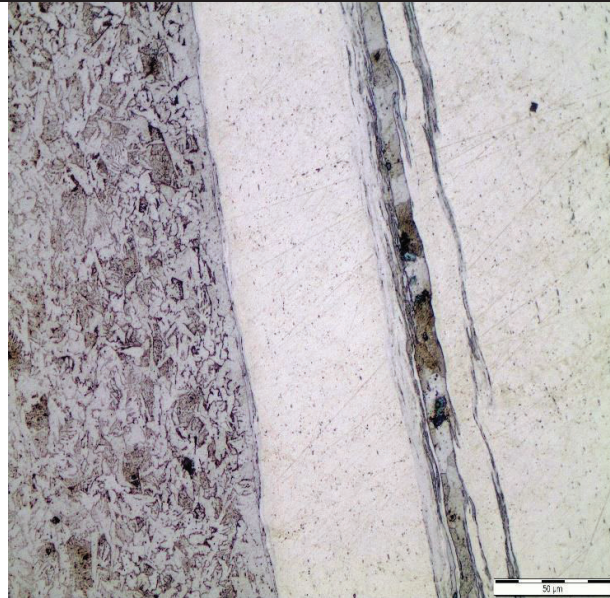


**Figura AU.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura perfectamente unida, se nota la mezcla mecánica de los materiales y muchas inclusiones. Aumento de 100X con ataque químico.

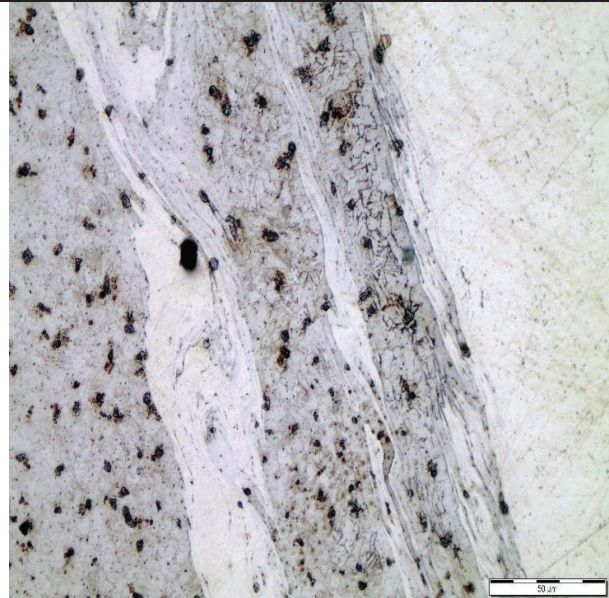


**Figura AV.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura perfectamente unida. Se nota gran cantidad de inclusiones. Aumento de 100X con ataque químico.





**Figura AW.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unida y los granos distorsionados del acero al carbono. Aumento de 500X con ataque químico.



**Figura AX.** Zona de la junta en la que se observa la interfase de soldadura correctamente unido y una clara mezcla mecánica de materiales, además se observan las inclusiones que se encuentran en esta probeta. Aumento de 500X con ataque químico.

(Fuente Propia, 2017)

## 3.2. Discusión

### 3.2.1 Proceso de soldadura por fricción

Las tres pruebas realizadas para caracterizar la junta soldada, presentan resultados variados, para empezar, la experimentación inicial sirve como una prueba en la que se quiere comprobar el funcionamiento de la máquina y el comportamiento de los materiales base al momento de realizar la soldadura, la figura 3.1 muestra varias probetas soldadas, las mismas que, presentan un marcado desalineamiento, esto se produce debido a dos factores. Primero, en esta prueba la longitud libre entre probetas supera fácilmente los 6 centímetros (en la tesis desarrollada por Arguello se recomienda una longitud libre entre probetas no mayor a 2 centímetros), motivo por el cuál al momento de aplicar la fuerza axial de forja los materiales pandean y se desalinean considerablemente. Segundo, al ser aceros disímiles no se comportan de la misma forma, el acero al carbono llega a plastificarse más rápidamente que el acero inoxidable y esto hace que el acero inoxidable, empuje la zona plastificada del acero al carbono, pero no uniformemente. Esto sumado a la incorrecta longitud libre, da como resultado una excesiva desalineación y por ende una soldadura que se realizaba pero que, se



puede predecir su falla. Durante esta prueba, el encogimiento axial varía entre 0,3 y 1,6 centímetros (tabla 3.1), estos resultados son normales teniendo en cuenta que esta prueba no se la realiza con fines de obtener soldaduras óptimas sino más bien para conocer mejor el proceso en sí. En la figura 3.2 se relaciona la fuerza de forja con el encogimiento axial de las probetas soldadas, en este gráfico se puede apreciar claramente que generalmente si se aumenta la fuerza de forja, el encogimiento será también mayor, eso sí, al variar las velocidades, se observa un comportamiento diferente entre una y otra con respecto al encogimiento producido.

Ahora, las pruebas efectuadas para relacionar los parámetros que intervienen en la soldadura se realizan de una manera más técnica, controlando y midiendo todos los parámetros de soldadura, esto se ve reflejado en las figuras 3.3 y 3.4, en las que se ve que el desalineamiento presentado en la experimentación inicial se reduce y se pueden obtener mejores juntas y encogimientos axiales que varían entre 0,4 y 1,1 centímetros (tabla 3.2) para la primera prueba y entre 0,4 y 1,1 (tabla 3.3) para la segunda. En las figuras 3.5 y 3.7 correspondientes a la relación entre la fuerza de forja y el encogimiento de ambas pruebas, se observa un comportamiento no tan lineal como lo fue en la experimentación inicial, es decir, no necesariamente al aumentar la fuerza de forja se incrementará también el encogimiento, el motivo es el tiempo de calentamiento, si se tienen bajos tiempos de calentamiento, no se llega al punto de plastificación de los materiales, dando como resultado un encogimiento pequeño y una unión no tan fuerte. Cuando se relaciona el tiempo de calentamiento con el encogimiento axial de ambas pruebas (figuras 3.6 y 3.8), se observa que no existe un patrón estable de comportamiento, esto debido a que en estas pruebas se usa gran variedad de fuerzas de forja, pero como se verá más adelante esto cambia cuando se realizan pruebas con valores de fuerza en un rango definido.

Cabe mencionar que, para realizar la experimentación final, y con el objetivo de garantizar una soldadura óptima se procede a reducir la longitud libre entre probetas con la ayuda de una placa de acero colocada entre el pistón de la bomba hidráulica y el mandril de sujeción fijo, esto a su vez permite que los materiales no pandeen y permanezcan alineados. El encogimiento axial para esta prueba final varía entre 0,8 y 1,26 centímetros (tabla 3.5), en la figura 3.14 (a), se observa claramente como la soldadura se encuentra consolidada, además que se nota la deformación que han sufrido ambos materiales como una rebaba uniforme, el acero al carbono debido a su composición química y propiedades tiene una mayor deformación que el acero inoxidable. La figura 3.10 que relaciona la fuerza de forja con el encogimiento axial, muestra que, cuando las fuerzas aplicadas se encuentran en un rango fijo y con tiempos

de calentamiento similares, el encogimiento axial se comporta casi linealmente con esta fuerza, es decir, si se aumenta la fuerza y el tiempo en igual proporción, el encogimiento axial también aumentará, lo anteriormente dicho también se ve sustentado por la figura 3.11 en el que se muestra la relación entre el tiempo de calentamiento con el encogimiento axial la cual es similar a la presentada en la figura 3.10, en este gráfico se ve que con velocidades bajas se necesita un mayor tiempo de calentamiento y mientras va subiendo la velocidad, los tiempos de calentamiento son menores.

En todas las pruebas efectuadas se observa que el acero de bajo carbono AISI 1018 es el que más sufre, se observa que recibe un mayor efecto negativo por el calentamiento y como se deforma más, la rebaba que se forma luego de efectuar la soldadura es mayor, generando un mayor desperdicio de material.

### **3.2.2 Ensayos de tracción a las probetas soldadas**

Los ensayos de tracción fueron realizados en dos de las tres partes experimentales de la metodología.

Para relacionar los parámetros con la finalidad de obtener una mejor soldadura, se realizan los ensayos que verifican cuan fuerte es la unión y que valores de dichos parámetros dan mejores resultados. Estos resultados obtenidos ayudan para poder determinar los rangos en los que deben estar los valores de la fuerza de forja y del tiempo de calentamiento, así como de la velocidad óptima para la junta. Todas las probetas ensayadas de la parte de la relación de parámetros fallan en la junta soldada como muestra la figura 3.9, los valores de la resistencia a la tracción de dichas probetas están entre 243 y 584 MPa (35,2 y 84,6 Ksi). Estos resultados permiten conocer que las uniones soldadas no son lo suficientemente fuertes, pero si dan una clara idea del camino a seguir para obtener una unión óptima.

En base a los datos recopilados en la prueba anterior y a los parámetros que dan mejores resultados, se procede a la experimentación final. Los ensayos se realizan a las 9 probetas soldadas dando como resultado que esta vez en 5 de las 9 la falla se produce en el material base y las restantes en la junta soldada, los valores de la resistencia a la tracción de estas probetas están entre 599 y 825 MPa (86,74 y 119,87 Ksi), estos valores demuestran una sustancial mejora en la soldadura en cuanto a resistencia a la tracción se refiere. La figura 3.12 presenta la relación que existe entre la fuerza de forja y la resistencia a la tracción para las tres velocidades utilizadas, cuando se trabaja a 2500 rpm y se varían las fuerzas, la resistencia a la tracción varía significativamente con un patrón irregular, este patrón es similar a cuando se trabaja con 4200 rpm. Pero si se trabaja a 4900 rpm la resistencia a la tracción permanece casi

constante cuando se aplican fuerzas de entre 650 y 850 Kgf. El comportamiento anteriormente descrito también se presenta cuando se relaciona el tiempo de calentamiento con la resistencia a la tracción como lo muestra la figura 3.13.

A partir de los datos obtenidos de la tabla 3.6, la resistencia a la tracción se incrementa al aumentar la velocidad de rotación, con 2500 rpm se tienen los valores más bajos desde 599 a 726 MPa, con 4200 rpm se tienen valores intermedios que van desde 783 a 825 MPa y 4900 rpm se tienen los valores más altos de resistencia entre 801 y 803 MPa. Los tiempos de calentamiento de lo anteriormente descrito fueren relativamente similares, por lo que se puede decir que un factor primordial para la obtención de una correcta soldadura es la velocidad de rotación.

Como se mencionó, de las 9 probetas ensayadas en la experimentación final, 4 presentan la falla en la junta soldada y las restantes fallan en el material base (figura 48b), las probetas 1EF (figura 3.15), 2EF (figura 3.16), 3EF (figura 3.17) y 5EF (figura 3.19) fallan en la junta soldada, 3 de estas 4 son soldadas con velocidad de 2500 rpm (1EF, 2EF y 3EF), la restante se obtuvo con velocidad de 4200. Las probetas 4EF (figura 3.18), 6EF (figura 3.20), 7EF (figura 3.21), 8EF (figura 3.22) y 9EF (figura 3.23) fallan en el material base, se debe destacar que todas las probetas soldadas con velocidad de 4900 fallan en el material base y no en la soldadura.

Las probetas 4EF, 6EF, 7EF y 8EF, fallan en el acero al carbono y presentan una fractura dúctil de copa y cono, pero la probeta 9EF falla en el acero inoxidable, dicha fractura es más parecida a una fractura frágil y está ubicada muy cerca de la junta soldada.

### **3.2.3 Ensayo de tracción al material base**

Las tres probetas ensayadas de acero al carbono y las tres de acero inoxidable, tienen un valor promedio de resistencia a la tracción de 807,7 MPa y 894 MPa respectivamente. Esto sirve para contrastar los ensayos de tracción que se realizaron a la soldadura, ya que en las probetas que fallaron en los materiales base la fractura se presentó cuando se alcanzaron valores de entre 783 y 803 MPa, estos valores están muy cercanos a el promedio calculado del acero al carbono, que es el que tiene menor resistencia a la tracción y por ende en el que se debe presentar la falla. Ambos metales presentan fracturas dúctiles de cono y copa, un porcentaje de elongación en 50 mm promedio de 9,1% para el acero al carbono y de 21,2% para el acero inoxidable.

### **3.2.4 Análisis químico de materiales base**

La composición química de los materiales base mostrada en la tabla 3.8, muestra que:

El acero al carbono AISI 1018 presenta una composición química acorde a lo que las normas recomiendan, todos los valores en porcentaje de cada elemento están dentro del rango permisible que caracteriza a este tipo de acero.

El acero inoxidable AISI 304 por su parte presenta un porcentaje de carbono 3 décimas mayor al permisible y también un porcentaje bajo de cromo, los demás elementos aleantes tienen sus valores dentro de los rangos establecidos.

### 3.2.5 Análisis metalográfico

#### 3.2.5.1 Caracterización del acero inoxidable

Antes de realizar el estudio metalográfico de la soldadura obtenida, se procede a realizar un análisis de la varilla de acero inoxidable para caracterizar el material base. Gracias a los resultados de la tabla 3.8, se puede comprobar que el material base es propiamente un acero inoxidable AISI 304, esta varilla se obtiene mediante el proceso de extrusión. En la figura 3.26 se observa la comparación realizada entre la muestra obtenida del material base y la micrografía del mismo material realizada por Pérez, y otros (2014), observando una similitud en ambos, pero con cierta diferencia debido al proceso usado para formar la varilla del material usado para este proyecto que es extruido por lo que, no permite apreciar con claridad la formación de los granos..



Figura 3. 26. (a) Metalografía material base (b) Metalografía de Pérez y otros.  
(Pérez, y otros, 2014)

#### 3.2.5.2 Caracterización del acero al carbono

Para el análisis del acero al carbono se considera su composición química y la microestructura que se observa en el análisis metalográfico de los materiales base y que será comparado esta vez con el trabajo realizado por Aminul y otros (2014).

Su composición química detallada en la tabla 3.8 coincide con la que debería tener un acero AISI 1018 trabajado en caliente. En la figura 3.27 se observa la comparación

realizada entre la muestra obtenida del material base y la micrografía del mismo material realizada por Aminul, y otros (2014), observando que son prácticamente iguales, con el mismo aumento se observa claramente la ferrita y perlita además de la forma y tamaño de grano.

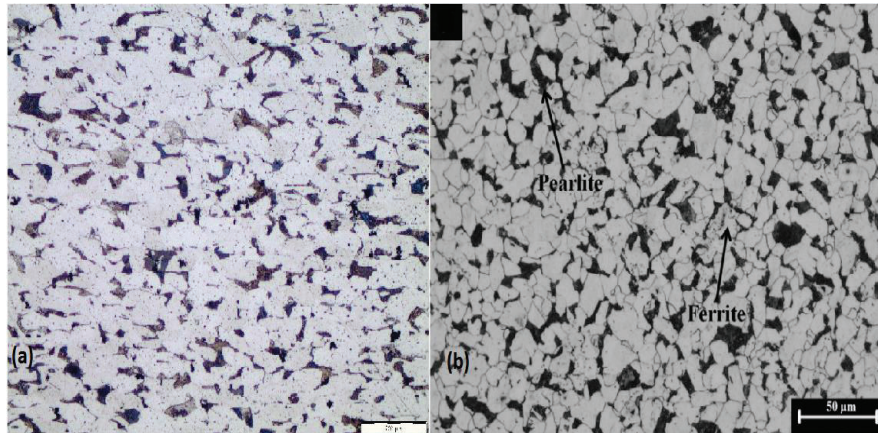


Figura 3. 27. (a) Metalografía acero AISI 1018 (b) Metalografía de Aminul y otros.  
(Aminul, Tahrir, Adel, & Akram Alfantazi, 2014)

### 3.2.5.3 Caracterización de la junta soldada

Para caracterizar la junta soldada se realiza un análisis de las micrografías obtenidas de las 9 probetas soldadas en la experimentación final.

A continuación, se realiza el estudio de las zonas de unión para cada probeta, esto se realiza con base a las tablas 3.10 a 3.18.

### 3.2.5.4 Probeta 1EF

Esta muestra fue realizada con una velocidad de 2500 rpm un tiempo de calentamiento de 8,55 segundos y con 100 y 400 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en la junta soldada). Las micrografías realizadas con un aumento de 100X sin ataque químico muestran una mezcla mecánica de los metales, no se observa que haya falta de unión, pero si se puede apreciar varios defectos en los materiales base como se observa en las **Figuras A y B**. En las micrografías atacadas químicamente mostradas en las **Figuras C y D** con aumento de 100X se ve más claramente la mezcla mecánica de los materiales. Cuando se aumenta a 500X las micrografías observadas en las **Figura E y F** muestran con claridad la mezcla mecánica y los granos del acero al carbono. Esta zona de contacto que es la que ha sido sometida a una deformación plástica severa durante el proceso, tiene una estructura de grano muy fina debido a un esfuerzo severo y una recristalización completa. (Rombaut , 2010)



### 3.2.5.5 Probeta 2EF

Utilizando una velocidad de 2500 rpm un tiempo de calentamiento de 11,07 segundos y con 100 y 500 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en la junta soldada) se pudo obtener esta junta. Las micrografías realizadas con aumento de 100X y sin ataque químico, muestran que en esta probeta existe falta de unión entre los materiales mostrando dos grietas (**Figura F**), esto debido a que no hubo presión y temperatura suficiente para garantizar la unión total de los materiales, no se aprecia una mezcla mecánica en la junta. Por otro lado, en la **Figura G**, se observa una discontinuidad de grandes dimensiones en comparación con las grietas de la Figura F. Cuando se ataca los materiales, las micrografías muestran que una zona de la soldadura presenta una buena unión y hasta una pequeña mezcla (**Figura H**), además en esta misma figura se observa cómo va variando el tamaño de grano con respecto a la distancia a la unión, notándose que cerca de la junta se observa un grano más fino producto de la recristalización. En la **Figura I**, se observa la discontinuidad descrita en la **Figura G**, y se nota que este defecto no se encuentra en la zona de la interfase de soldadura, sino más bien en el acero inoxidable. Al aumentar a 500X es posible apreciar nuevamente una buena unión, pero sin mezcla y los granos finos del acero al carbono (**Figura J**), en la **Figura K**, se observa una inclinación en la unión, esto se da ya que esta micrografía fue tomada llegando a la espira de la rebaba, se nota claramente que el material fluye en esa dirección.

### 3.2.5.6 Probeta 3EF

Aplicando 100 y 850 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente, con una velocidad de 2500 rpm y un tiempo de calentamiento de 19 segundos (falla en la junta soldada) la probeta fue soldada. Las micrografías con aumento de 100X y sin ataque químico (**Figuras L y M**), muestran que la unión está bien y sin defectos, pero no se ve que exista mezcla de los metales, además, existe gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono. De igual forma en las **Figuras N y Ñ** con aumento de 100X y atacadas químicamente, se observa que no se presenta defectos en la unión ni mezcla, se aprecia como varía el tamaño del grano a medida que se distancia del centro. Cuando se aumenta a 500X se observa en las **Figuras O y P** el grano fino generado por la recristalización de hacer al carbono.

### 3.2.5.7 Probeta 4EF

Esta muestra fue realizada con una velocidad de 4200 rpm un tiempo de calentamiento de 9,6 segundos y con 85 y 600 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en el material base). La **Figura Q** con aumento de 100X sin

ataque químico, muestra una muy buena unión en la interfase de soldadura y mezcla mecánica en forma de elipse, la **Figura R** al igual que la figura Q permite apreciar cómo se mezclan mecánicamente los materiales aparte de mostrar gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono. Luego del ataque químico, las **Figuras S y T**, permiten apreciar la unión de los materiales, mezcla mecánica y el grano fino producido por la recristalización en el acero al carbono. Cuando se aumenta a 500X (**Figuras U y V**) se observa la mezcla de materiales con una gran claridad, se nota las diferentes microestructuras de ambos metales y en el caso del acero al carbono el grano fino anteriormente descrito.

### **3.2.5.8 Probeta 5EF**

Esta probeta se obtuvo al usar la velocidad de 4200 rpm, tiempo de calentamiento de 9,06 segundos y con 85 y 500 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en la junta soldada). La **Figura W** muestra una discontinuidad de gran tamaño en la interfase de soldadura y en la **Figura X** también se observa claramente dos grietas en la unión, ambas figuras fueron obtenidas con 100X de aumento y sin ataque químico. Luego del ataque químico se puede observar que la unión parece estar correcta, pero se notan varios espacios en la zona de la unión tanto en la **Figura Y** como en la **Figura Z** además de mostrar la variación de los granos de acuerdo a como se van distanciando del centro, también en ambas figuras, se aprecia claramente la dirección en la que fluye el acero inoxidable. Al aumentar a 500X (**Figura AA**) se aprecia claramente la zona de la unión, y se puede diferenciar un traslape del acero inoxidable sobre el acero al carbono sin mezclarse.

### **3.2.5.9 Probeta 6EF**

Para obtener esta muestra se trabajó con una velocidad de 4200 rpm un tiempo de calentamiento de 9,2 segundos y con 85 y 750 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en el material base). La **Figura AB** muestra una correcta unión en la interfase de soldadura, con cierta mezcla de material y gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono, de igual forma la **Figura AC** también muestra mezcla de materiales y también permite apreciar un gran número de inclusiones en el acero al carbono, ambas figuras fueron obtenidas con aumento de 100x sin ataque químico. Luego del ataque químico y con aumento de 100X, las **Figuras AD y AE**, permiten observar la excelente unión de los metales y la mezcla mecánica de los mismos, además de la variación del grano de acero al carbono que va de ser muy fino en la zona de la junta y se va haciendo más grueso cuando aumenta la distancia desde el centro. Cuando se aumenta a 500X (**Figuras AF y AG**), estas permiten apreciar que no existen

defectos en la interfase de soldadura y también lo fino que es el grano del acero al carbono producto de la recristalización.

#### **3.2.5.10 Probeta 7EF**

Con 9,8 segundos de tiempo de calentamiento, velocidad de 4900 rpm y con 85 y 850 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente, se soldó esta muestra que presentó su falla en el material base. Las micrografías de las **Figuras AH y AI**, muestran una unión consolidada en la interfase de soldadura sin ningún tipo de defecto y se aprecia claramente la mezcla mecánica de los materiales, ambas figuras fueron obtenidas con aumento de 100X y sin ataque químico. Luego del ataque químico en las **Figuras AJ y AK** muestran la unión perfecta de los materiales, no hay defectos y se nota la mezcla de los mismos, además se observa la dirección en la que fluye el acero inoxidable de igual forma que se observó en la probeta 5EF. En la **Figura AL** se observa la zona en la que se produce la rebaba, se aprecia que la unión es tan fuerte que el acero inoxidable permanece junto al acero al carbono incluso después de que se genera la rebaba, las micrografías de estas tres figuras fueron obtenidas con aumento de 100Xs. Cuando se aumenta a 500X se puede apreciar una correcta unión y el grano fino que se ha venido presentando hasta ahora.

#### **3.2.5.11 Probeta 8EF**

Esta muestra fue obtenida con una velocidad de 4900 rpm un tiempo de calentamiento de 7,5 segundos y con 85 y 750 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente la misma que presentó su falla en el material base. Las micrografías de las **Figuras AN y AÑ**, muestran una unión consolidada sin ningún defecto presente, se observan también gran cantidad de inclusiones en el acero al carbono, estas micrografías fueron obtenidas con aumento de 100X y sin ataque químico. Luego del ataque químico en las **Figuras AO y AP**, se ve la interfase de la soldadura sin discontinuidades y los granos refinados del acero al carbono y de igual forma la dirección en la que fluye el acero inoxidable como ya se observó en probetas anteriores, estas micrografías fueron obtenidas con aumento de 100X. Al aumentar a 500X (**Figuras AQ y AR**) se puede observar el refinamiento de los granos del acero al carbono debido a la recristalización.

#### **3.2.5.12 Probeta 9EF**

Para la última junta soldada se trabajó con una velocidad de 4900 rpm un tiempo de calentamiento de 5 segundos y con 85 y 600 Kgf para las fuerzas de calentamiento y forja respectivamente (falla en el material base). La micrografía de la **Figura AS** muestra una discontinuidad de un tamaño considerable, pero también se observa mezcla



metálica de los materiales, la **Figura AT** muestra una mezcla aún más notoria y sin defectos en la interfase de la unión, ambas micrografías fueron obtenidas con aumento de 100X y sin ataque químico. Luego del ataque químico y con un aumento de 100X (**Figuras AU y AV**), se observa la unión sin defectos, pero lo interesante de estas micrografías está en que no se observa un refinamiento de grano en el acero al carbono, esto probablemente debido a que el tiempo de calentamiento fue el menor de todas las probetas ensayadas y no se produjo una recristalización. Lo anteriormente dicho se nota de una mejor forma en las **Figuras AW y AX**, en las que se observa que los granos no son tan finos como en las ocho primeras probetas.

### **3.2.6 Análisis comparativo entre el proceso de soldadura por fricción (FRW) y el proceso SMAW**

El motivo por el cual se realiza esta comparación se basa en la necesidad de conocer el comportamiento de una junta soldada de materiales disímiles, que en este caso son representados por el acero al carbono y el acero inoxidable. Si bien los procesos de soldadura comparados se fundamentan en principios físicos diferentes, no está demás poder determinar si en ambos, los resultados son similares en cuanto a un comportamiento mecánico se refiere, ya que al realizar lo anteriormente descrito se puede presentar una nueva alternativa en ciertas aplicaciones.

Esta comparación se hará con respecto al estudio realizado por el Instituto Mexicano del Transporte denominado “Determinación de la soldabilidad entre un acero inoxidable austenítico y un acero al carbono para aplicaciones estructurales” de Pérez, y otros (2014). Dicha comparación estará enfocada en el proceso, es decir, las variables que se deben controlar, la facilidad de ejecutar el proceso y los resultados obtenidos.

Existen varias similitudes entre lo que se ha desarrollado en este proyecto y el trabajo previamente nombrado. Para empezar los materiales utilizados, se unen aceros disímiles (inoxidable y al carbono), pero se difieren en la selección del acero al carbono ya que, Pérez, y otros usa acero al carbono ASTM A615 y en este proyecto se usa acero al carbono AISI 1018.

Ahora, la preparación de las probetas para el proceso, es el punto en el cuál se notan más cambios, mientras que para el proceso de soldadura por fricción basta con realizar el corte a medida de las probetas y luego aplanar una de sus caras (refrentado o esmerilado), si se emplea el proceso SMAW a parte del corte, se debe seleccionar y prepara el bisel y además limpiar los metales base,

Para realizar la soldadura en sí, los procesos varían considerablemente. En la soldadura por fricción se debe controlar la velocidad de rotación, el tiempo de calentamiento y la fuerza de forja. Si se emplea la soldadura SMAW, para empezar, se debe seleccionar el metal de aporte (electrodo) de acuerdo a lo que se va a unir y se debe proteger al mismo de condiciones climáticas como la humedad, que puede ocasionar una soldadura con imperfecciones. Luego se debe determinar el número de pasadas que serán necesarias, el voltaje y amperaje, la velocidad de viaje y el calor de entrada (tabla 3.19) y sobre todo para el proceso SMAW es indispensable el factor humano, ya que es un proceso manual, este último parámetro no es de vital importancia en la soldadura por fricción debido a que es un proceso que puede ser automatizado.

Tabla 3. 19. Parámetros de soldadura SMAW.

PARÁMETRO	VALOR
Número de pasadas	1
Diámetro del electrodo [mm]	3,2
Voltaje [V]	22
Corriente [A] CD-PI	90-95
Velocidad de viaje [mm/min]	45
Calor de entrada [KJ/mm]	2,5

(Pérez, y otros, 2014)

Entonces la soldadura por fricción permite obtener una unión de una forma más simple y sin tener que controlar un mayor número de variables.

En cuanto a lo que tiene que ver con los ensayos de tracción de las probetas soldadas, se tiene el mismo tipo de fractura (dúctil de copa y cono) en los dos estudios como lo muestra la figura 3.28, y además se coincide en que dichas fracturas se presentaron en el acero al carbono.

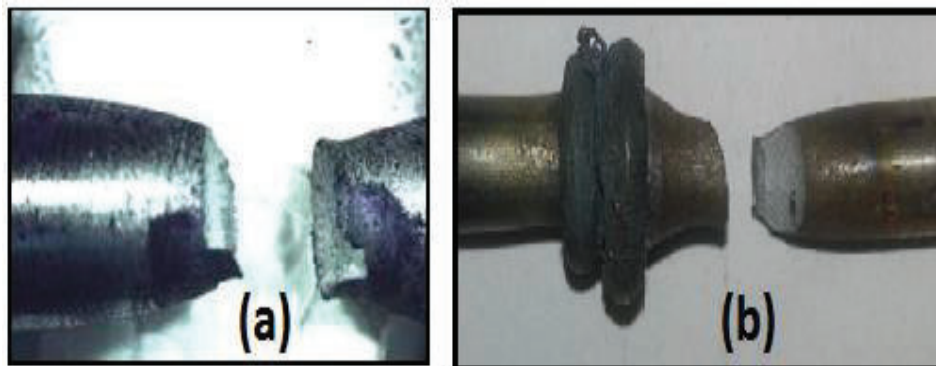


Figura 3. 28. Probetas ensayadas (a)Soldadura SMAW (b)Soldadura por fricción.

(Pérez, y otros, 2014)

En la tabla 3.20 y la figura 3.29 se muestran los valores tanto de las pruebas de tensión realizadas para en proceso SMAW como para el proceso de fricción

Tabla 3. 20. Comparación de esfuerzos promedio de tracción entre procesos SMAW y FRW .

Soldadura SMAW			Soldadura por Fricción		
Esfuerzo de tracción [MPa]	Límite de fluencia [MPa]	% Elongación en 50 mm	Esfuerzo de tracción [MPa]	Límite de fluencia [MPa]	% Elongación en 50 mm
<b>Acero al carbono ASTM A615</b>			<b>Acero al carbono AISI 1018</b>		
553,33	369,52	18,44	804,21	97,66	9,07
<b>Acero Inoxidable AISI 304</b>			<b>Acero Inoxidable AISI 304</b>		
776,67	635,05	27,28	894,1	110,7	21,2
<b>Junta soldada</b>			<b>Junta soldada</b>		
572,56			796,8		

(Pérez, y otros, 2014)

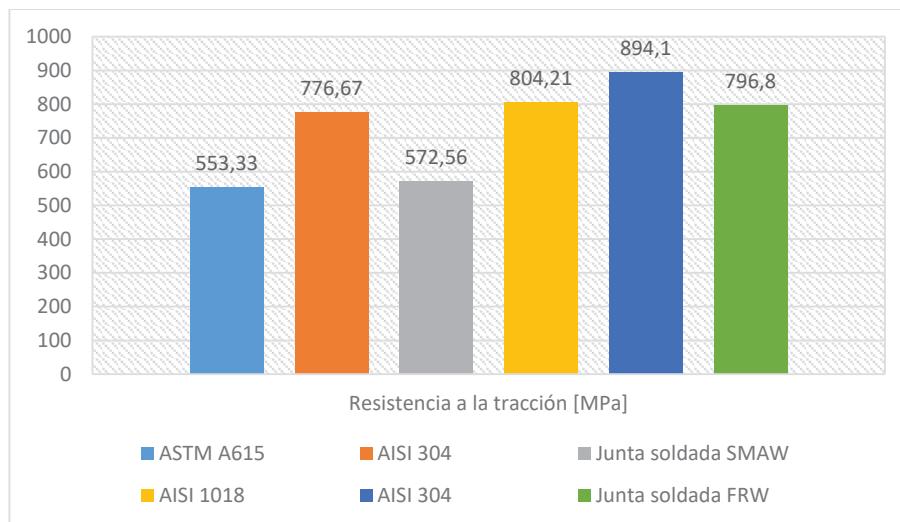


Figura 3. 29. Comparación de resistencia a la tracción entre procesos.

(Fuente Propia, 2017)

Se puede decir que las soldaduras se comportan de manera similar, en ambos casos la falla se produce en la cercanía a los valores límite de los materiales base menos resistentes (aceros al carbono), además se observa que el acero inoxidable utilizado para realizar este proyecto tiene una mayor calidad con respecto a su par usado en el estudio con soldadura SMAW.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- La soldadura por fricción es un proceso muy práctico, pero no muy difundido, los parámetros que se deben controlar para obtener una soldadura correcta, son menores en comparación con otros procesos, además, si se tienen los equipos adecuados, el factor humano tiene una mínima influencia sobre los resultados que se desean obtener.
- En el desarrollo de este proyecto, se logró unir acero al carbono AISI 1018 con acero inoxidable AISI 304, a partir de experimentación y de variar los diferentes parámetros de soldadura hasta hallar el punto óptimo en el cual, la coalescencia de ambos materiales es segura y efectiva. Esto se logró a pesar de las limitaciones propias de la máquina utilizada.
- Mediante la experimentación se logró determinar la relación existente entre las distintas variables del proceso y cuál es su influencia sobre la soldadura final, a partir de dicha experimentación se determinan los valores ideales con los cuales se puede obtener una soldadura eficiente que cumpla con los requerimientos de calidad y que a su vez sea económica y con un mínimo desperdicio.
- Las altas velocidades favorecen una correcta unión además que ayudan a disminuir el tiempo necesario para llevar a cabo la soldadura. La unión soldada que se puede considerar tiene las mejores características de todas las que se realizaron en el presente proyecto es la que se logra utilizando los siguientes parámetros: velocidad de rotación de 4900 RPM, fuerza de calentamiento de 85 Kgf, fuerza de forja de 650 Kgf y tiempo de calentamiento de 5 segundos; se seleccionó esta probeta porque a pesar de que hubo otras probetas que tuvieron similares características, la antes mencionada presenta un encogimiento axial menor que se traduce en un ahorro de material y por ende en costos de producción.
- Todas las variables que intervienen en el proceso de soldadura por fricción (fuerzas de calentamiento y forja, tiempo de calentamiento, encogimiento axial), están íntimamente relacionadas entre sí, no se puede relacionar 2 de estas sin que una tercera influya directamente, es decir, no se puede concluir que, si se tiene una alta fuerza de forja, se tendrá un gran encogimiento axial. Por ejemplo, al aplicar una fuerza de forja de gran magnitud y un tiempo elevado de calentamiento, se obtendrá un encogimiento axial elevado, pero si se ejerce la misma fuerza de forja con un tiempo corto, el encogimiento axial será mucho

menor. Razón por la cual, si se desea obtener buenos resultados, se deben considerar todos los parámetros conjuntamente.

- El tiempo de calentamiento es la variable que más influye sobre la deformación de los materiales, si es muy bajo, esta deformación no es suficiente como para lograr una coalescencia óptima, en cambio que si llega a valores muy elevados se producirá una deformación que ayudará a unir mejor los materiales pero que, al mismo tiempo generará un desperdicio mucho mayor.
- Al usar bajas velocidades no se obtienen uniones de calidad ya que se necesita un mayor tiempo de calentamiento para llegar a una deformación adecuada de los materiales y la aplicación de fuerzas de forja más grandes, esto genera un mayor uso de recursos tanto energéticos como de materia prima.
- El análisis metalográfico, permite observar que las uniones de las probetas que no fallaron, presentaron coalescencia en toda la unión y mezcla mecánica de los materiales utilizados, no se observa la presencia de compuestos intermetálicos que a su vez le otorgaron más fortaleza a la soldadura. En cambio, en las probetas que fallaron en la junta soldada, se pudo apreciar varias discontinuidades en la unión como grietas y falta de coalescencia, provocadas por la insuficiente fuerza aplicada y un deficiente calentamiento, además en una de estas probetas se observó que el acero inoxidable se “montó” sobre el acero al carbono sin provocar una mezcla mecánica.
- La microestructura más afectada por el proceso, fue obviamente la del acero de bajo carbono, ya que el calor generado en la unión, hace que se produzca una recristalización completa en el mismo y esto produce la presencia de granos mucho más finos que en el material base no afectado, este refinamiento de los granos sufre una disminución gradual de acuerdo a como se vaya alejando del centro de la junta soldada. El fenómeno de recristalización está estrechamente relacionado con el tiempo de calentamiento, se dice esto porque en una junta soldada con un tiempo de calentamiento relativamente corto, dicho fenómeno no se observa.
- Al comparar los resultados de los procesos de soldadura por fricción y SMAW, se puede concluir que, se tienen resultados muy parecidos, y las soldaduras son confiables, pero el proceso de soldadura por fricción con los equipos adecuados es más fácil de controlar y automatizar, por lo que también hace que sea muy útil al momento que se necesite producción en serie y de altos volúmenes.

## 4.2 Recomendaciones

- Para mejorar el estudio de la soldabilidad de aceros disímiles, sería interesante poder estudiar las características de las uniones variando los diámetros, determinar cuál es su influencia sobre la soldadura y si los resultados son tan positivos como los que se obtuvieron en este proyecto.
- No es recomendable tener altos valores del tiempo de calentamiento, ya que, se deberá aplicar una fuerza de calentamiento que deba ir incrementando su valor, ya que los materiales se deforman y se despegan por ende la fricción entre ellos se perderá generando un encogimiento axial mucho mayor.
- Para que el proceso de soldadura tenga mejores resultados es recomendable realizar un tratamiento térmico que ayude a los materiales base a recomponer su microestructura.
- Se ha comprobado que el proceso de soldadura por fricción es confiable y equiparable con otros, con sus ventajas y limitaciones, razón por la cual se recomienda elaborar una práctica para dar a conocer este proceso a los estudiantes de ingeniería, ya que su campo de aplicación es muy amplio y es necesario tener un mayor conocimiento acerca del mismo.
- Sería adecuado, a partir de este trabajo, realizar un análisis del comportamiento de la soldadura cuando existe corrosión, ya que debido a las características de los materiales empleados su aplicabilidad en ambientes altamente dañinos puede ser de gran utilidad.

## Referencias Bibliográficas

- [1] AAENDE. (2017). Obtenido de <http://www.aaende.org.ar/sitio/certificacion.html>
- [2] Almeida Robalino, M. (1989). Soldadura por fricción de materiales disímiles. Quito, Ecuador.
- [3] Aminul, I., Tahrim, A., Adel, M., & Akram Alfantazi. (2014). Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel. *WEAR*.
- [4] Aquize Luna, M. (2011). *Introducción a los ensayos no destructivos*. Arequipa.
- [5] Arguello, Á. (1987). Diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción. Quito, Ecuador.
- [6] Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F: Cengage.
- [7] Attallah, M., & Preuss, M. (2012). *Inertia friction welding (IFW) for aerospace*. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited.
- [8] Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw Hill.
- [9] Callister, W. D. (2005). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: Reverté.
- [10] Castillo, A., Díaz, M., & Tercero, H. (2014). Aceros de alto carbono. Tapachula, México.
- [11] Chimarro, G., & Malitaxi, J. (Marzo de 2016). Comparación entre los métodos de ultrasonido y radiografía industrial para la interpretación y evaluación de discontinuidades en juntas soldadas con bisel tipo V y procesos SMAW según norma AWS D1.1. Quito, Ecuador.
- [12] Construmática. (s.f.). Obtenido de <http://www.construmatica.com/construpedia/Acero>
- [13] Ebah. (2003). Obtenido de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgbTEAK/solidificacao-acos-inoxidaveis>
- [14] E-ducativa. (2014). Obtenido de [http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/11\\_ensayo\\_de\\_traccin.html](http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/11_ensayo_de_traccin.html)

- [15] Endases. (2016). Obtenido de [http://endases.mex.tl/photo\\_26975\\_L-QUIDOS-PENETRANTES.html](http://endases.mex.tl/photo_26975_L-QUIDOS-PENETRANTES.html)
- [16] Endicsa. (2011). Obtenido de [http://www.endicsa.com.ar/site/index.php/servicios/?option=com\\_content&view=article&id=79](http://www.endicsa.com.ar/site/index.php/servicios/?option=com_content&view=article&id=79)
- [17] Exámen Metalográfico. (2010).
- [18] Fabricación Mecánica. (s.f.). *Cifpaviles*. Obtenido de <http://cifpaviles.webcindario.com/SAN-SOLDADURA%20POR%20RESISTENCIA.pdf>
- [19] Fuente Propia. (2017). Quito, Ecuador.
- [20] Fuente, P. (2017). Según AWS A3.0:2010. Quito, Ecuador.
- [21] Fundición, L. d. (2017). *Informe Técnico*. Quito.
- [22] Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México, DF: McGraw Hill.
- [23] Ilogsa. (2015). Obtenido de [http://www.ilogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed\\_166.php](http://www.ilogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed_166.php)
- [24] Ingemecanica. (2007). Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn45.html>
- [25] Inspección magnética y ultrasónica. (2010). Obtenido de <http://inspeccionmagneticayultrasonica.blogspot.com/2010/03/end-inspeccion-por-ultrasonido.html>
- [26] Introducción a los ensayos no destructivos. (s.f.).
- [27] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México, DF: Pearson Educación.
- [28] LAEV. (2017). *Informe Técnico*. Quito.
- [29] Laufgang, S. G. (07 de 07 de 2003). Aceros Inoxidables.
- [30] Lincango, M. J., & Viteri, P. A. (Mayo de 2016). SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA. Quito, Ecuador.
- [31] Lippold, J., & Kotecki, D. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. New Jersey: John Wiley & sons, Inc.



- [32] Mateo, A. (2014). On the feasibility of BLISK produced by linear friction welding. *Revista de Metalurgia*.
- [33] Metalografía Insitu. (26 de Septiembre de 2016). Obtenido de <http://metalografiainsitu.blogspot.com/2016/09/acero-inoxidable-austenitico.html>
- [34] Oerlikon. (2012). Manual de Soldadura & Catálogo de productos. Lima, Perú.
- [35] Padilha, A. F., & Rios, P. R. (2002). Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels. *ISIJ International*, 325.
- [36] Pérez, J., Terán, J., Guzmán, E., Molina, W., Belmonte, M., Acosta, A., & Madrid, M. (2014). Determinación de la soldabilidad entre un acero inoxidable austenítico y un acero al carbono para aplicaciones estructurales. Sanfandila, México: Instituto mexicano del transporte.
- [37] PND Soluciones Integrales. (2016). Obtenido de <http://pndsolucionesintegrales.com.mx/inspeccion-visual-2/>
- [38] Revista Virtual Pro. (2016). Obtenido de <https://www.revistavirtualpro.com/revista/metodos-de-soldadura-segunda-entrega/23>
- [39] Rombaut, P. (2010). *Joining of dissimilar materials through rotary friction welding*. Gante.
- [40] Ruiz Martínez, P. (2015). Fases que integran el análisis metalográfico. México.
- [41] Ruiz, A. (2011). Ensayo Visual. México. Obtenido de [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/8.\\_FUNDAMENTO-ESTRUCTURAS\\_METALURGICAS.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/8._FUNDAMENTO-ESTRUCTURAS_METALURGICAS.pdf)
- [42] Shopfloor. (s.f.). Obtenido de <http://shopfloorps.blogspot.com/2010/08/electrode-for-spot-welding.html>
- [43] Soldar en la industria. (2009). Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de <https://soldaduraenlaindustria.wikispaces.com/La+soldadura>
- [44] Soldargen. (31 de Julio de 2015). Obtenido de <http://soldargen.blogspot.com/2015/07/soldabilidad-de-materiales-disimiles.html>
- [45] Solucoes Industriais. (2017). Obtenido de <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e->

equipamentos/intermetric/productos/accesorios/maquina-de-ensaio-universal-  
emic-

[46] Struers. (2017). Obtenido de <http://www.struers.com/es-ES/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-consumables>

[47] Thompson Friction Welding. (2014). Obtenido de <http://es.thompson-friction-welding.com/soluciones-de-soldadura-por-friccion/soluciones-de-proceso/soldadura-por-friccion-lineal>

[48] Uskut, M., Unlu, B., Yilmaz, S., & Akdag, M. (s.f.). *Friction Welding And Its Applications In Today's World*.

[49] Wordpress. (2014). Obtenido de <https://nandovilla.wordpress.com/2014/02/04/>

## Anexos

# ANEXO I

## INFORME TÉCNICO DE PROBETAS ENSAYADAS EN LA RELACIÓN DE PARÁMETROS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

### INFORME TÉCNICO

LAEV – ABR.17.16.0

Quito, 25 de abril de 2017

**TRABAJO SOLICITADO POR:** M.Sc. María Verónica Sotomayor Grijalva  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en juntas soldadas pertenecientes al señor Jaime Oswaldo Chávez Sarango para el desarrollo del trabajo de titulación “ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE UN ACERO INOXIDABLE Y UN ACERO AL CARBONO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN”. Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

#### RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Seis (6) probetas de junta soldada para ensayo de tracción y seis (6) probetas de juntas soldadas para ensayo de flexión.

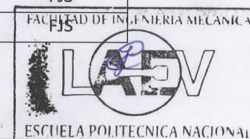
#### 2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados a las juntas soldadas.

Tabla 1. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Diámetro nominal	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observaciones
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
1'	6,25	3.750	16.681	78,9	544	FJS
2'	6,25	2.350	10.453	49,4	341	FJS
5'	6,25	2.900	12.900	61,0	420	FJS
7'	6,25	1.700	7.562	35,7	246	FJS
8'	6,25	1.675	7.451	35,2	243	FJS
12'	6,25	4.025	17.904	84,6	584	FJS

\* FJS: Falla en la junta soldada.

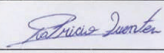
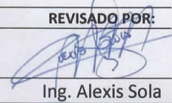



### 3. ENSAYO DE FLEXIÓN DE JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 2 se muestran los resultados de carga obtenidos en el ensayo de flexión. La distancia entre apoyos es de 150 mm.

Tabla 2. Resultados del ensayo de flexión.

Id.	Diámetro nominal	Carga máxima registrada		Resistencia a la flexión	
	mm	lbf	N	ksi	MPa
1'	6,25	45	200	45	313
2'	6,25	48	211	48	331
4'	6,25	23	100	23	157
7'	6,25	35	156	35	244
10'	6,25	148	656	149	1.027
14'	6,25	210	934	212	1.461

	ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<b>Firma:</b>			
<b>Nombre:</b>	Ing. Patricio Fuentes	Ing. Alexis Sola	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.
<b>Cargo:</b>	ASISTENTE	ESPECIALISTA	JEFE (E)

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES





# ANEXO II

## INFORME TÉCNICO DE PROBETAS ENSAYADAS EN LA EXPERIMENTACIÓN FINAL



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

### INFORME TÉCNICO

LAEV – MAY.17.03.0

Quito, 5 de mayo de 2017

**TRABAJO SOLICITADO POR:** M. Sc. María Verónica Sotomayor Grijalva  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras metálicas pertenecientes al señor Jaime Oswaldo Chávez Sarango para el desarrollo del trabajo de titulación "ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE UN ACERO INOXIDABLE Y UN ACERO AL CARBONO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

#### RESULTADOS

**1. MUESTRAS:** Nueve (9) probetas de junta soldada y seis (6) probetas de material base para ensayo de tracción.

#### 2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados a las juntas soldadas.

Tabla 1. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Diámetro nominal	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
JS-1	6,25	4.200	18.683	88,3	609	FJS
JS-2	6,25	4.125	18.349	86,9	599	FJS
JS-3	6,25	5.000	22.241	105,3	726	FJS
JS-4	6,24	5.375	23.909	113,6	783	FMB
JS-5	6,26	5.700	25.355	119,7	825	FJS
JS-6	6,23	5.475	24.354	115,9	799	FMB
JS-7	6,22	5.475	24.354	116,2	801	FMB
JS-8	6,24	5.500	24.465	116,2	801	FMB
JS-9	6,22	5.475	24.354	116,2	801	FMB

\* FJS: Falla en la junta soldada.  
\* FMB: Falla en el material base





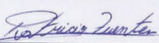


### 3. ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE

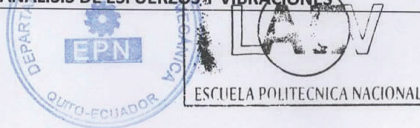
En la tabla 2 se muestran los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción al material base.

Id.	Diámetro nominal	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
AC-1	6,23	5.520	24.554	99,6	686,7	116,8	805,5	8,4
AC-2	6,24	5.580	24.821	96,6	666,0	117,7	811,6	9,0
AC-3	6,24	5.540	24.643	96,8	667	116,9	806	9,8
INOX-1	6,25	6.190	27.534	112,8	778	130,2	897	19,1
INOX-2	6,24	6.130	27.268	109,3	754	129,3	892	24,5
INOX-3	6,26	6.180	27.490	110,0	758	129,5	893	20,0

Las curvas de esfuerzo vs. porcentaje de deformación se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en la curva corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

	ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<b>Firma:</b>			
<b>Nombre:</b>	Ing. Patricio Fuentes	Ing. Alexis Sola	Ing. Jonathan Castro. M.Sc.
<b>Cargo:</b>	ASISTENTE	ESPECIALISTA	JEFE (E)
<b>LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES</b>			



ANEXO

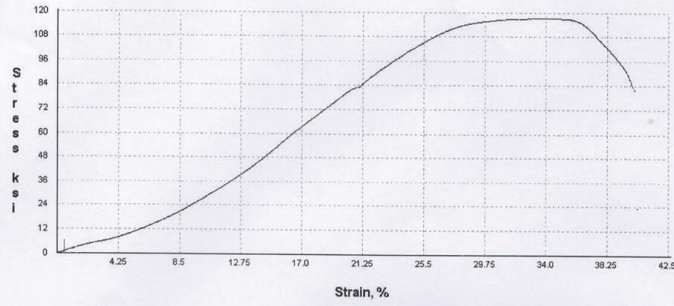


Figura 1. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta AC-1.

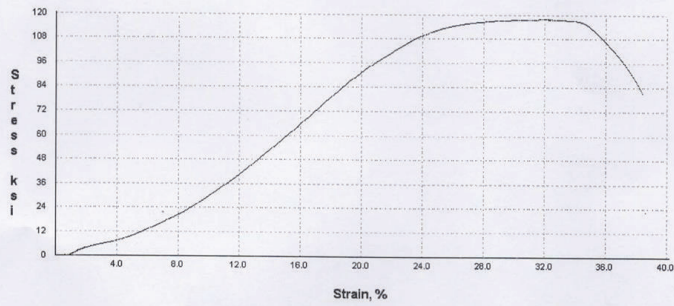


Figura 2. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta AC-2.

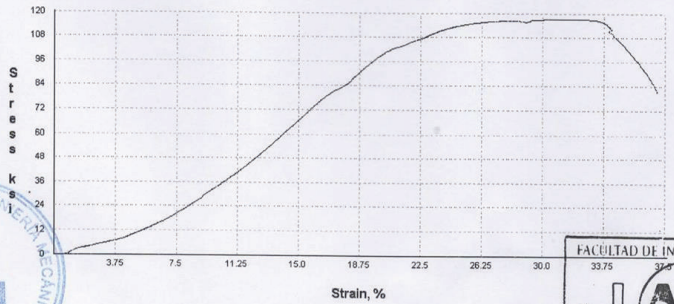
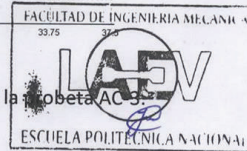


Figura 3. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta AC-3.



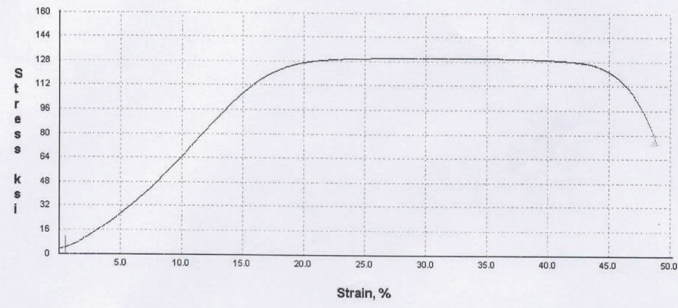


Figura 4. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta INOX-1.

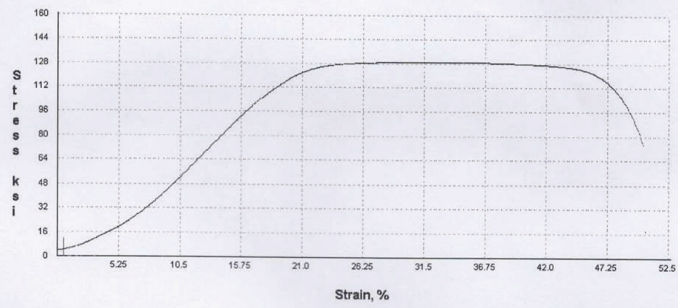


Figura 5. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta INOX-2.

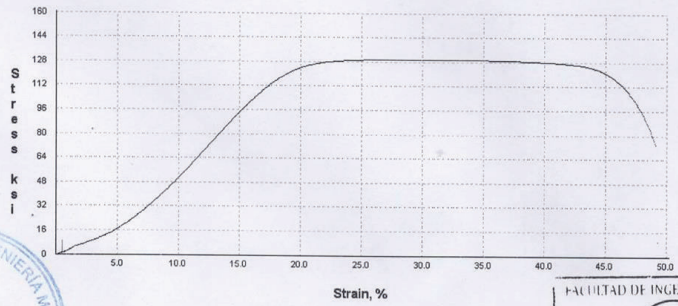


Figura 6. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta LAEV.



LAEV-EPN



Página 4 de 4



# ANEXO III

## INFORME DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MATERIALES BASE



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES  
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



### INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Sr. Chavez / Ing. Verónica Sotomayor

Orden de Trabajo: LF006

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 31 de mayo del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Francisco Montalvo

Descripción: Probetas de acero

#### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional cuatro probetas sueltas.

Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas

#### 2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta
Probetas de acero	Ac 1
	Ac 2



#### 3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION según la norma ASTM E415. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

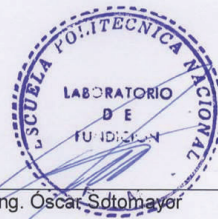
X



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES  
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



		Muestra	
		Ac1	Ac2
Elemento		Valor [%]	Valor [%]
Carbono	C	0,209	0,116
Silicio	Si	0,22	0,412
Manganeso	Mn	0,809	1,495
Fósforo	P	0,034	0,069
Azufre	S	0,0089	0,015
Cromo	Cr	0,012	14,67
Molibdeno	Mo	-	0,231
Niquel	Ni	0,015	9,358
Hierro	Fe	98,67	73,01



Ing. Francisco Montalvo

Técnico Responsable



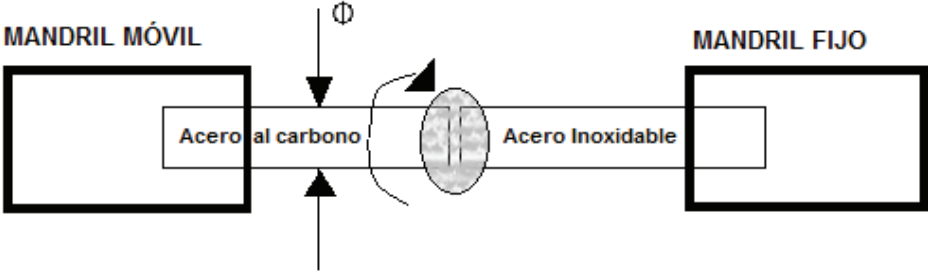
Ing. Oscar Sotomayer

Jefe del Laboratorio de  
Fundición.



## ANEXO IV

### ESPECIFICACIONES DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

	<b>ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE UN ACERO AL CARBONO Y UN ACERO INOXIDABLE POR EL MÉTODO DE SOLDADURA POR FRICIÓN</b>		
<b>ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)</b>			
<b>Elaborado por: Jaime O. Chávez S.</b>			
<b>Institución</b>	Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica	<b>Fecha</b>	
<b>Revisión No.</b>	1	12/5/2017	
<b>ESQUEMA DE LA JUNTA</b>			
			
<b>TIPO Y PROCESO DE SOLDADURA</b>		<b>JUNTA UTILIZADA</b>	
<b>PROCESO</b>	FRW	<b>TIPO</b>	A TOPE
<b>TIPO</b>	MANUAL	<b>RESPALDO</b>	NINGUNO
	SEMIAUTOMÁTICA	<b>SEPARACIÓN</b>	3mm
	AUTOMÁTICA	<b>PREPARACIÓN</b>	PULIDO SUPERFICIAL
<b>MATERIAL DE APORTE</b>	NINGUNO	<b>LIMPIEZA</b>	SI
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b>	NINGUNO	<b>PARÁMETROS PRINCIPALES</b>	
<b>MATERIALES BASE</b>		<b>VELOCIDAD DE ROTACIÓN [RPM]</b>	4900
<b>GRUPO</b>	ACEROS	<b>FUERZA DE CALENTAMIENTO [Kgf]</b>	85
<b>TIPO</b>	AL CARBONO E INOXIDABLE	<b>FUERZA DE FORJA [Kgf]</b>	650
<b>DIÁMETRO [mm]</b>	6.25	<b>TIEMPO DE CALENTAMIENTO [s]</b>	5
<b>OBSERVACIONES</b>			
<b>REALIZADO POR</b>		<b>APROBADO POR</b>	
Jaime Chávez		Ing. Gabriel Velasteguí	

## **ORDEN DE EMPASTADO**

(Fuente, 2017)