



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN UNA  
SOLDADURA DISÍMIL (ACERO DÚPLEX Y ACERO  
INOXIDABLE 304) MEDIANTE EL PROCESO TIG.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA  
REGINA LUCÍA CORTÉS BALCAZAR**



**CDMX**

**2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

PRESIDENTE: GERARDO ARÁMBURO PÉREZ



VOCAL: JOSÉ FERNANDO FLORES ÁLVAREZ



SECRETARIO: OSVALDO FLORES CEDILLO



1er. SUPLENTE: JUAN CARLOS CONTRERAS GUZMAN

2º SUPLENTE: AGUSTIN RUIZ RAMIREZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLA EL TEMA:**

FACULTAD DE QUÍMICA. CONJUNTO D, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA.

**ASESOR DEL TEMA**



---

GERARDO ARÁMBURO PÉREZ

**SUSTENTANTE**



---

REGINA LUCÍA CORTÉS BALCAZAR

## Índice

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
OBJETIVO GENERAL.....	9
OBJETIVOS PARTICULARES .....	9
<b>CAPITULO I. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 ACERO INOXIDABLE .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 ACERO 304 .....	10
1.1.2 ACERO DÚPLEX.....	12
<b>1.2 PROCESO DE SOLDADURA.....</b>	<b>15</b>
1.2.1 SOLDADURA DISÍMIL .....	15
1.2.2 PROCESO DE SOLDADURA TIG.....	15
1.2.3 GASES DE PROTECCIÓN.....	16
1.2.4 TIPO DE CORRIENTE ELÉCTRICA.....	18
<b>1.3 CARACTERIZACIÓN .....</b>	<b>18</b>
1.3.1 ANÁLISIS MACROSCÓPICO .....	18
1.3.2 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	18
1.3.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) .....	19
1.3.4 ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSA (EDS) .....	19
<b>1.4 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) .....</b>	<b>19</b>
1.4.1 INSPECCIÓN VISUAL .....	19
1.4.2 LÍQUIDOS PENETRANTES .....	20
<b>1.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>20</b>
1.5.1 ENSAYO DE TENSIÓN .....	20
1.5.2 DUREZA .....	22
<b>1.6 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....</b>	<b>22</b>
1.6.1 EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL .....	23
1.6.2 POTENCIAL DE CORROSIÓN A CIRCUITO ABIERTO (E vs T).....	24
1.6.3 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN .....	24
<b>CAPITULO II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 PROBETAS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 PROCESO DE SOLDADURA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>27</b>
2.3.1 INSPECCIÓN VISUAL .....	27
2.3.2 LÍQUIDOS PENETRANTES .....	27
<b>2.4 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA.....</b>	<b>27</b>
2.4.1 ANÁLISIS MACROSCÓPICO .....	27
2.4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	29
2.4.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	30

2.4.4 ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSA (EDS) .....	30
<b>2.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>30</b>
2.5.1 TENSIÓN.....	30
2.5.2 MICRO DUREZA .....	30
2.5.3 MACRO DUREZA .....	30
<b>2.6 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....</b>	<b>31</b>
<b><u>CAPITULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....</u></b>	<b><u>32</u></b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DE METALES BASE.....	32
3.2 INSPECCIÓN VISUAL.....	33
3.3 PRUEBA DE LÍQUIDOS PENETRANTES .....	34
3.4 ANÁLISIS MACROSCÓPICO.....	35
3.5 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	37
3.6 MICROSCOPIA DE BARRIDO ELECTRÓNICO (MEB). ....	41
3.7 ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSA (EDS).....	42
3.8 ENSAYO DE TENSIÓN .....	44
3.9 MICRO DUREZA .....	46
3.10 MACRO DUREZA.....	48
3.13 CURVAS POTENCIAL – TIEMPO. ....	49
3.12 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN (Rp) .....	50
3.11 CURVAS DE POLARIZACIÓN .....	50
<b><u>CAPITULO IV. CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>52</u></b>
4.1 CONCLUSIONES PARTICULARES .....	52
4.2 CONCLUSIÓN GENERAL .....	52
<b><u>CAPÍTULO V. BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>54</u></b>

TABLA 1. GENERALIDADES DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS .....	10
TABLA 2. COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES TÍPICAS DEL ACERO INOXIDABLE 304 [21].....	11
TABLA 3. COMPOSICIONES TÍPICAS DE ACEROS DÚPLEX [3]. .....	13
TABLA 4. FASES PRESENTES EN ACEROS DÚPLEX [5,6].....	14
TABLA 5. GASES DE PROTECCIÓN EMPLEADOS EN LA SOLDADURA TIG.....	17
TABLA 6. PRINCIPALES ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS .....	23
TABLA 7. DIMENSIONES DE LAS PROBETAS EMPLEADAS. ....	25
TABLA 8. CONDICIONES DE SOLDADURA.....	26
TABLA 9. ATAQUE ELECTROQUÍMICO PARA SOLDADURA DISÍMIL. ....	28
TABLA 10. CONDICIONES DE DUREZA HRB EMPLEADAS EN LAS SOLDADURAS.....	31
TABLA 11. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....	31
TABLA 12. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE ENSAYO DE TRACCIÓN CON METALES BASE.....	44
TABLA 13. PERFIL DE DUREZA VICKERS A LO LARGO DE LA SOLDADURA DISÍMIL REALIZADA A 80 Y 100 A. ....	47
TABLA 14. DUREZA ROCKWELL B PARA LA SOLDADURA DISÍMIL REALIZADA A 80 Y 100 A. .....	49
TABLA 15. ICORR Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN OBTENIDAS DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.....	50
TABLA 16. $I_{ORR}$ Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN OBTENIDAS DE LA PRUEBA CURVAS DE POLARIZACIÓN (TAFEL).....	51

FIGURA 1. MICROESTRUCTURA TÍPICA DE UN ACERO INOXIDABLE 304, LA ESTRUCTURA CONSISTE EN GRANOS DE AUSTENITA EQUIAXIADA. [22] .....	11
FIGURA 2. ADICIÓN DE NÍQUEL A UN ACERO INOXIDABLE. EN LA ESTRUCTURA DÚPLEX, LA FERRITA ES LA FASE MÁS OSCURA MIENTAS QUE LA AUSTENITA ES LA CLARA. [3] ...	14
FIGURA 3. ESQUEMA GENERAL DE LA SOLDADURA TIG. 1) BOQUILLA DE GAS. 2) PROTECCIÓN DEL GAS. 3) VARILLA DE APORTE 4) TINA DE FUSIÓN 5) CORDÓN DE SOLDADURA 6) MATERIAL BASE. ....	16
FIGURA 4. EJEMPLO DE MÁQUINA EMPLEADA EN LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TENSIÓN.....	21
FIGURA 5. DIMENSIONES DE PROBETAS RECTANGULARES PARA PRUEBA DE TENSIÓN. ....	21
FIGURA 6. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PENDIENTES DE TAFEL. [28] .....	24
FIGURA 7. PLANTA DE SOLDADURA SYNCROWAVE 250. ....	26
FIGURA 8. FUENTE DE PODER EMPLEADA EN ATAQUE ELECTROQUÍMICO. ....	28
FIGURA 9. MICROSCOPIO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LAS SOLDADURAS.....	29
FIGURA 10. MATERIALES BASE 10X SIN ATAQUE QUÍMICO. A) ACERO DÚPLEX. B) ACERO INOXIDABLE 304. ....	32
FIGURA 11. MATERIALES BASE CON ATAQUE QUÍMICO. A) ACERO DÚPLEX B) ACERO INOXIDABLE 304 .....	33
FIGURA 12. CORDONES DE SOLDADURA, PROBETA EMPLEADA EN EL ENSAYO DE MICRO Y MACRO ESTRUCTURA, DUREZA VICKERS Y HRB. ....	33
FIGURA 13. CORDONES DE SOLDADURA DE LAS PROBETAS DE ENSAYO DE TENSIÓN. ....	33
FIGURA 14. CORDONES DE SOLDADURA EN LAS PROBETAS EMPLEADAS EN PUEBLAS ELECTROQUÍMICAS.....	34
FIGURA 15. ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES A PIEZAS SOLDADAS. A) CORDÓN REALIZADO A 80 A. B) CORDÓN REALIZADO A 100 A. ....	35
FIGURA 16 . SOLDADURA DISÍMIL REALIZADA A 80 A, VISTA EN MICROSCOPIO ESTEREOGRÁFICO. (ZF=ZONA DE FUSIÓN).....	36
FIGURA 17. SOLDADURA DISÍMIL REALIZADA A 100 A, VISTA EN MICROSCOPIO ESTEREOGRÁFICO. (ZF=ZONA DE FUSIÓN).....	37
FIGURA 18. MICROESTRUCTURA DE SOLDADURA DISÍMIL REALIZADA A 80 Y 100 A ÚNICAMENTE CON ATAQUE DE NaOH, 10X.....	38
FIGURA 19. CORDÓN DE SOLDADURA REALIZADO A 80 A, AMBOS ACEROS CON ATAQUE QUÍMICO. MICROSCOPIO ÓPTICO 10X. ....	39
FIGURA 20. CORDÓN DE SOLDADURA REALIZADO A 100 A, AMBOS ACEROS CON ATAQUE QUÍMICO. MICROSCOPIO ÓPTICO 10X. ....	39
FIGURA 21. ZONA AFECTADA POR EL CALOR, SOLDADURA REALIZADA A 80 A. MICROSCOPIO ÓPTICO 10X.....	40
FIGURA 22. ZONA AFECTADA POR EL CALOR, SOLDADURA REALIZADA A 100 A. MICROSCOPIO ÓPTICO 20X.....	41
FIGURA 23. MEB DE SOLDADURAS REALIZADAS A 80 Y 100 A. ....	42
FIGURA 24. ANÁLISIS EDS PARA PROBETA SOLDADA A 80 A. ....	43
FIGURA 25. ANÁLISIS EDS PARA PROBETA SOLDADA A 100 A.....	44
FIGURA 26. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DE LAS PROBETAS SOLDADAS A 80 Y 100 A. ....	45
FIGURA 27. RUPTURA DE LAS PROBETAS DE TENSIÓN SOLDADAS A DISTINTAS CONDICIONES. ....	46

FIGURA 28. HV VS DISTANCIA A LO LARGO DE LA SOLDADURA DISÍMIL A 80 Y 100 A.....	48
FIGURA 29. CURVAS POTENCIAL - TIEMPO DE METALES BASE Y SOLDADURAS REALIZADAS A 80 Y 100 A. ....	49
FIGURA 30. CURVAS DE POLARIZACIÓN OBTENIDAS DE LOS METALES BASE Y SOLDADURAS REALIZADAS A 80 Y 100 A. ....	51

## Introducción

En la actualidad existen distintos procesos de soldadura debido a la gran utilidad que tienen en la industria, uno de los procesos más empleados es la soldadura por arco eléctrico con electrodo no consumible (tungsteno) protegido con gas inerte, también llamado TIG por sus siglas en inglés (Tungsten inert gas). Este proceso de soldadura es bastante amigable con distintos materiales aparte de tener un acabado fino y agradable a la vista. Este proceso también es conocido como:

- GTAW (gas tungsten arc welding, según la norma norteamericana ANSI/AWS)
- Proceso 141 (según la norma UNE EN)
- WIG (wólfram inert gas)

El proceso TIG es aplicable en materiales ferrosos y no ferrosos, este proceso de unión es bastante factible sin material de aporte para espesores que no sobre pasen los 10 mm y para espesores mayores es recomendable usar material de aporte.

El proceso de soldadura TIG en su mayoría es manual y tiene una tasa de defectos menor, comparada con los de otros procesos de soldadura por arco eléctrico, gracias a que la tina de fusión es protegida con gas inerte. Este tipo de soldadura puede contaminarse ya sea por la varilla que se usa como material de aporte, una mala limpieza de los metales base o una mala atmosfera protectora. En general la calidad de la soldadura depende de la combinación de la habilidad del soldador y los materiales a unir, por esto es de suma importancia conocer las características de los materiales a unir.

Este proceso brinda una alta calidad en la soldadura y es posible realizarla en distintas posiciones (soldadura de ranura y de filete en cualquier plano), no requiere fundentes, su resistencia a la corrosión es mayor en comparación con la de otros procesos con electrodos debido a la atmosfera protectora de gas inerte, este tipo de soldadura lleva una limpieza al final sin embargo no es necesario realizarla como en otros procesos de soldadura. Esta soldadura tiene un acabado plano y limpio, es por esto que principalmente es utilizada en las industrias: química, petroquímica y alimenticia.

En la actualidad, principalmente en la industria química es bastante empleada la soldadura disímil ya que es un proceso factible para la unión de distintos materiales. Este tipo de soldadura consta en la unión de dos materiales distintos, preferentemente con características micro estructurales y mecánicas similares o en su defecto, que sean unidas con material de aporte que tenga características en común con los materiales base. La finalidad y el reto de este tipo de soldadura es que al realizar la unión las propiedades mecánicas no se vean afectadas, sino que, permanezcan igual a las de los metales base y en muchos casos, lo que es mejor, que las favorezca. Esto se logra controlando las condiciones con las que se lleva a cabo el proceso de unión, en este caso al realizarla mediante el proceso TIG es importante estar enfocados en la variación de corriente eléctrica, presión y flujo de gas de protección y lo más importante las características micro estructurales de los metales base.

En el presente trabajo se evalúa la influencia de la intensidad de corriente en una soldadura disímil (acero inoxidable 304 y acero inoxidable dúplex) mediante el

proceso TIG. Esto debido a que el paso de la corriente eléctrica genera calor convirtiéndose en una de las principales fuentes de energía; la influencia de esta se verá reflejada en la fusión de los metales, por ende, en su unión y solidificación, impactando en las propiedades microestructurales (fases , morfología, zonas afectadas por el calor) y mecánicas.

Las condiciones de corriente que se evalúan son 80 y 100 A, se realiza un ensayo metalográfico, ensayo de tensión, dureza y pruebas electroquímicas a ambas condiciones, con la finalidad de obtener la corriente óptima para realizar dicha soldadura.

## Objetivos

### Objetivo general

Determinar el efecto que tiene la variación de la corriente eléctrica en el proceso de soldadura TIG sin material de aporte, sobre la microestructura y propiedades mecánicas del material empleado.

### Objetivos particulares

- Establecer dos valores de corriente eléctrica para llevar a cabo la unión disímil entre acero inoxidable 304 y acero inoxidable dúplex.
- Determinar el flujo de gas de protección para la obtención de una soldadura de calidad.
- Evaluar la calidad de los cordones de soldadura realizados aplicando ensayos destructivos y no destructivos.
- Analizar la microestructura de los metales base, zona afectada por el calor y zona de fusión de la soldadura, identificando los compuestos intermetálicos obtenidos.
- Realizar un barrido de micro y macro dureza de las piezas soldadas con la finalidad de ver el impacto de la variación de las condiciones de operación sobre esta propiedad.
- Comparar las propiedades mecánicas entre las piezas soldadas a distintas condiciones de operación, mediante ensayo de tensión.
- Determinar las velocidades de corrosión en las distintas zonas de soldadura mediante pruebas electroquímicas.

## Capítulo I. Marco teórico

### 1.1 Acero inoxidable

A lo largo de la historia el acero ha tenido un papel muy importante en el desarrollo de la industria pues cuenta con propiedades tanto mecánicas como estéticas para cubrir necesidades relevantes.

A diferencia de los aceros al carbono los aceros inoxidable se distinguen por tener en mayor cantidad la presencia de elementos aleantes en su composición química, principalmente un contenido de al menos 11% de cromo, ya que esto asegura que su protección a la corrosión sea mínima para soportar un ambiente poco agresivo debido a una película delgada de óxido de cromo altamente impermeable al oxígeno, con buena adhesión e invisible que se forma espontáneamente en la superficie del acero, para reforzar esta protección se suelen agregar otros elementos aleantes como níquel y molibdeno. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizados son reparados rápidamente. [1]

Los aceros inoxidable suelen ser usados en aplicaciones a elevadas temperaturas cuando los aceros al carbón o de baja aleación no presentan una adecuada resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable se dividen principalmente en tres clases, aceros austeníticos, ferríticos y martensíticos. En la actualidad el Instituto Americano del acero y del hierro (AISI) enumera aproximadamente 60 tipos convencionales de acero inoxidable. En los años recientes, los aceros inoxidable endurecibles por precipitación han emergido como la cuarta clase y más recientemente se han desarrollado los aceros inoxidable dúplex, que contienen aproximadamente 50% de ferrita y 50% de austenita. [1]

### 1.1.1 Acero 304

El acero AISI 304 pertenece al grupo de los aceros inoxidable austeníticos los cuales son reconocidos por tener una excelente resistencia a la corrosión, ser endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico, ser funcionales en temperaturas extremas y de tener un excelente factor de higiene y limpieza. Muestran una microestructura de granos austeníticos equiaxiales y debido a su proceso de manufactura muchas veces presentan maclas (figura 1).

*Tabla 1. Generalidades de aceros inoxidable austeníticos*

Principales elementos aleantes		Estructura	Temperatura de trabajo
Serie	Elementos aleantes	Austenítica (FCC)	Temperaturas altas (925 °C en uso continuo, 850 °C en uso intermitente)  Algunos resisten temperaturas bajas de hasta -270°C
AISI 200	Cr-Mn-N		
AISI 300	Cr-N		

Tabla 2. Composición y propiedades típicas del acero inoxidable 304 [21].

Acero 304			
Composición química	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia eléctrica (20°C) [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	Soldabilidad
C% 0.08 Máx. Mn% 2.00 Máx. Si% 1.00 Máx. Cr% 18 Ni% 8	515	0.72	Muy buena

El acero inoxidable más ampliamente usado es el grado 304. Tiene amplios usos en la industria del procesamiento de alimentos como es en la producción de leche, cerveza y vino. Los resortes, tuercas, pernos y otros sujetadores suelen ser de este grado. Otras aplicaciones comunes de este grado de acero inoxidable es en equipos químicos y tuberías, componentes de intercambiadores térmicos, equipos y utensilios de manipulación de lácteos y alimentos, recipientes y componentes criogénicos, aplicaciones arquitectónicas y estructurales expuestas a atmosferas no marinas [2].

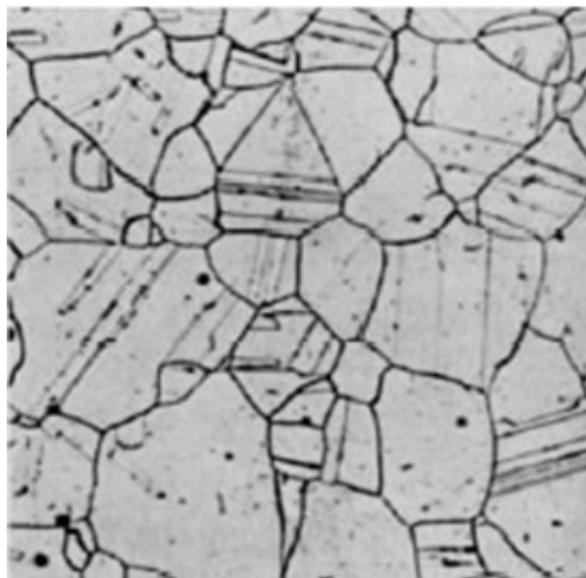


Figura 1. Microestructura típica de un acero inoxidable 304, la estructura consiste en granos de austenita equiaxiada. [22]

### 1.1.2 Acero dúplex

Los aceros inoxidable dúplex pertenecen al grupo de aceros inoxidable ausferríticos. Se definen como un conjunto de aleaciones base hierro que contienen cantidades casi iguales de las fases de ferrita ( $\alpha$ -Fe) y austenita ( $\gamma$ -Fe) como matriz (no menos del 30% de cada una). El acero inoxidable dúplex (DSS) se solidifica como ferrita, parte de la cual se transforma en austenita durante el enfriamiento posterior, produciendo la mezcla prescrita de las dos fases a temperatura ambiente (ver figura 2). En general la relación austenita/ferrita depende de la composición química de la aleación y el tratamiento térmico, sin embargo la mayoría de las aleaciones están diseñadas para obtener cantidades similares de cada fase a temperatura ambiente [3]. Dentro de los aceros dúplex existen distintas clasificaciones de estos los cuales han sido mejorados con el paso del tiempo, estas composiciones típicas se muestran en la tabla siguiente. [3]

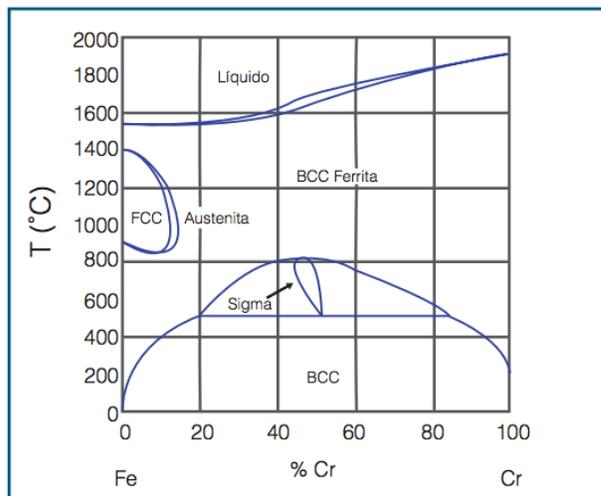


Figura 2. Diagrama Fe-Cr

Tabla 3. Composiciones típicas de aceros Dúplex [3].

Tipos de acero	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
<b>Aceros inoxidable dúplex laminados</b>										
<b>Tipos de acero dúplex de primera generación</b>										
329	S32900	1.4460	0,08	23,0–28,0	2,5–5,0	1,0–2,0	–	1,00	–	–
**	S31500	1.4424	0,03	18,0–19,0	4,3–5,2	2,5–3,0	0,05–0,1		–	–
	S32404		0,04	20,5–22,5	5,5–8,5	2,0–3,0	0,20	2,00	1,0–2,0	–
<b>Tipos de acero dúplex de segunda generación</b>										
<b>De baja aleación</b>										
	S32001	1.4482	0,03	19,5–21,5	1,0–3,0	0,6	0,05–0,17	4,0–6,0	1,0	–
	S32101	1.4162	0,04	21,0–22,0	1,35–1,7	0,1–0,8	0,20–0,25	4,0–6,0	0,1–0,8	–
	S32202	1.4062	0,03	21,5–24,0	1,0–2,8	0,45	0,18–0,26	2,00	–	–
	S82011		0,03	20,5–23,5	1,0–2,0	0,1–1,0	0,15–0,27	2,0–3,0	0,5	–
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5–24,5	3,0–5,5	0,05–0,6	0,05–0,20	2,50	0,05–0,60	–
		1.4655	0,03	22,0–24,0	3,5–5,5	0,1–0,6	0,05–0,20	2,00	1,0–3,0	–
<b>Estándar</b>										
	S32003		0,03	19,5–22,5	3,0–4,0	1,5–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
2205	S31803	1.4462	0,03	21,0–23,0	4,5–6,5	2,5–3,5	0,08–0,20	2,00	–	–
2205	S32205	1.4462	0,03	22,0–23,0	4,5–6,5	3,0–3,5	0,14–0,20	2,00	–	–
<b>25 Cr</b>										
	S31200		0,03	24,0–26,0	5,5–6,5	1,2–2,0	0,14–0,20	2,00	–	–
	S31260		0,03	24,0–26,0	5,5–7,5	2,5–3,5	0,10–0,30	1,00	0,2–0,8	0,1–0,5
	S32506		0,03	24,0–26,0	5,5–7,2	3,0–3,5	0,08–0,20	1,00	–	0,05–0,30
	S32520	1.4507	0,03	24,0–26,0	5,5–8,0	3,0–4,0	0,20–0,35	1,50	0,5–2,0	–
255	S32550	1.4507	0,04	24,0–27,0	4,5–6,5	2,9–3,9	0,10–0,25	1,50	1,5–2,5	–
<b>Superdúplex</b>										
2507	S32750	1.4410	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	0,24–0,32	1,20	0,5	–
	S32760	1.4501	0,03	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–4,0	0,20–0,30	1,00	0,5–1,0	0,5–1,0
	S32808		0,03	27,0–27,9	7,0–8,2	0,8–1,2	0,30–0,40	1,10	–	2,1–2,5
	S32906		0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,5	0,8	–
	S32950		0,03	26,0–29,0	3,5–5,2	1,0–2,5	0,15–0,35	2,00	–	–
	S39274		0,03	24,0–26,0	6,8–8,0	2,5–3,5	0,24–0,32	1,0	0,2–0,8	1,5–2,5
	S39277		0,025	24,0–26,0	6,5–8,0	3,0–4,0	0,23–0,33	0,80	1,2–2,0	0,8–1,2
		1.4477	0,03	28,0–30,0	5,8–7,5	1,5–2,6	0,30–0,40	0,80–1,50	≤0,8	–
<b>Hiperdúplex</b>										
	S32707		0,03	26,0–29,0	5,5–9,5	4,0–5,0	0,30–0,50	1,50	1,0	–
	S33207		0,03	29,0–33,0	6,0–9,0	3,0–5,0	0,40–0,60	1,50	1,0	–

Es de suma importancia conocer los efectos que ocurren en el acero dúplex al ser sometido a un proceso de soldadura. Debido a la cantidad de elementos aleantes presentes en su composición química, estos aceros presentan fases secundarias,

las cuales corresponden con la precipitación de partículas que involucran principalmente cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno entre otros elementos de aleación( ver tabla 4). La adición de elementos aleantes afecta a la estabilidad de las fases de austenita y ferrita [4]. Establecer un equilibrio en la adición de elementos aleantes permite obtener una estructura Dúplex, es decir una estructura intermedia entre los aceros ferríticos y austeníticos. En la figura 3, se muestra una estructura típica del acero inoxidable dúplex y su variación estructural de acuerdo a la adición de Níquel.

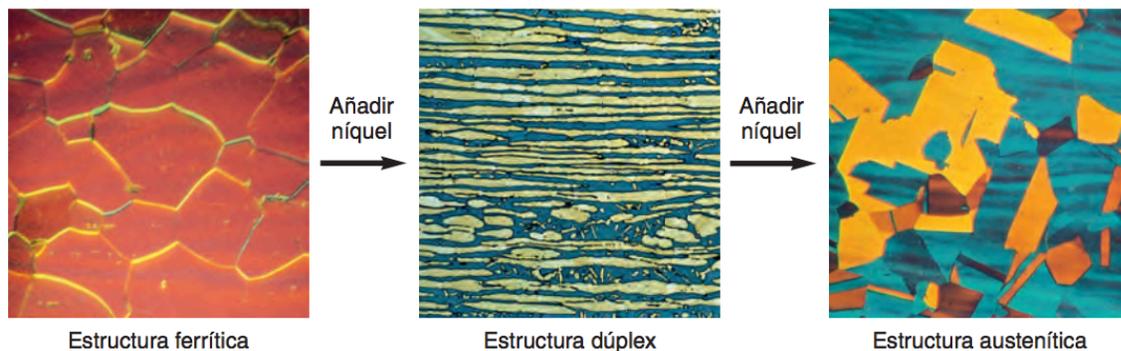


Figura 3. Adición de níquel a un acero inoxidable. En la estructura dúplex, la ferrita es la fase más oscura mientras que la austenita es la clara. [3]

Tabla 4. Fases presentes en aceros Dúplex [5,6].

Fase	Aparición	Composición	Efectos
Sigma	Aparece como consecuencia de la permanencia más o menos prolongada de temperatura que va desde 725K hasta los 1250K Comienza en uniones triples o límites e grano.	Compuesto intermetálico Fe-Cr, aproximadamente $Fe_7Cr_6$	Disminuye los efectos de la ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión
Chi	Precipita cuando los aceros son sometidos a tratamientos térmicos de 6 a 10 horas, entre 975-1175 K. Frecuentemente tiene lugar en la interface ferrita/austenita y crece en la matriz delta	Compuesto intermetálico de cromo	Es una fase frágil y quebradiza

alfa	Aparece entre 575 a 800K Se debe a la descomposición a baja temperatura de la ferrita	Formación asociada a la aparición previa de Cr <sub>2</sub> N Fase rica en Cr	
Carburo tipo M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Aparece en dúplex con alto contenido de carbono. Precipitan en la interfase alfa /gamma entre 1225 y 1325 K	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Esta fase no afecta las propiedades mecánicas del material en una forma dispersa y poco abundante.
Carburo tipo M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Precipita de 1000 a 1200 K aproximadamente. Se sitúa predominantemente en los límites de grano y en menor proporción dentro de los granos de ferrita/austenita.	M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Puntos de nucleación para la fase sigma.

## 1.2 Proceso de soldadura

### 1.2.1 Soldadura disímil

La soldadura disímil es la unión de dos materiales distintos entre sí, con características químicas similares.

La soldadura disímil suele usarse en conexiones de tuberías a las vasijas de los reactores, en este tipo de conexiones usualmente las tuberías son de acero inoxidable austeníticos, mientras que la vasijas son fabricadas de aceros ferríticos de baja aleación, por esta razón para su unión se emplea un material de aporte compatible con los materiales a soldar.

Para lograr realizar una buena soldadura disímil es necesario que los materiales a unir o el material de aporte sean con características similares ya que esto ayudará a que las propiedades mecánicas en el cordón no cambien negativamente las propiedades iniciales de los materiales base.

### 1.2.2 Proceso de soldadura TIG

La soldadura por arco eléctrico con electrodo no consumible (tungsteno) protegido con gas inerte, también llamado TIG por sus siglas en inglés (Tungsten Inert Gas), es un proceso de soldadura bastante empleado en la actualidad ya que es amigable con materiales ferrosos y no ferrosos, en la figura 4 se aprecia un esquema general del equipo de soldadura TIG.

En las maquinas TIG conviene establecer un contacto entre el tungsteno que actúa generalmente como polo negativo, con la unión conectada al polo positivo para cerrar el circuito y que la corriente eléctrica comience a fluir, lo que se observa es que entre ambos se produce una chispa de luz muy intensa la cual conocemos como arco eléctrico, que al mismo tiempo desprende calor, cuando este arco se establece

el electrodo de tungsteno está bajo la protección de un gas inerte, lo que impide el contacto del aire con el baño de fusión, este gas (Ar) es aislante pero si su temperatura se eleva lo suficiente es posible ionizarlo y que pase a ser conductor, permitiendo el paso a la corriente eléctrica.

La soldadura TIG se realiza con una fuente de poder y para lograr realizar el cordón se emplea una antorcha TIG que, además de portar el tungsteno, conduce el calor y el gas de protección por una tobera cerámica de diámetro reducido, permitiendo concentrar todo en un área pequeña, de esta manera la cantidad de gas protector necesario es mucho menor que si se empleara sin boquilla cerámica, pero suficiente para garantizar que el baño de fusión y el tungsteno queden protegidos del contacto con los gases atmosféricos. Esta antorcha permite que el realizar la soldadura sea más dinámico, consta de una boquilla de cerámico la cual impide que se caliente demasiado la parte inferior y el resto suele ser de plástico, estas antorchas son ligeras y en ocasiones permiten el control del gas manualmente. [7]

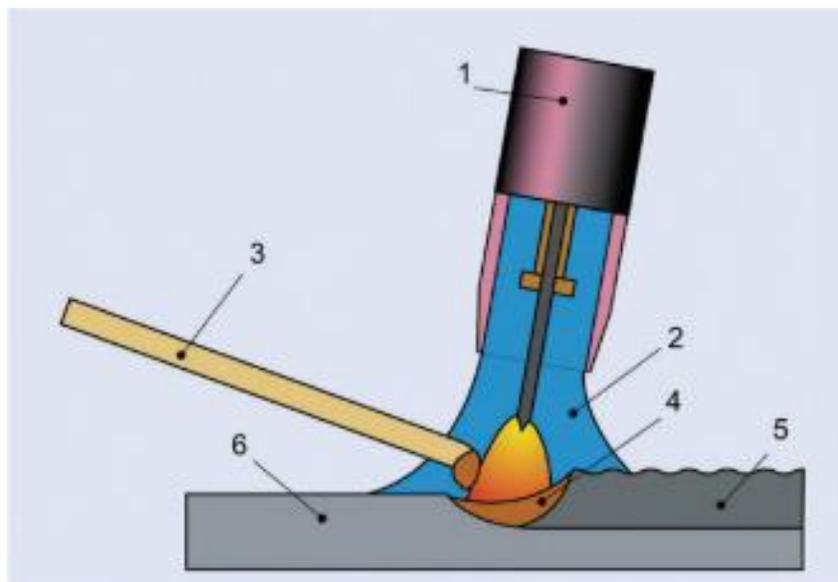


Figura 4. Esquema general de la soldadura TIG. 1) boquilla de gas. 2) protección del gas. 3) varilla de aporte 4) tina de fusión 5) cordón de soldadura 6) material base.

### 1.2.3 Gases de protección

El gas protector en la soldadura TIG es indispensable ya que este protege al metal fundido en la soldadura del efecto del oxígeno, hidrogeno y del nitrógeno presentes en el aire, de no ser así, se producirían reacciones no deseadas como la oxidación del cordón y defectos como fisuras en frio o porosidad.

En el caso de la soldadura TIG, los gases protectores principalmente empleados son dos: helio y argón

El argón suele ser el gas más utilizado en este tipo de procesos por su relación calidad/precio, sin embargo, en ocasiones el emplear una mezcla de estos gases, en general, puede mejorar la soldadura.

Al aumentar la temperatura del argón, por necesitar una menor energía de ionización que el helio, llega a conducir y a mantener el arco eléctrico, lo cual es de suma importancia al no producirse el contacto directo entre el tungsteno y la pieza a unir.

Por lo mencionado anteriormente el argón es la primera opción para elegir. Existen varios tipos, según su pureza, estos van desde un estándar de 95% al de 99.99%, el primer caso puede servir para soldar aceros al carbón, sin embargo, para aleaciones más reactivas es muy recomendable usar un gas argón de alta pureza ya que si no es así se pueden producir problemas de contaminación en los cordones.

Muchas veces se suele combinar el argón con bajas cantidades de hidrogeno, pero esto solo se suele hacer para algunas soldaduras de aceros inoxidable, este aditivo suele mejorar la penetración conseguida en la soldadura TIG con argón y permite aumentar la velocidad de soldeo, sin embargo, si se usa este aditivo en materiales como aceros al carbón, aceros de baja aleación o aleaciones de aluminio puede causar porosidad.

Es importante mencionar que a pesar de que estos dos gases inertes (He y Ar) son los más empleados en la soldadura TIG también existe el uso de gases como nitrógeno e hidrogeno y muchas veces suelen emplearse mezclas de acuerdo con los materiales que se vayan a soldar, a continuación, se muestran algunos ejemplos de gases de protección y los materiales en los que se emplean.[7]

Tabla 5. Gases de protección empleados en la soldadura TIG.

Gas de protección	Material
Argón puro	Válido para todos los materiales, recomendado hasta 2 mm de espesor.
Argón/hidrógeno (máximo 6 % de H)	Aceros inoxidables austeníticos, aceros para usos criogénicos al níquel, aleaciones de base níquel.
Nitrógeno/hidrógeno	Aceros de alta resistencia [excepto de grano fino] aceros austeníticos no estabilizados con Titanio [evita la formación de carburos de cromo] <b>muy usado para purga.</b> <u>En dúplex y superdúplex también para purga (90% N<sub>2</sub> y 10% H<sub>2</sub>)</u> como alternativa al argón puro [efectivo y mucho más barato]. Aunque el hidrógeno puede fragilizar en los estudios realizados, parece demostrado que penetra una cantidad insignificante de este en el cordón.
Nitrógeno	Aceros inoxidables austeníticos al cromo/níquel.
Argón/nitrógeno	Aceros inoxidables dúplex y superdúplex [hasta un 2 % de nitrógeno mejora la resistencia a la corrosión por picadura. Si se añade más, aumenta el riesgo de poros].
Argón/Helio	Un 70 Ar/ 30 He aumenta la penetración y la velocidad de soldeo en un 20-30 %.

#### 1.2.4 Tipo de corriente eléctrica

El proceso de soldadura TIG en general es manual y tiene una tasa de defectos menor, comparada con los de otros procesos de soldadura por arco metálico. Este proceso se puede emplear con corriente continua (CC) y corriente alterna (CA). Hablando de la corriente continua, ésta se identifica por la polaridad del electrodo. Si este es negativo se denomina corriente continua de electrodo negativo (CCEN). Si es positivo se denomina corriente continua de electrodo positivo (CCEP). La corriente continua de electrodo negativo, concentra alrededor de dos tercios de su calor de soldadura en la pieza y el tercio restante en el tungsteno esto genera una mayor fusión o una penetración del cordón más profunda en el metal base, un nivel más bajo de aportación de calor en el tungsteno significa que se puede utilizar el de menor tamaño sin sobre calentarlo, usar un electrodo de menor tamaño puede implicar un ahorro de tiempo, dinero y tungsteno. La corriente continua de electrodo positivo, concentra solo aproximadamente un tercio del calor del arco en el metal de soldadura y dos tercios en el electrodo de tungsteno, produce soldaduras más anchas y mucho menos profundas que las CCEN. Este tipo de corriente realiza una limpieza muy buena por lo que es una buena elección para metales finos y muy oxidados. La corriente alterna debe su nombre a que los electrodos avanzan en una dirección por un periodo corto de tiempo y luego cambian y avanzan en dirección opuesta, en otras palabras la CA se compone de corriente continua de electrodo negativo (CCEN) la mitad del tiempo y corriente continua de electrodo positivo (CCEP) la otra mitad, para poder utilizar este tipo de corriente es necesario tener una alta frecuencia lo que permite que el arco se genere instantáneamente en cuanto este se apaga y suele usarse en materiales no ferrosos (Al, Mg, Cu).

### 1.3 Caracterización

#### 1.3.1 Análisis macroscópico

En cualquier estudio de materiales, la forma correcta de evaluación es comenzar por un análisis macroscópico, antes de utilizar los análisis microscópicos.

El ensayo macroscópico de preferencia lleva una preparación previa, mínima metalográfica del material y, en ocasiones, un ataque químico macroscópico.

El estudio macroscópico se realiza en un microscopio estereográfico, que a diferencia de los microscopios de luz transmitida, la luz es reflejada.

Este análisis nos permite observar la pieza en general, en el caso de la soldadura nos ayuda a identificar mediante un corte transversal a la soldadura el grosor del cordón, penetración y zona afectada por el calor.

#### 1.3.2 Microscopía óptica

El análisis por microscopía óptica, es un análisis complementario que nos ayuda a predecir la composición química de nuestro material mediante la observación de su microestructura así como las transformaciones que los materiales han sufrido en su estructura, ya sea por procesos de manufactura o tratamiento térmico.

La preparación de las piezas metálicas para ser observadas al microscopio debe ser cuidadosa ya que de esta dependerá conseguir una buena observación. La preparación consta de un proceso metalográfico el cual comienza por un desbaste

grueso a fino con la finalidad de tener una superficie lisa y pareja, posterior a esto las piezas se pulen y se someten a un ataque químico el cual nos permite la revelación de la microestructura. [8]

### 1.3.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopia electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés, Scanning Electron Microscope) consiste en la generación de una imagen por electrones secundarios o retrodispersados de la muestra a observar mediante el barrido de un haz de electrones acelerados y enfocados sobre su superficie.

Esta técnica permite observar, además de la topografía, cambios en la densidad y composición química superficial de la muestra hasta profundidades del orden de micras. [9]

La microscopia electrónica de barrido es empleada en la soldadura para lograr obtener una visión a grandes aumentos de las distintas transformaciones en la unión soldada.

### 1.3.4 Espectroscopia de rayos x de energía dispersa (EDS)

La espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS) es un método de análisis químico que puede combinarse con las dos técnicas principales basadas en haz de electrones, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopia electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de transmisión por barrido (STEM). Esta técnica permite realizar análisis químicos semi cuantitativos de la superficie analizada.

El análisis EDS se usa para determinar la composición elemental de puntos individuales, escaneo lineal o por área (se traza la distribución lineal de los elementos en el área de la imagen seleccionada). [10]

## 1.4 Ensayos no destructivos (END)

### 1.4.1 Inspección visual

La técnica de inspección visual aporta información acerca de las características de la pieza examinada, es útil para una acertada interpretación de las posibles indicaciones de otros END, cuando se aplica correctamente detectando problemas que pudieran ser mayores en los pasos subsecuentes de producción o durante el servicio, por lo cual es siempre recomendable como auxiliar o paso previo a otros END.

La inspección visual consta de un examen usando la agudeza visual cercana y lejana y de ser necesario, el uso de lentes o lupa por parte del inspector.

La inspección visual se emplea en cualquier etapa de un proceso productivo o durante las operaciones de mantenimiento preventivo o correctivo. Esta técnica muestra las discontinuidades más grandes y señala otras que pueden detectarse de forma más precisa por otros métodos. El costo de esta técnica es el más bajo de todos los ensayos no destructivos. [12]

#### 1.4.2 Líquidos penetrantes

El ensayo de líquidos penetrantes entra en el grupo de ensayos no destructivos, este ensayo permite la determinación de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Este procedimiento se limita a discontinuidades que se encuentran en la superficie, si por el contrario el defecto es sub-superficial no se puede detectar usando esta técnica. El procedimiento se basa en la aplicación de un líquido en la superficie limpia de la pieza para que este penetre en las discontinuidades que afloran en la superficie, de forma que, al limpiar el exceso de este líquido de la superficie quede solamente el líquido introducido en las discontinuidades, posteriormente con ayuda de un agente revelador, que de igual manera se coloca en la superficie, señala las zonas en las que existen discontinuidades coloreándolas. [13]

Este ensayo se realiza en los cordones de soldadura con la finalidad de obtener información acerca de su calidad, es decir, si las uniones están libres de defectos superficiales. Asegurando que la soldadura es buena es posible realizar más ensayos en la unión con la confianza de que las fallas en el cordón, serán nulas.

#### 1.5 Ensayos destructivos

En los ensayos destructivos se utilizan pequeñas muestras de las estructuras soldadas (probetas) las cuales se someten a cargas o distintos esfuerzos hasta que estas se rompen brindándonos información de acuerdo al ensayo que se aplique. Los ensayos más comunes que se emplean en la soldadura son el ensayo de tracción, ensayo de flexión, macrografías y pruebas electroquímicas.

##### 1.5.1 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión proporciona información sobre la fuerza y ductilidad de los materiales bajo esfuerzos de tensión uniaxiales. Esta información puede ser útil en las comparaciones de materiales, desarrollo de aleaciones, control de calidad y diseño en determinadas circunstancias.

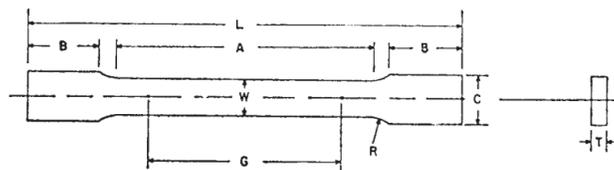
Las pruebas de tensión se llevan a cabo en una maquina universal (figura 5), la maquina empleada para las pruebas de tensión deben ajustarse a los requisitos de la norma ASTM E8. [16]



Figura 5. Ejemplo de máquina empleada en la realización del ensayo de tensión.

La probeta sometida al ensayo de tensión puede ser de material de aporte (homogénea) o de un trozo de la junta (heterogénea). Las probetas homogéneas se utilizan para controlar el material de aportación y se preparan de la forma y dimensiones según la norma ASTM E-8.

Las probetas para controlar uniones a tope sobre chapas o tubos se preparan como las mostradas en la figura 6. [14]



Nominal Width	Dimensions, mm		
	Plate-Type 40 mm	Standard Specimens Sheet-Type 12.5 mm	Subsize Specimen 6 mm
G— Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W— Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T— Thickness (Note 5)		thickness of material	
R— Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L— Overall length, (Note 2, Note 7 and Note 8)	450	200	100
A— Length of reduced section, min	225	57	32
B— Length of grip section, (Note 8)	75	50	30
C— Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

Figura 6. Dimensiones de probetas rectangulares para prueba de tensión.

El ensayo de tensión nos proporciona información del esfuerzo y la deformación de nuestro material al ser sometido a un esfuerzo de tracción, así como el tipo de fractura el cual está relacionado con el comportamiento dúctil-frágil del material. Lo que se busca con este ensayo en la soldadura de junta, es evaluar la resistencia de la soldadura de acuerdo con las condiciones que se realiza (en este caso, la corriente eléctrica), así como la penetración de la soldadura mediante el tipo de fractura.

### 1.5.2 Dureza

Ensayo Rockwell: este ensayo mide la profundidad de penetración en el material, a diferencia del ensayo Brinell que mide el diámetro de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con una carga menor (precarga) y después se complementa con una carga mayor, la diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material.

Existen distintas escalas de dureza rockwell e indentadores, la selección de la combinación de la carga y el indentador nos indica el tipo de dureza medida. [15]

Ensayo Vickers: Se pueden realizar macro y micro durezas dependiendo de las cargas a usar. Este ensayo utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide y una carga que va desde 1 hasta 20 kg. El número de dureza Vickers se denomina HV. [15]

El ensayo de dureza Vickers también es denominado de micro-dureza, ya que con este ensayo se busca obtener la dureza en zonas específicas ya que las mediciones se pueden hacer en zonas puntuales tales como granos, límites de grano, fases y zonas de transición micro-estructurales. De esta manera obtenemos información precisa de la microestructura del material de acuerdo con sus transformaciones. En el caso de la soldadura nos ayuda a obtener información de zonas de transición, pues se realizan barridos desde el metal base cruzando la zona afectada por el calor y zona de fusión.

### 1.6 Pruebas electroquímicas

En la actualidad existen diferentes técnicas electroquímicas que pueden servir en mayor o menor medida para evaluar el desempeño electroquímico de las aleaciones y de los recubrimientos anticorrosivos, las cuales pueden estar clasificadas de la siguiente manera:

- a) Técnicas de alto campo (Curvas de polarización, Extrapolación de Tafel).
- b) Técnicas de bajo campo (Resistencia a la Polarización, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)).
- c) Técnicas sin perturbación externa (Ruido Electroquímico (EN) y (E vs t) donde no se aplica perturbación al sistema, solo se miden las fluctuaciones del potencial y la corriente en función del tiempo sin aplicar estimulación alguna. [20,21]

Tabla 6. Principales ensayos electroquímicos

Ensayo	Peculiaridades	Propósito
Curvas de polarización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo destructivo al aplicar un sobre potencial</li> <li>• Solo control activacional</li> <li>• Técnica sencilla y económica</li> <li>• Velocidad de corrosión instantánea</li> <li>• Se considera corrosión uniforme</li> <li>• Técnica rápida</li> </ul>	Obtener $i_{corr}$ , velocidad de corrosión, potencial de corrosión, pendiente catódica y anódica.
Resistencia a la polarización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica no destructiva al ser una polarización pequeña</li> <li>• Velocidad de corrosión instantánea</li> <li>• Técnica rápida</li> <li>• Técnica económica</li> <li>• Se considera corrosión uniforme</li> <li>• Control activacional</li> </ul>	Obtener $i_{corr}$ , velocidad de corrosión
Potencial tiempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica no destructiva</li> <li>• Depende de la velocidad de barrido</li> </ul>	Indica cuanto tiempo tarda el sistema en llegar al estado estacionario

### 1.6.1 Extrapolación de Tafel

La técnica electroquímica de extrapolación de Tafel se fundamenta en la teoría del potencial mixto, la cual establece que la reacción anódica (oxidación) como catódica (reducción) se llevan a cabo simultáneamente, de modo que la densidad de corriente total es igual a la diferencia de las densidades de corriente de las dos reacciones [17,19,21].

La técnica consiste en polarizar un material metálico a diferentes potenciales, tanto en sentido anódico, cómo catódico. Durante la polarización anódica se presentará la reacción de disolución del metal. Aquí se observará una zona lineal con respecto al logaritmo de la corriente llamada zona Tafeliana de la cual se extrapola al potencial de corrosión para obtener la velocidad de corrosión en ese instante. También si el material es polarizado en sentido catódico se llevará a cabo la reacción de reducción, por ejemplo, a pH ácido la del hidrógeno ( $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ ) y la del oxígeno ( $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ ) en un pH neutro o alcalino, que variará con el valor del potencial hasta alcanzar un valor lineal con respecto al logaritmo de la corriente, de donde se extrapolará para obtener la velocidad de corrosión al potencial de corrosión [21, 18-19].

De esta técnica se extraen las pendientes de Tafel; parámetros cinéticos de gran importancia para la caracterización de los mecanismos de reacción, así como la velocidad de corrosión instantánea (ver figura 7).

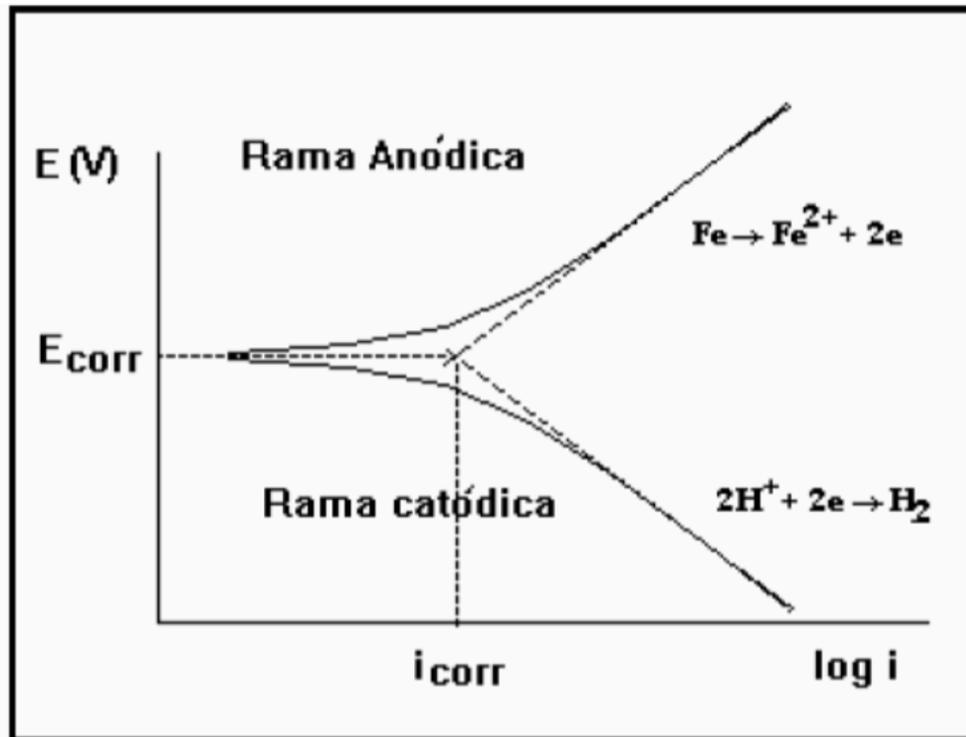


Figura 7. Determinación experimental de las pendientes de Tafel. [28]

### 1.6.2 Potencial de corrosión a circuito abierto (E vs t)

Este ensayo permite clasificar a los materiales que se consideren activos o pasivos una vez que se han medido sus potenciales y que sean comparados con los establecidos en una serie galvánica.

En este tipo de ensayo no se requiere suministrar ningún tipo de señal a la celda de trabajo, ya que sólo se registran las variaciones de potencial de la muestra metálica sumergida en electrólito en función del tiempo hasta que el sistema llegue a su estado estacionario donde las variaciones de potencial sean mínimas. Este ensayo también es conocido como medición de potencial a circuito abierto (OCP). [20-22]

### 1.6.3 Resistencia a la polarización

La prueba de resistencia a la polarización, también llamada “Rp” establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión (i<sub>corr</sub>), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización.

Stern y Geary desarrollan la siguiente ecuación

$$i_{corr} = B/R_p$$

$$B = \frac{b_a b_c}{[2.303(b_a + b_c)]}$$

Esta ecuación se basa en la conocida ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia. La constante B mencionada en la ecuación anterior sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad (es una constante) y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel. Dada esta relación es claro que es indispensable que exista el comportamiento Tafeliano en el sistema electroquímico, debido a esto lo ideal es realizar la extrapolación de Tafel para determinar los valores de las pendientes anódica y catódica, pero, en ocasiones basta saber que la velocidad de corrosión está aumentando en función del tiempo. En la mayoría de las veces las pendientes de las curvas de Tafel oscilan entre valores de 60 y 120 mV/década, por lo que se ha optado por hacer una aproximación suponiendo que ambas pendientes tuvieran el segundo valor, así se obtiene una B=26 mV que puede emplearse con reserva. [23]

## Capítulo II. Metodología experimental.

### 2.1 Probetas

La presentación del acero 304 es una barra de 3.8 cm de ancho por 0.63 cm de espesor y el acero dúplex en lingote proveniente de colada fueron cortados a las medidas especificadas en la tabla 7. Utilizando una cortadora de disco. Una vez obtenidos los cortes estas se sometieron a un proceso mecánico de rectificación con el fin de obtener una superficie adecuada para realizar el proceso de soldadura.

*Tabla 7. Dimensiones de las probetas empleadas.*

Ensayo	Material	Espesor [cm]	Ancho [cm]	Largo [cm]
Micro y macro análisis	Acero 304 y acero dúplex	0.63	1	3
Dureza	Acero 304 y acero dúplex	0.63	1	3
Tensión	Acero 304 y acero dúplex	0.63	2	14
Pruebas electroquímicas	Acero 304 y acero dúplex	0.63	1.5	1.5

### 2.2 Proceso de soldadura

Se realizaron cordones de soldadura en placas de acero inoxidable para calibrar y encontrar las condiciones óptimas de unión de los materiales a estudio. En la tabla 8 se especifican dichas condiciones de unión.

Tabla 8. Condiciones de soldadura.

Tipo de corriente	Amperaje	Flujo de gas	Electrodo	Cerámico
CDEN	80 y 100 A	15 Psi con un post-flujo de 5s	EWTh-2 (rojo, 2% de Torio) según la norma AWS A5.12. Diámetro de 1/8	Tobera cerámica número 5

A las piezas previamente maquinadas se les realizó un proceso de limpieza superficial y una preparación con lija de carburo de silicio grado 250 para retirar cualquier imperfección que pueda causar variaciones al momento de realizar la unión entre los aceros.

Las uniones se realizaron utilizando una planta de soldadura Syncrowave 250 marca Miller (figura 8), generando cordones de soldadura por la cara frontal y posterior de las probetas, para determinar las condiciones óptimas para realizar la unión.



Figura 8. Planta de soldadura Syncrowave 250.

## 2.3 Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos se realizaron con el fin de cerciorarse que las soldaduras son de calidad, de esta manera se reduce el riesgo de encontrar fallas por soldadura en los cordones realizados.

### 2.3.1 Inspección visual

Una vez obtenidas las probetas de soldadura cada una fue sometida a inspección visual, los cordones fueron inspeccionados uno por uno superficial y transversalmente para identificar posibles fallas. Posterior a esta revisión se utilizó una lupa para observar más detalladamente los cordones, además de revisar los cordones se observaron los metales base para identificar visualmente la afectación por el calor.

### 2.3.2 Líquidos penetrantes

Las probetas soldadas fueron sometidas a la siguiente secuencia de pasos para ser inspeccionadas mediante el ensayo de líquidos penetrantes:

1. Preparación y limpieza de la superficie a estudio.  
Antes de aplicar los líquidos penetrantes es importante hacer una buena preparación superficial que nos permita realizar de manera correcta la aplicación de dicha técnica.
2. Las piezas soldadas se limpiaron con alcohol etílico, se aplicó directamente el disolvente en la superficie para asegurar una superficie libre de impurezas.
3. Aplicación del líquido penetrante. Se aplicó el líquido penetrante mediante pulverización con aerosol y se dejó actuar por 10 minutos.
4. Limpieza con limpiadores alcalinos se limpió el exceso de líquido penetrador en las piezas y se realizó una segunda limpieza.
5. Aplicación del revelador esta operación hace visible el defecto al ojo humano. Actúa como un papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad defecto superficial y contribuye a aumentar la visibilidad por ser un color opuesto al penetrante. [13]

Los elementos empleados a partir del paso 2, fueron en aerosol, la aplicación de estos se realizó a una distancia aproximada de 20 cm de la pieza con un ángulo de inclinación de 30 °.

## 2.4 Caracterización metalográfica

### 2.4.1 Análisis macroscópico

Para llevar a cabo el análisis macroscópico se realizó una preparación de la superficie la cual consiste en un desbaste fino con una serie de lijas de carburo de silicio comenzando con un grano grueso (grado 240) y finalizando con un grano bastante fino (1000) rotándolas 90 ° cada cambio de lija.

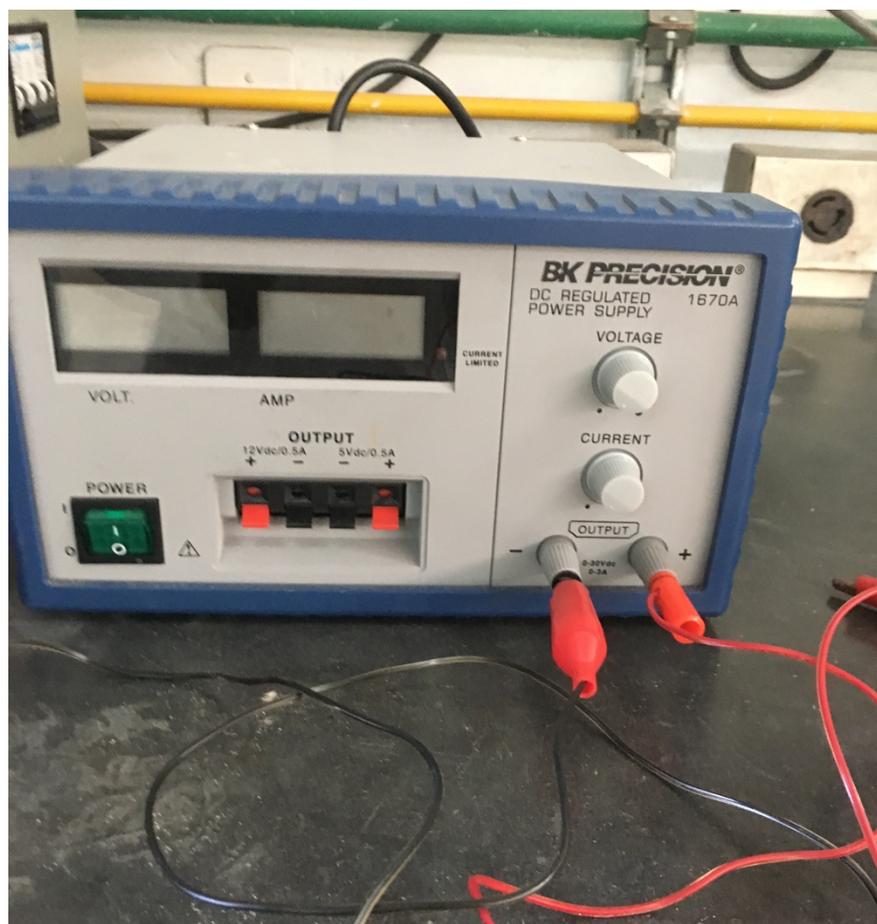
Pulir las piezas hasta acabado espejo, iniciando mecánicamente en un paño de tela de mesa de billar con alúmina de 1.5 micras como abrasivo, para obtener un mejor

resultado las probetas fueron sometidas a un pulido manual posterior al mecánico, en una paño más fino con alúmina de 0.5 micras. Por tratarse de aceros inoxidable se empleó un ataque electroquímico utilizando diferentes soluciones.

*Tabla 9. Ataque electroquímico para soldadura disímil.*

Material	Solución	Finalidad
Acero dúplex	100 ml de NaOH al 20% en agua destilada	Observar la coloración de las fases del acero dúplex
Acero inoxidable 304	100 ml de ac. Oxálico al 10% en agua destilada	Revelar los granos del acero inox. 304

Una vez preparadas las soluciones señaladas en la tabla 9, cada una se vertió en un vaso de acrílico en el cual se introdujo la pieza a revelar (polo positivo) y una placa de acero inoxidable (polo negativo), ambos materiales fueron sometidos por 15s a una corriente de 3.5 A con una fuente de poder señalada en la figura 9. Una vez transcurrido el tiempo de ataque las piezas fueron enjuagadas con agua y secadas con aire perfectamente para evitar problemas de oxidación.



*Figura 9. Fuente de poder empleada en ataque electroquímico.*

Una vez realizado el revelado químico de la microestructura, las probetas se analizaron en un microscopio estereográfico a distintos aumentos con la finalidad de poder observar las tres principales regiones en una soldadura: metal base (MB), zona afectada térmicamente (ZAC) y cordón de soldadura (ZF). En el análisis macroscópico se aprecia la separación entre los dos metales y el cordón de soldadura, debido al ataque químico previamente realizado.

#### 2.4.2 Microscopía óptica

En el análisis microscópico las probetas soldadas a distintas condiciones de corriente eléctrica se prepararon metalográficamente como se indica en el apartado 2.4.1, su microestructura fue revelada electrolíticamente (tabla 9) siguiendo el mismo procedimiento mencionado anteriormente.

Una vez realizado el ataque químico las piezas se observaron en un microscopio de platina invertida (figura 10), se identifican diferentes zonas para ubicar cambios microestructurales en metal base, zona afectada por calor y cordón de soldadura. El ataque reveló diferentes coloraciones en las cuales se identificaron los precipitados y microconstituyentes del acero dúplex y el tamaño de grano en el acero inoxidable 304. Mediante la microscopía óptica se determinó la penetración en las probetas por evaluación visual del tamaño de los cordones y unión entre materiales.



Figura 10. Microscopio empleado en el análisis microestructural de las soldaduras.

#### 2.4.3 Microscopia Electrónica de Barrido

En el estudio de las soldaduras por MEB se utilizaron las probetas empleadas en el análisis macro y micro estructural, para una mejor interpretación se hizo un aumento en el tiempo de ataque electrolítico (25s) , para lograr observar a mayor detalle los granos y fases. De esta manera fue posible identificar con mayor precisión las fases en la soldadura, metales base e interfaces entre ellos.

#### 2.4.4 Espectroscopía de rayos x de energía dispersa (EDS)

El microanálisis EDS se realizó simultáneamente en el microscopio electrónico de barrido para determinar la composición química de metales base, zona de fusión y zona afectada por calor, mediante análisis lineales, puntuales y por área.

### 2.5 Ensayos destructivos

#### 2.5.1 Tensión

Las pruebas de tensión se realizaron por duplicado. Las medidas de las probetas fueron de 2x14 cm con un espesor de 0.63 cm.

Las probetas se colocaron en una maquina universal de tensión, los ensayos se realizaron a una velocidad de 0.5 mm/s.

Una vez que el ensayo de tensión terminó las probetas se analizaron en la zona de ruptura para determinar tipo de fractura, posteriormente se midieron para determinar la longitud entre marcas.

De los datos obtenidos del ensayo de tensión se realizó la curva de esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas a distintas condiciones, de esta curva se obtuvieron los valores de ruptura y limite elástico de ambas condiciones de soldadura para ser comparados con los valores teóricos de los metales base.

#### 2.5.2 Micro dureza

El ensayo de micro dureza se realizó en un durómetro Vickers con una carga de 980 mN HV 0.1, por un tiempo de 15 segundos (ASTM E384).

Se hizo el barrido de medición de dureza, se realizó a una distancia de 2 mm entre punto y punto, de metal base a metal base, pasando por la zona afectada por el calor y cordón de soldadura. Con el perfil de durezas obtenido se elaboró una gráfica para identificar los cambios de esta propiedad en las distintas zonas y determinar la condición de corriente a la que se obtuvo una menor afectación o cambio respecto a los metales base.

#### 2.5.3 Macro dureza

Las pruebas de macro dureza fueron realizadas después de las pruebas de micro dureza (Vickers), se realizó para determinar el comportamiento del metal base, cordón de soldadura y zona afectada por calor con el fin de determinar posibles variaciones.

Se realizaron por triplicado las mediciones de dureza en ambos metales base y en el cordón de soldadura a las siguientes condiciones (ASTM E 18-02).

Tabla 10. Condiciones de dureza HRB empleadas en las soldaduras.

Dureza Rockwell B, Macro dureza		
Dureza	Carga	Indentador
HRB	100K	1/16

## 2.6 Pruebas electroquímicas

Se realizaron pruebas electroquímicas de los cordones de soldadura realizados a 80 y 100 A y a los metales base, esto para determinar el cambio de la velocidad de corrosión que tienen los metales al ser sometidos a dicha unión disímil. Se prepararon superficialmente las piezas soldadas para llevar a cabo correctamente los ensayos electroquímicos.

Se empleó un arreglo de tres electrodos, electrodo de trabajo el metal base o cordón de soldadura, un electrodo de referencia (ECS) y un contra electrodo (grafito), se utilizó un potencióstato-galvanostato Gill AC-ACM Instruments. Se realizaron pruebas de potencial vs tiempo, resistencia a la polarización (Rp) y curvas de polarización (CP), todas cumpliendo las condiciones de la tabla 11.

Tabla 11. Condiciones de operación de pruebas electroquímicas.

Prueba	Medio	Potencial mV	Tiempo min	Velocidad de barrido mV/min
Rp	NaCl 3%	-20 a 20		10
Curvas polarización	“	-300 a 500		60
Potencial-tiempo	“		15	

### Capítulo III. Resultados y análisis de resultados.

#### 3.1 Caracterización de metales base.

En la figura 11 podemos apreciar la caracterización de los metales base sin revelar su microestructura, se alcanzan a apreciar algunas partículas las cuales muy probablemente sean inclusiones, poros u óxidos ya que no tienen una morfología bien definida.

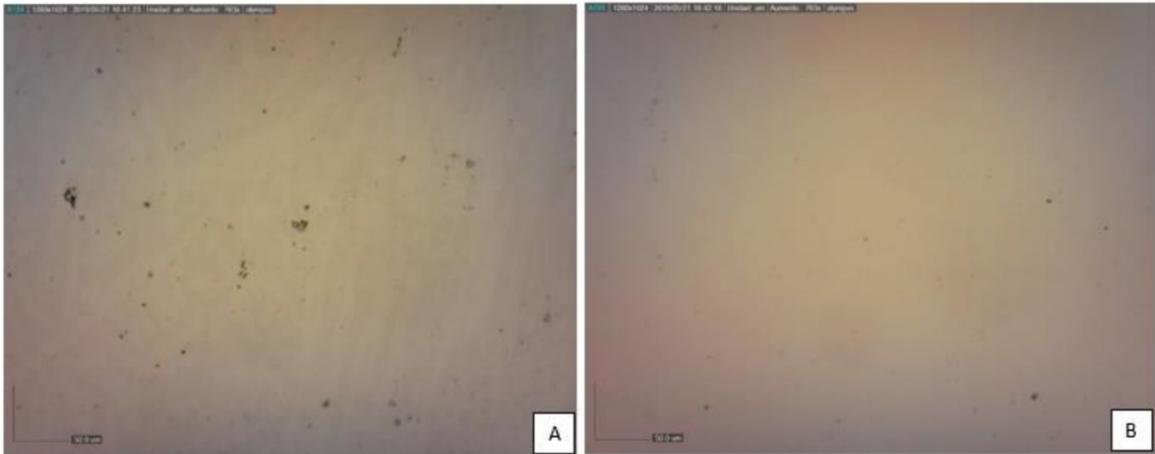


Figura 11. Materiales base 10x sin ataque químico. A) acero dúplex. B) acero inoxidable 304.

Al analizar las piezas con ataque químico (figura 12) podemos ver que la microestructura del acero dúplex es bastante distinta al acero inoxidable 304, ya que este presenta austenita en forma de agujas y la ferrita de coloración café, también en la figura 12 imagen A vemos como el ataque para el acero dúplex es selectivo pues colorea el material de acuerdo con los elementos aleantes que presenta, en el caso de la imagen B misma figura, vemos que el acero inoxidable 304 presenta una morfología típica de estos aceros pues notamos granos equiaxiales de austenita claramente, se aprecian maclas, esto se puede deber a su proceso de manufactura.

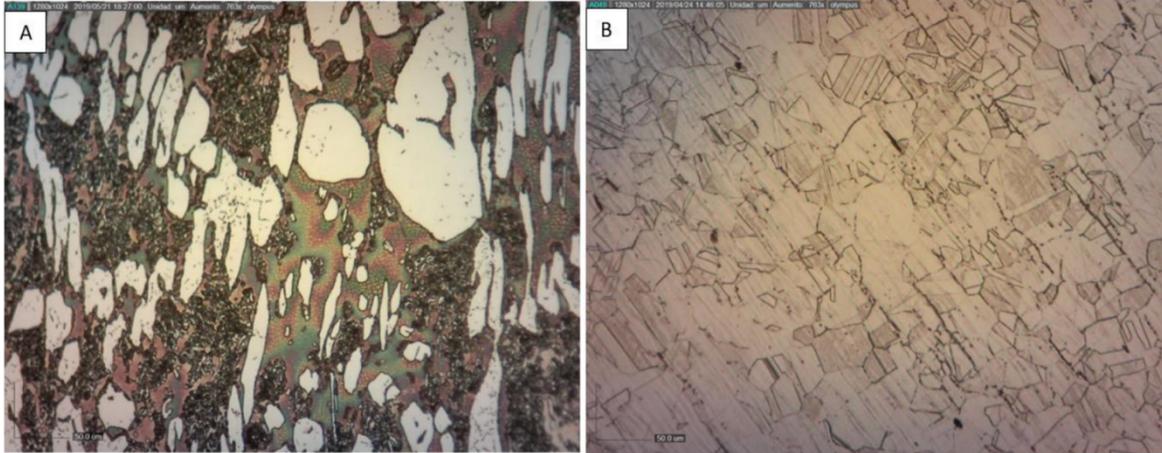


Figura 12. Materiales base con ataque químico. A) Acero Dúplex B) Acero inoxidable 304

### 3.2 Inspección visual

En la figura 13 se aprecian los cordones de soldadura realizados en las probetas que se emplearon en los ensayos metalográficos y de dureza. Los cordones presentan buena apariencia superficial y al realizar su inspección longitudinal se determina que hay una buena penetración en la unión (no se logra apreciar a simple vista una separación entre los metales base). En la determinación de la soldabilidad uno de los parámetros es obtener una buena penetración, parámetro que se logra en ambas probetas.



Figura 13. Cordones de soldadura, probeta empleada en el ensayo de micro y macro estructura, dureza Vickers y HRB.

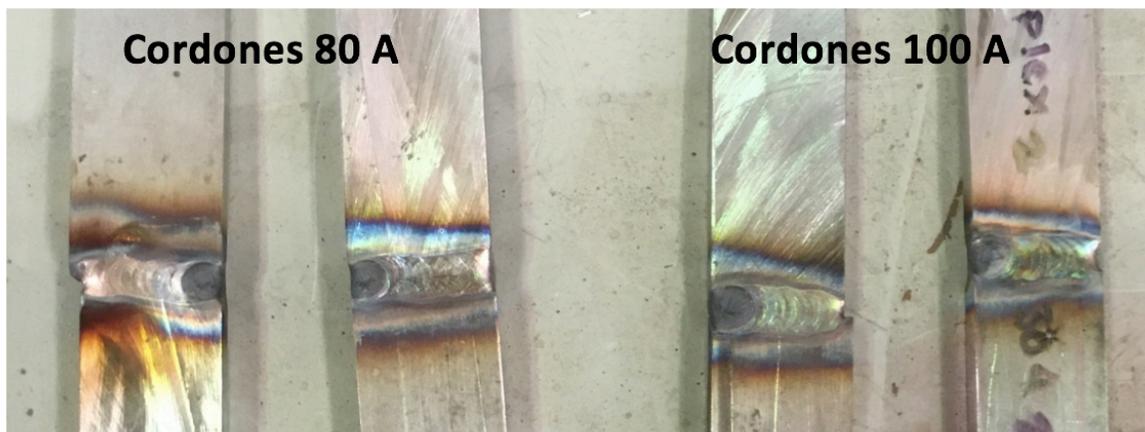
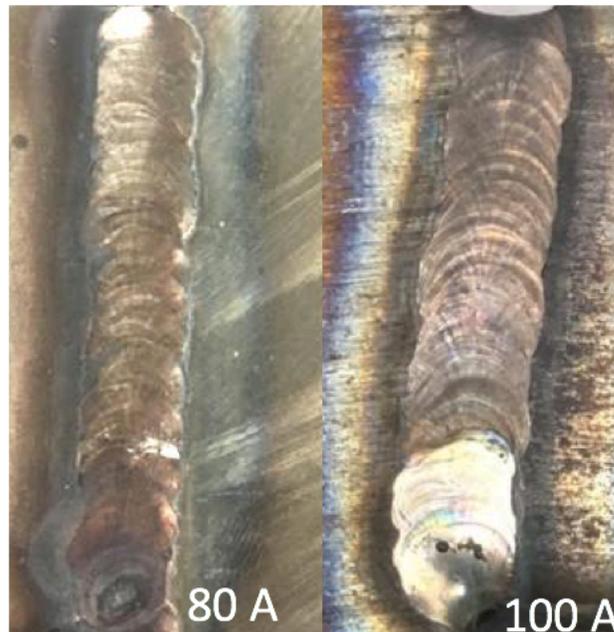


Figura 14. Cordones de soldadura de las probetas de ensayo de tensión.

Las cuatro probetas empleadas en el ensayo de tensión (Figura 14) muestran buen aspecto en el cordón de soldadura. En las probetas que se realizaron con una corriente de 80 A la soldadura muestra cordones delgados, en comparación con la soldadura realizada con corriente de 100 A, ver Figura 15. Una de las condiciones que dio este buen acabado es el efecto del flujo y post-flujo de gas inerte con el que se realizó la unión. Las probetas realizadas a ambas condiciones vistas lateralmente presentan un aspecto similar, pues no se distinguen los metales base uno de otro y se aprecia una buena unión.



*Figura 15. Cordones de soldadura en las probetas empleadas en pruebas electroquímicas.*

La figura 15, muestra los cordones de soldadura de las probetas utilizadas en las pruebas electroquímicas. Los cordones muestran similitud entre ellos y solo se aprecia una diferencia en el espesor del cordón. En el proceso de unión usando una corriente de 100 A se aprecia en la parte inferior pequeños puntos oscuros provocados por la interrupción de la soldadura, a pesar de esto no se encuentran mayores defectos. Ambos cordones de soldadura muestran buena penetración al ser observados longitudinalmente.

### 3.3 Prueba de líquidos penetrantes

El ensayo de líquidos penetrantes reveló que los cordones de soldadura que se realizaron tienen una buena calidad pues en el último paso (aplicación de revelador) ninguno mostró coloración importante.

Esto asegura que la soldadura se realizó de manera adecuada.

En la figura 16 se muestran los pasos de aplicación de la técnica de líquidos penetrantes. En el inciso A) en la aplicación del revelador se observa que no aparece ninguna coloración extraña o de alerta, mientras que el inciso B) solo muestra una pequeña imperfección en la parte inferior, la cual fue detectada desde la inspección visual, con los líquidos penetrantes, al no presentar coloración en dicha imperfección se sabe que no es un defecto de gran importancia sino solo superficial.

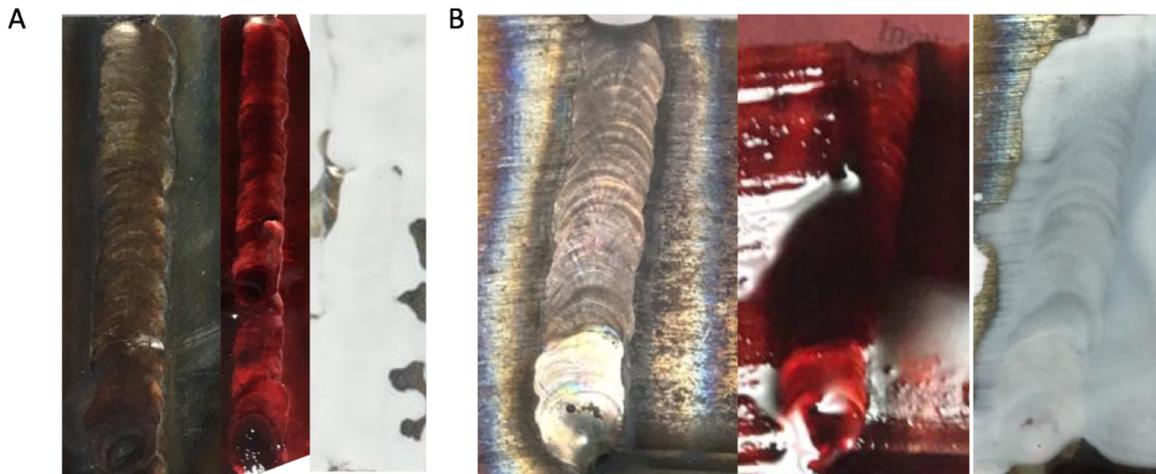


Figura 16. Ensayo de líquidos penetrantes a piezas soldadas. A) cordón realizado a 80 A. B) cordón realizado a 100 A.

### 3.4 Análisis Macroscópico

Al realizar los cortes transversales de las soldaduras realizadas y preparar las probetas para ser observadas macroscópicamente se aprecian diferencias entre los cordones de soldadura realizados a 80 y 100 A. En la figura 17 se observa que la unión no se realizó completamente pues en el centro de la pieza se encuentra una línea bastante notoria la cual separa el material base dúplex del acero inoxidable 304, los cordones de soldadura no alcanzan a penetrar hasta el centro y por ende la fusión de los metales base no se lleva a cabo a la mitad de la probeta.

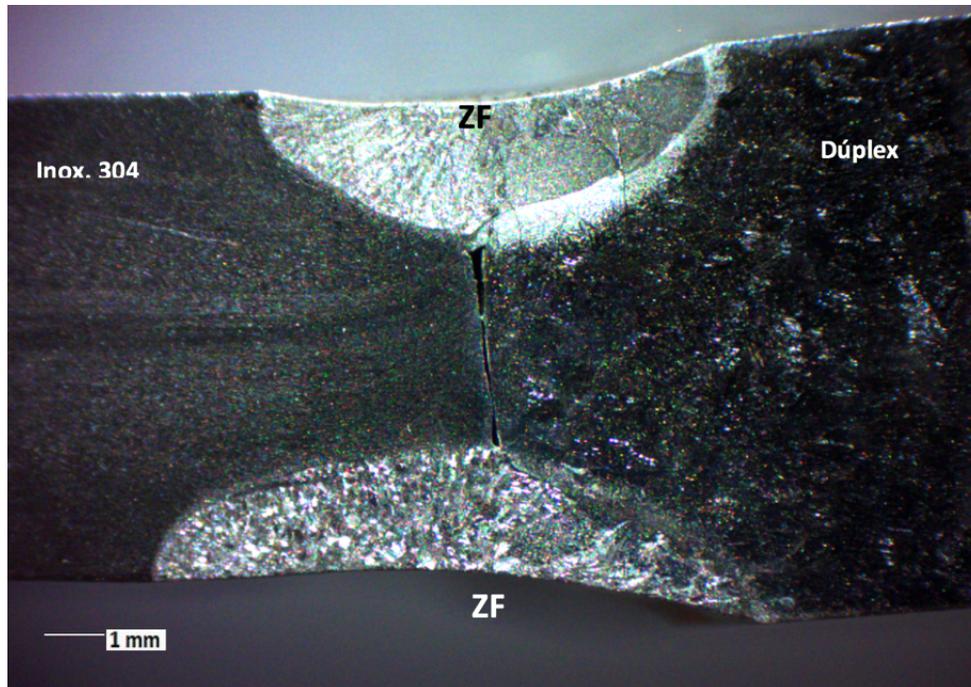


Figura 17 . Soldadura disímil realizada a 80 A, vista en microscopio estereográfico. (ZF=zona de fusión)

En la figura 18 se aprecia como a una mayor corriente (100 A) la penetración mejora pues a pesar de que los cordones no llegan hasta el centro los materiales muestran mejor unión entre ellos pues solo se nota una línea tenue (sin profundidad) que separa a ambos metales base. Observando los cordones de soldadura se aprecia una ligera corona de color distinto a su alrededor, esta es la zona afectada por el calor (ZAC), mediante este análisis se observa el impacto que la ZAC tiene de acuerdo a la condición de corriente con que fue realizada la soldadura.

En la soldadura realizada con una corriente de 80 A la zona afectada por el calor es más notoria e incluso más grande que la probeta realizada a una condición de corriente de 100 A, esto debido a que a pesar de haber empleado una corriente más baja al realizar la soldadura el tiempo que el electrodo se mantuvo sobre la pieza fue ligeramente mayor, esto para conseguir formar de manera adecuada la tina de fusión y lograr avanzar con el cordón de soldadura. Este tiempo de permanencia es importante pues se ve reflejado en la zona afectada por el calor, es por esto que la probeta de la figura 18 tiene una ZAC menor, pues la velocidad a la que se realizó el cordón fue mayor, gracias a que se generó mayor calor debido al aumento de corriente, por ende el impacto de calor no fue notorio en la interface entre el cordón y el metal base pues el electrodo se mantuvo menos tiempo sobre la pieza.

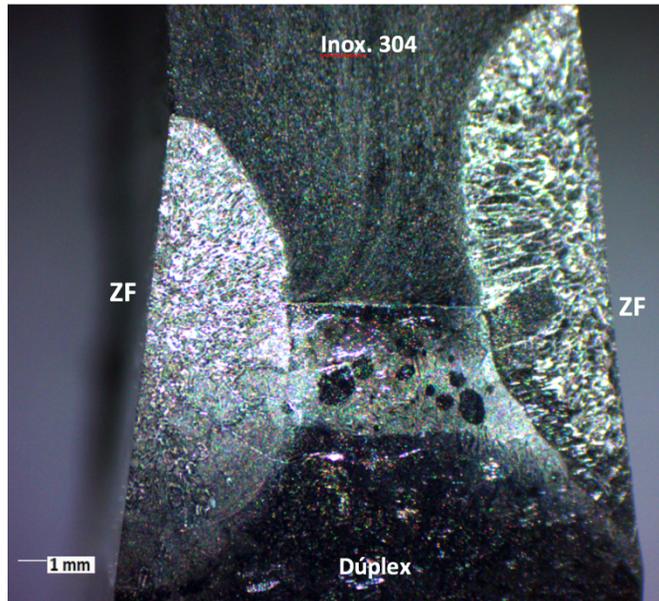


Figura 18. Soldadura disímil realizada a 100 A, vista en microscopio estereográfico. (ZF=zona de fusión)

Se aprecia el cambio que sufre el metal al ser sometido al proceso de soldadura, en las probetas a ambas condiciones de corriente eléctrica se observa como en los cordones de soldadura se definen dos regiones, la ZF correspondiente al acero inoxidable 304 contiene una mayor cantidad de líneas lo cual indican un crecimiento dendrítico debido a la solidificación, mientras que en la ZF correspondiente al acero dúplex estas líneas se notan más dispersas e incluso agrupando cierta área lo cual se refiere a la formación de granos columnares mayores. Gracias a esta especulación es posible inferir la manera en que cada metal base almacena y dispersa el calor generado por el proceso de soldadura.

### 3.5 Microscopía Óptica

Con la finalidad de observar con claridad la metalografía por color del acero dúplex se analizó primero la microestructura de las uniones solo con el ataque electrolítico del NaOH.

En la figura 19 se aprecia que la soldadura generada con una corriente de 80 A presenta una menor penetración, la línea que divide las 3 zonas (cordón-dúplex-inox. 304) es mucho más visible que la obtenida en el proceso realizado a 100 A, ya que en esta probeta la línea de separación se aprecia muy débil. Es fácil reconocer esta separación ya que solo el cordón de soldadura y el acero dúplex mostraron una microestructura después de ser atacados químicamente. La metalografía por color ayuda a identificar claramente las fases presentes en el acero dúplex ya que este tipo de ataque colorea la zona de carburos, dejando la matriz intacta [23]. En ambas soldaduras se aprecia coloración en el acero dúplex, sin embargo, en la probeta realizada a 100 A se ve una mayor coloración en la zona

del cordón, debido a que el calor generado es mayor en comparación con la probeta realizada a 80 A, lo que propicia más fácilmente la precipitación de elementos aleantes en forma de carburos o fases intermetálicas. En la figura 19 se aprecia el tamaño de las dendritas y fases del acero dúplex en la soldadura realizada a 100 A son mucho más pequeñas y abundantes en comparación con la soldadura realizada a 80 A.

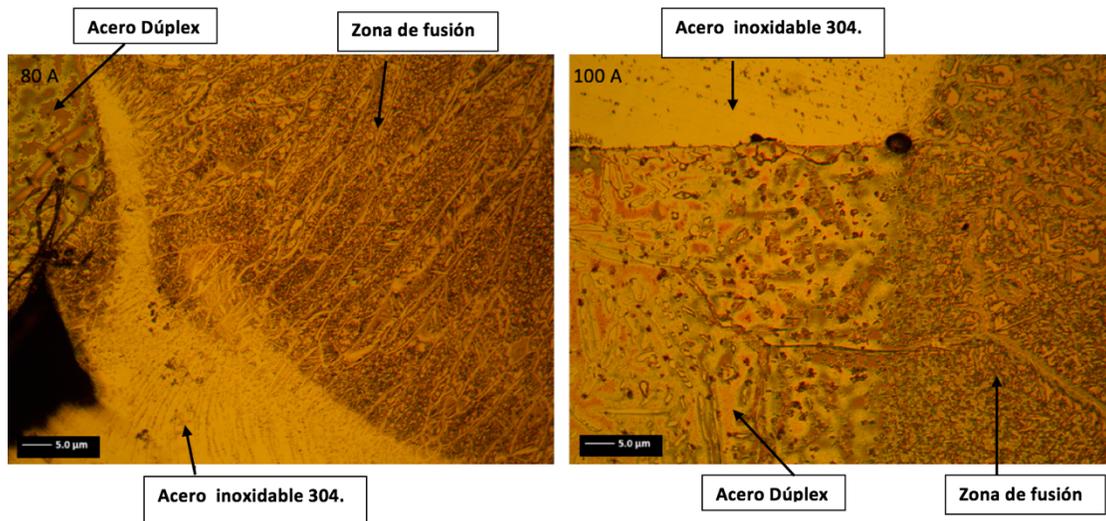


Figura 19. Microestructura de soldadura disímil realizada a 80 y 100 A únicamente con ataque de NaOH, 10x.

En la figura 20, probeta realizada a 80 A no presenta buena penetración ya que no existe fusión entre los metales base en el centro, por ende no están unidos por completo, esta falta de penetración es crítica, pues una falta de fusión en la soldadura es motivo de falla en un uso posterior.

Respecto a la microestructura del acero dúplex se observan las formas características de este acero ausferrítico, mientras que en el acero inoxidable 304 se aprecian granos equiaxiales típicos de este material. Lo interesante de este análisis es observar cómo se comportan los metales base en la zona de transición (metal base- zona de fusión), en la parte del cordón correspondiente al acero dúplex observamos como las dendritas que existen son grandes y las cuales parecieran ser límites de grano. El cordón del lado del acero inoxidable 304 tiene un comportamiento típico de un material sometido a un cambio de temperatura, se observa en la interface de la zona de fusión- acero 304, como los granos del acero inoxidable son más pequeños y conforme estos se alejan del cordón crecen y apreciamos unas líneas de flujo las cuales son atraídas hacia la zona del cordón.

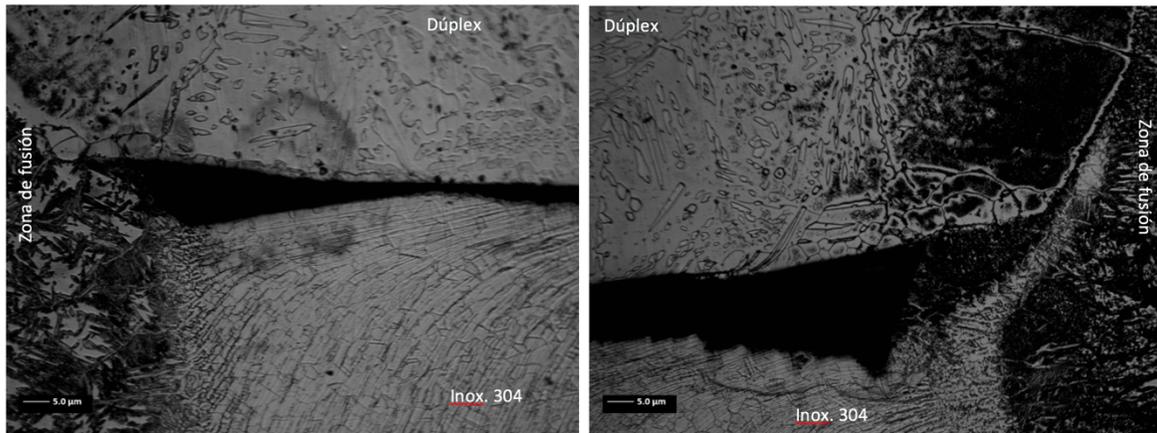


Figura 20. Cordón de soldadura realizado a 80 A, ambos aceros con ataque químico. Microscopio óptico 10x.

En la probeta soldada a 100 A (figura 21) se aprecia claramente una mejora en la penetración y en la unión entre los metales, pues la línea que los separa no se observa tan profunda y en el centro se observa una ligera fusión entre los metales. Al igual que en la probeta realizada a 80 A, el cordón del lado del acero dúplex aparece formando granos y en la zona de transición (cordón – dúplex) se observan mayor cantidad de fases características de este acero. El cordón correspondiente al acero inoxidable 304, muestra dendritas mucho más marcadas y en mayor cantidad, estas crecen del centro hacia el extremo de la soldadura. En la zona de transición (cordón- inoxidable 304) comienzan a aparecer pequeños granos equiaxiales que son más grandes conforme se alejan de la zona de fusión. A diferencia de la probeta realizada a 80 A, las líneas de calor presentes en el inoxidable 304 son más marcadas, y siguen la misma dirección.

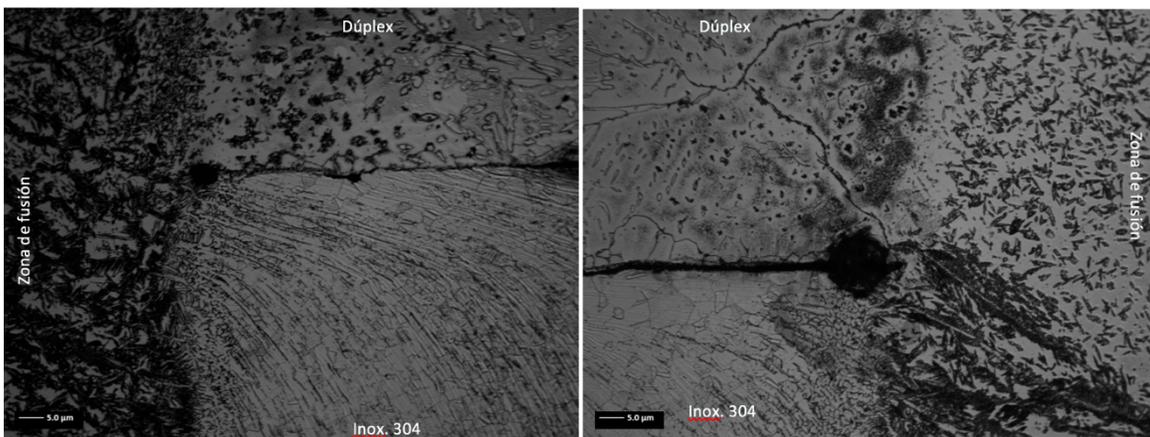


Figura 21. Cordón de soldadura realizado a 100 A, ambos aceros con ataque químico. Microscopio óptico 10x.

En la figura 22 y 23 se observa con más claridad la zona afectada térmicamente respecto a cada metal base. Se aprecian las líneas de flujo de calor más pronunciadas en la probeta realizada a 100 A. En la ZAC perteneciente al acero dúplex, se aprecia una diferencia en la microestructura, esta es muy diferente a la del metal base dúplex. En cambio la ZAC perteneciente al acero dúplex en la probeta realizada a 80 A, si muestra similitud micro estructural con el acero dúplex, esto se debe nuevamente a la permanencia del electrodo en la pieza.

En la figura 22 se aprecian granos equiaxiales de menor tamaño en comparación con el metal base inoxidable 304, mientras que en la ZAC perteneciente al acero dúplex aparece una microestructura igual al acero dúplex solo mostrando variación en el tamaño.

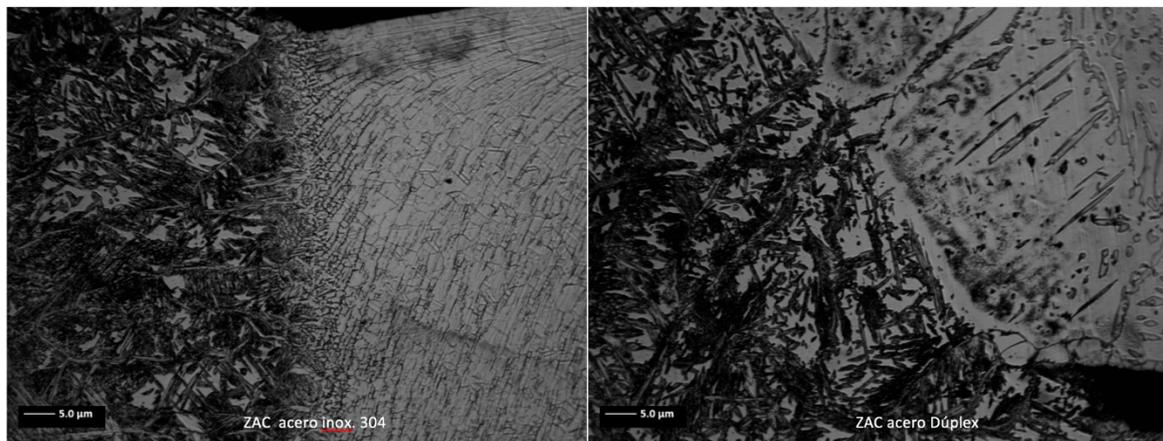


Figura 22. Zona afectada por el calor, soldadura realizada a 80 A. Microscopio óptico 10x.

En la figura 23, en la ZAC del acero inoxidable dúplex se aprecian nuevamente granos equiaxiados de menor tamaño respecto al metal base, en la ZAC del acero dúplex podemos observar como la microestructura obtenida es muy distinta al metal base (acero dúplex), se aprecia una matriz de austenita con distintas colonias posiblemente de ferrita que apenas están en crecimiento, esto ocurre debido a que al emplear una corriente mayor la tina de fusión se crea más rápido en comparación con la corriente más baja y la realización del cordón se lleva a acabo más rápido, debido a esto el enfriamiento es más súbito y no da tiempo de que los granos nucleen y crezcan hasta tener una morfología similar al metal base.

En los cordones realizados a distintas corrientes eléctricas se aprecian dendritas de solidificación en la ZF y granos columnares.

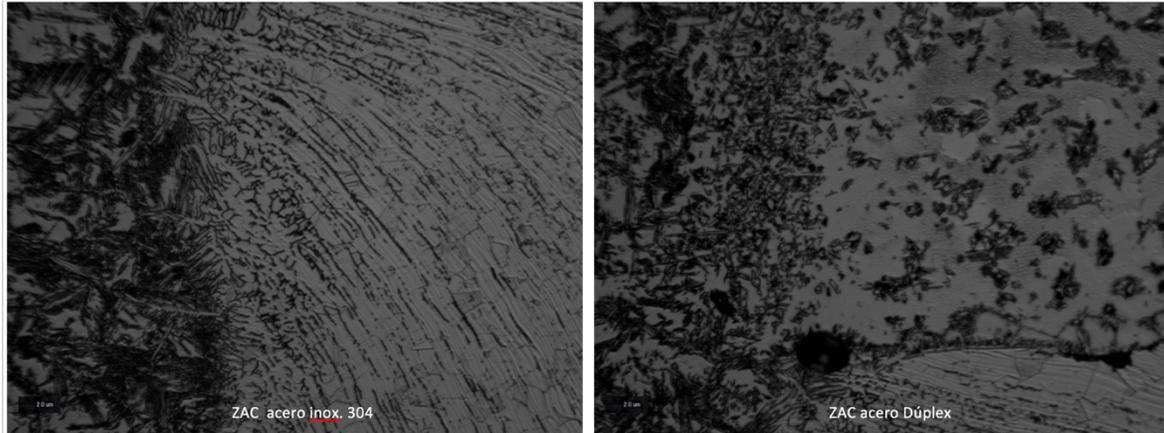


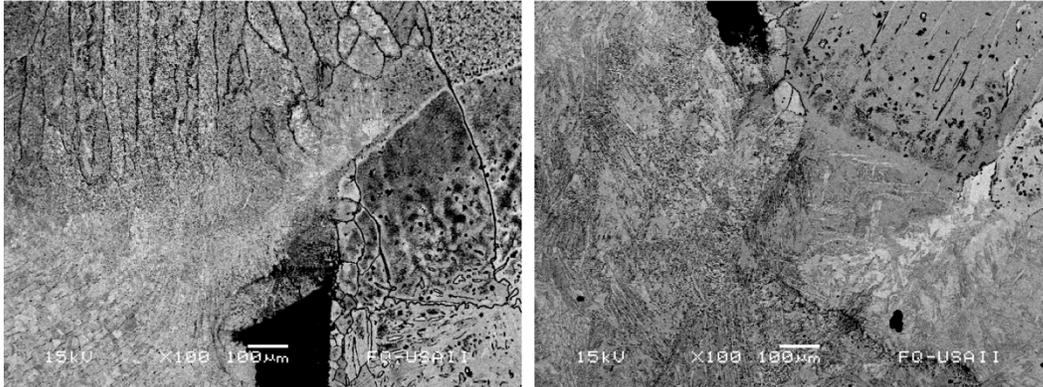
Figura 23. Zona afectada por el calor, soldadura realizada a 100 A. Microscopio óptico 20x

### 3.6 Microscopía de barrido electrónico (MEB).

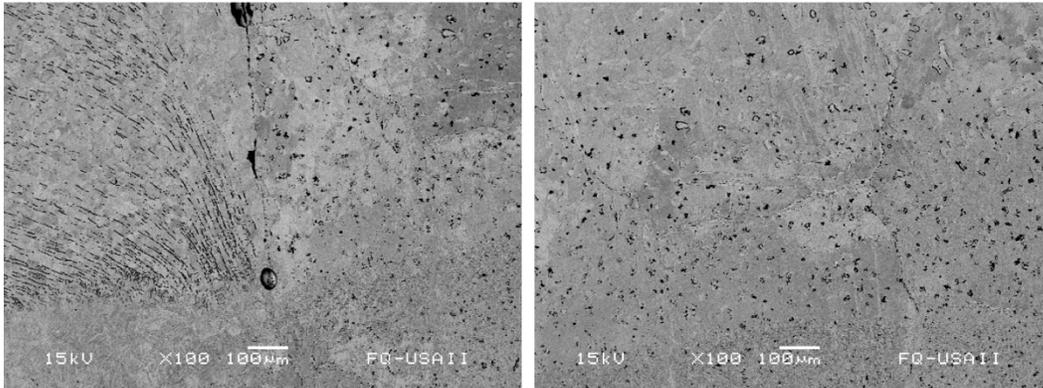
En la figura 24 se aprecian la ZAC de las soldaduras realizadas a distintas corrientes eléctricas, en la probeta 1 no se muestra gran cambio en la microestructura en la ZAC, por parte del acero dúplex la microestructura es muy parecida al MB mientras que del lado del acero inoxidable 304 los granos se ven de un tamaño pequeño en comparación con el MB.

En la probeta 2, la microestructura de la ZAC del lado del acero dúplex, si muestra diferencia en su morfología comparada con el MB, lo cual se debe al tiempo de enfriamiento de la soldadura, debido a que la corriente eléctrica es mayor el cordón de soldadura se realiza más rápido, es por esto que no existe el tiempo suficiente para que la microestructura crezca y adquiera una morfología similar a la del material base, efecto que en la soldadura realizada a 80 A si se aprecia. La ZAC por parte del acero inoxidable 304 muestra una microestructura de granos equiaxiados con granos más pequeños en comparación con la probeta 1.

**Probeta 1. Soldadura realizada con corriente de 80 A.**



**Probeta 2. Soldadura realizada con corriente de 100 A.**



*Figura 24. MEB de soldaduras realizadas a 80 y 100 A.*

### 3.7 Espectroscopía de rayos x de energía dispersa (EDS)

Mediante la técnica de EDS se observa que las probetas soldadas a distintas condiciones tienen composición química similar, en ninguna de estas se encontró alguna fase característica del acero dúplex que perjudicara las propiedades mecánicas. Fue posible hacer análisis puntuales en las zonas de interés: zona de fusión (ZF), zona afectada por calor (ZAC) y metales base (MB), zonas en las que no se encontró alguna anomalía en particular.

Se observa en ambas probetas (figura 25 y 26) que el Cr se encuentra en mayor abundancia en la zona del cordón y el metal base dúplex, esto debido a que el acero dúplex contiene mayor contenido de este elemento en su composición. Con respecto a las fases que se pueden formar en el acero dúplex no se encontró ninguna en particular lo que es favorable pues posiblemente no hubo afectación en las propiedades mecánicas.

Algo de suma importancia en la soldadura es que muchas veces pequeñas partículas del electrodo con el que se realizan se deposita en el cordón, en ninguna de las muestras analizadas aparece la existencia de partículas de W, pertenecientes al electrodo empleado, por ende se puede decir que las soldaduras están limpias y no se modificó la composición química de forma considerable.

También se realizaron análisis puntuales a los metales base, con la finalidad de tener la composición química que tenían antes del proceso de soldadura y si esta había sido modificada después del proceso de soldadura, pero de acuerdo a los análisis de cada zona, las composiciones químicas se mantienen en el rango inicial sin cambio considerable.

De acuerdo con los contenidos de elementos aleantes en los análisis podemos clasificar al acero dúplex empleado perteneciente a la serie 2205 (tabla 3).

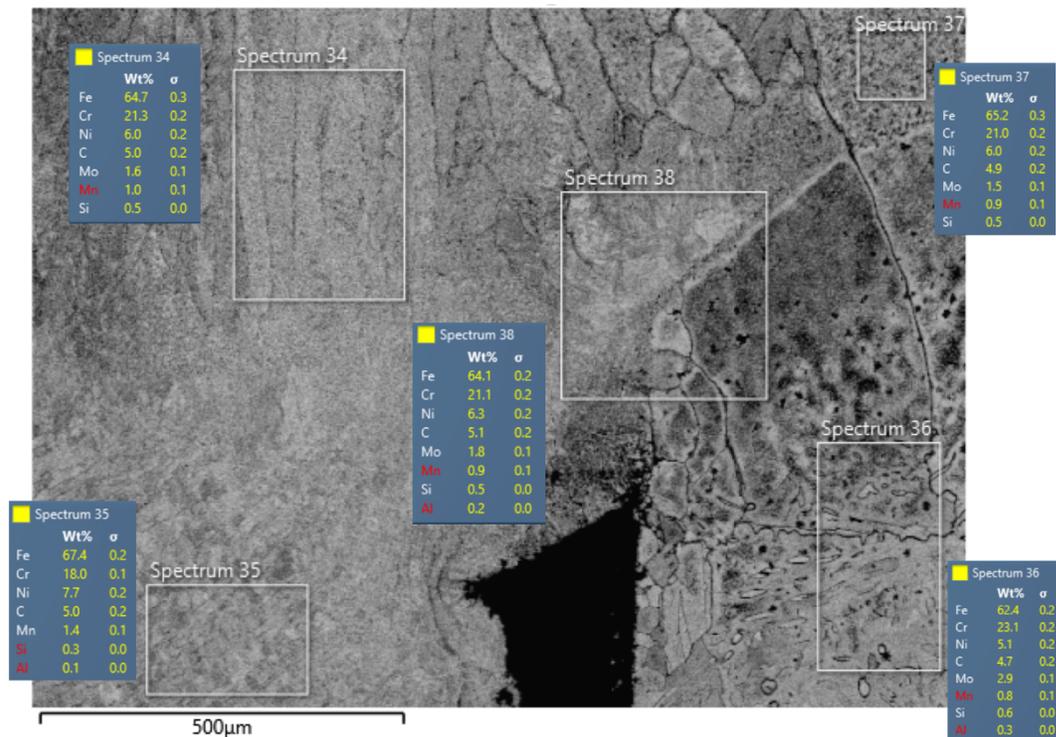


Figura 25. Análisis EDS para probeta soldada a 80 A.

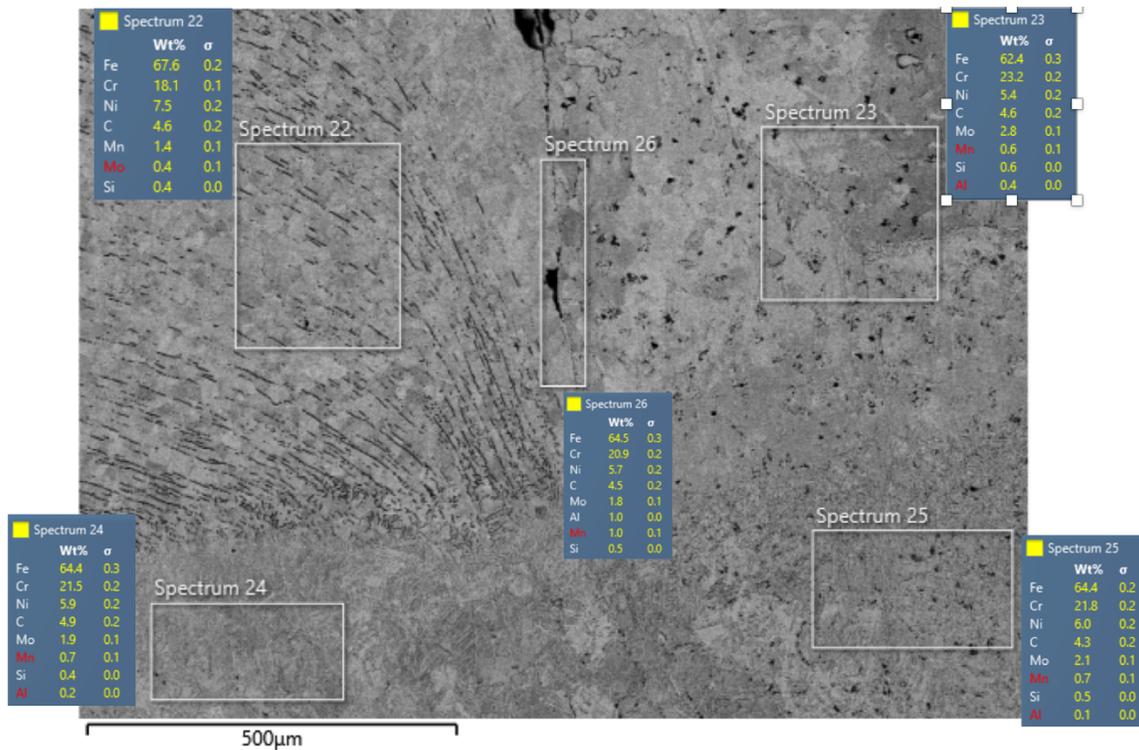


Figura 26. Análisis EDS para probeta soldada a 100 A.

### 3.8 Ensayo de tensión

En la tabla 12 se muestran los valores obtenidos de la curva esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas a distintas condiciones, así como los valores reportados en la literatura de los metales base.

Las probetas mostraron una disminución en la carga de ruptura como en el límite elástico respecto a los metales base, a pesar de esta disminución la probeta realizada a 100 A mostró un mejor comportamiento en la gráfica esfuerzo deformación (figura 27) respecto a la probeta realizada a 80 A.

Tabla 12. Comparación de propiedades de ensayo de tracción con metales base.

Material	Acero dúplex	Acero inox. 304	Soldadura 80 A (probeta 1)	Soldadura 100 A (probeta 2)
Carga ruptura (MPa)	630 – 730	540 / 750	426	427
Limite elástico [MPa]	400 - 530	230	17	206

El límite elástico de la probeta 2 es mayor respecto a la probeta 1, lo que asegura que la pieza soldada no sufrirá una deformación plástica (permanente) al ser sometida a un esfuerzo mucho más bajo respecto a los metales base, esto es de importancia debido a que al realizar una soldadura se pretende que las propiedades del material no sean inferiores a la de los metales base.

La ruptura de ambas probetas de tensión ocurrió en la zona de la soldadura, aunque los materiales lograron ser unidos satisfactoriamente sin material de aporte, la penetración no fue suficiente para superar el límite de ruptura de los metales base, los valores de ruptura de ambas probetas son prácticamente el mismo, sin embargo en la figura 28 se aprecia mayor penetración en la probeta 2.

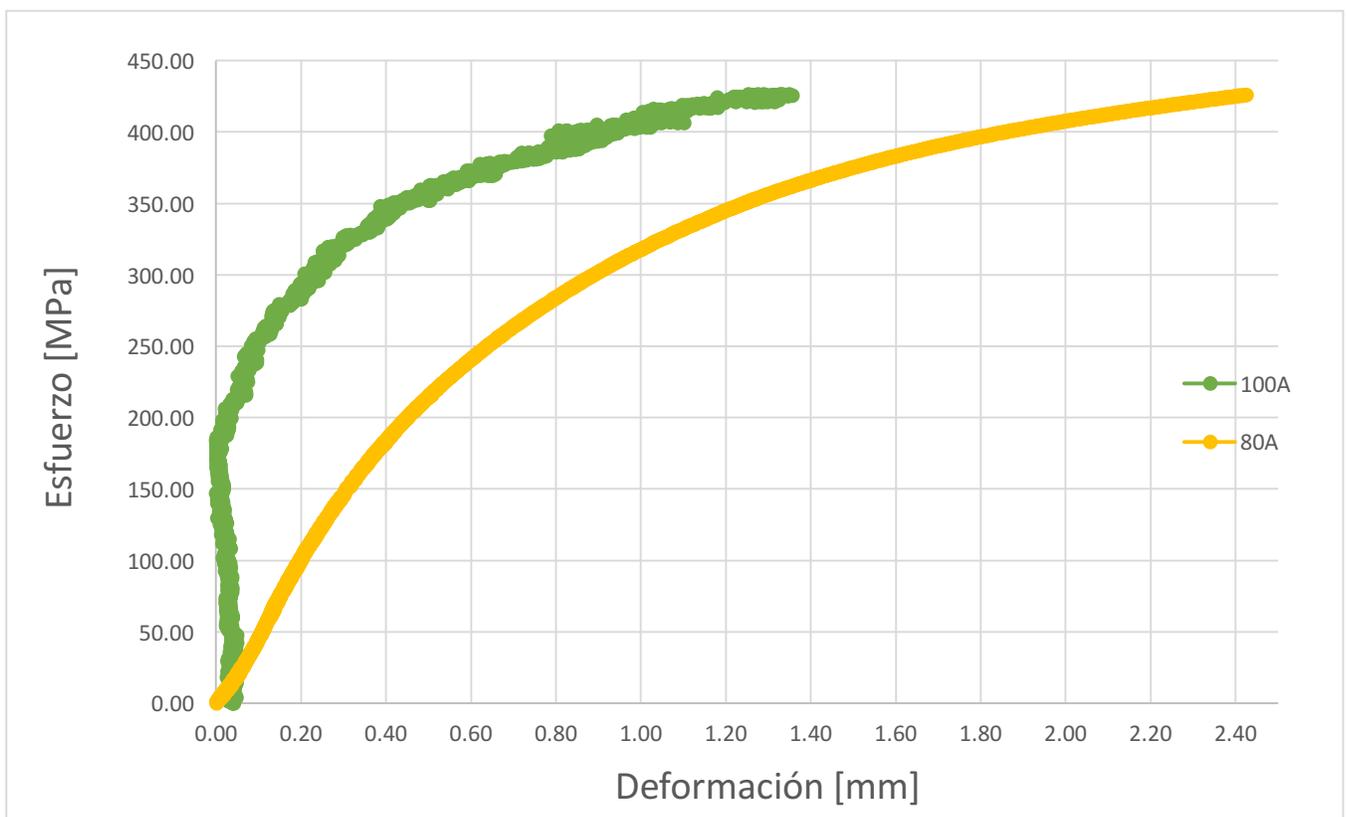
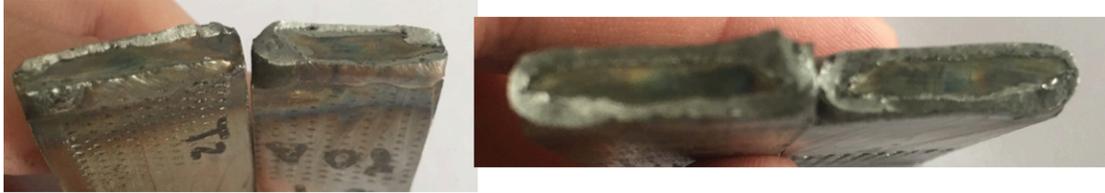


Figura 27. Curvas esfuerzo vs deformación de las probetas soldadas a 80 y 100 A.

#### Probeta 1. Soldadura realizada a 80 A



#### Probeta 2. Soldadura realizada a 100 A



Figura 28. Ruptura de las probetas de tensión soldadas a distintas condiciones.

Además de la diferencia de penetración en la figura 28, se aprecia el tipo de factura y deformación que los cordones de soldadura sufrieron, en ambas se observa una deformación plástica, y a pesar de que se muestra más esta característica en la probeta 2 debido a la penetración, ambas presentan una fractura mayoritariamente dúctil.

### 3.9 Micro dureza

Los valores obtenidos del perfil de microdureza se muestran en la tabla 13, el perfil se divide en las tres principales zonas de la soldadura (MB, ZAC y ZF).

De las durezas obtenidas de los metales base se observa como la dureza del acero dúplex es mayor a la dureza del acero inoxidable 304, lo cual corresponde a lo reportado en la literatura, debido a la cantidad de elementos aleantes y microestructura que este acero presenta.

Al llegar a la zona afectada por el calor del lado del acero dúplex (ZAC-dúplex) se observa como las durezas comienzan a disminuir respecto a la dureza del acero dúplex, al llegar a la zona de fusión, las durezas nuevamente aumentan en ambas condiciones, de nuevo se aprecia una disminución en la zona afectada por el calor del lado del acero inoxidable 304 hasta llegar a la dureza del metal base 304.

Los material al ser unidos por el proceso de soldadura, en la zona del cordón sufren fusión, al ser un enfriamiento fuera del equilibrio se obtiene una morfología dendrítica en esta zona, el material que no se encuentra directamente en contacto con la tina de fusión solo se ve afectado ligeramente por el calor, a esto lo llamamos ZAC. Conforme se acercan los metales base el enfriamiento es más lento lo que da lugar a que los granos tengan más tiempo para crecer, de esta manera nuclean

granos pequeños en la zona afectada por el calor los cuales van aumentando su tamaño conforme se alejan del cordón de soldadura. Por ende las variaciones de dureza obtenidas son producto de las diferentes microestructuras en las zonas de soldadura.

*Tabla 13. Perfil de dureza Vickers a lo largo de la soldadura disímil realizada a 80 y 100 A.*

D [mm]	HV 80 <sup>a</sup>		HV 100 A			
0		200		211		
2		225		244		
4		195		197		
6		Dúplex		217	Dúplex	217
8		182		208		
10		197		221		
12		ZAC- dúplex		183	ZAC-dúplex	204
14		216		190		
16		235		202		
18		226		204		
20		234		238		
22		ZF		240	ZF	225
24		208		241		
26		197		209		
28		ZAC-304		196	ZAC-304	201
30		200		248		
32		176		171		
34		185		190		
36		304		190	304	187

En la figura 28 se observa de manera ilustrativa el comportamiento de durezas que se obtuvo en las mediciones Vickers. A pesar de que ambas probetas siguen la misma tendencia se puede ver como la probeta realizada a 80 A tiene un aumento de dureza más pronunciado en la zona de fusión, mientras que la probeta realizada a 100 A tiene un cambio progresivo.

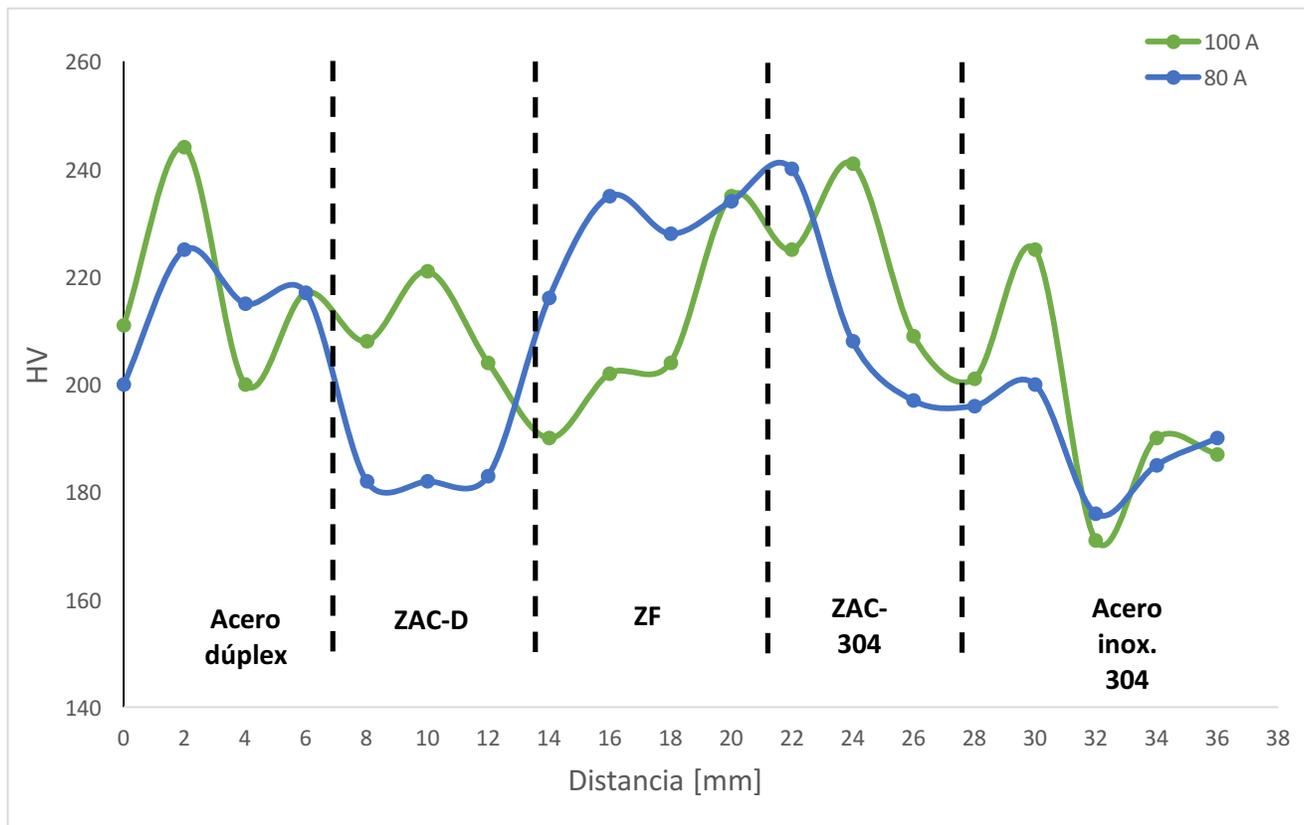


Figura 29. HV vs distancia a lo largo de la soldadura disímil a 80 y 100 A.

### 3.10 Macro dureza

En la tabla 14 se muestran los valores de durezas obtenidos en las soldaduras realizadas a 80 y 100 A. Los resultados de dureza HRB muestran similitud con la tendencia de microdureza Vickers, el cordón de soldadura realizado con corriente de 100 A presenta una dureza ligeramente más baja en comparación con la de 80 A debido a que es sometido a una temperatura mayor y la difusión del cromo como elemento aleante es mayor, provocando una distribución más homogénea de este elemento en esta zona haciendo que la propiedad mecánica del material disminuya. Debido a que la dureza obtenida en la zona de fusión en la condición de 100 A no es más elevada que el acero dúplex, la soldadura será menos susceptible a fragilizarse y ser causante de falla.

En el caso de la soldadura realizada a 100 A las durezas de los metales base son ligeramente mayores que la soldadura realizada a 80 A, esto se puede deber a que al estar sometida a una mayor temperatura la cantidad de carburos incrementa así como afectación en la morfología de la microestructura.

Tabla 14. Dureza Rockwell B para la soldadura disímil realizada a 80 y 100 A.

HRB			
Corriente [A]	dúplex	cordón	inox. 304
80	93.23	95.05	82.33
100	99.03	93.25	87.13

### 3.13 Curvas potencial – tiempo.

En la figura 30 se puede observar que el acero dúplex tiene una mayor estabilidad en el medio elegido en comparación con el acero inoxidable 304. La soldadura realizada a 80 A tiene un comportamiento bastante similar al acero dúplex, lo que es de importancia pues este no sufrirá degradación antes que los metales base. Ambos aceros inoxidables (dúplex y 304) mostraron un comportamiento catódico, sin embargo el cordón realizado a 100 A tiene más marcada esta tendencia debido a que pierde cromo en la superficie y su microestructura principalmente en la ZAC se ve modificada haciéndolo más susceptible a sufrir corrosión, caso contrario a lo que le ocurre al cordón realizado a 80 A.

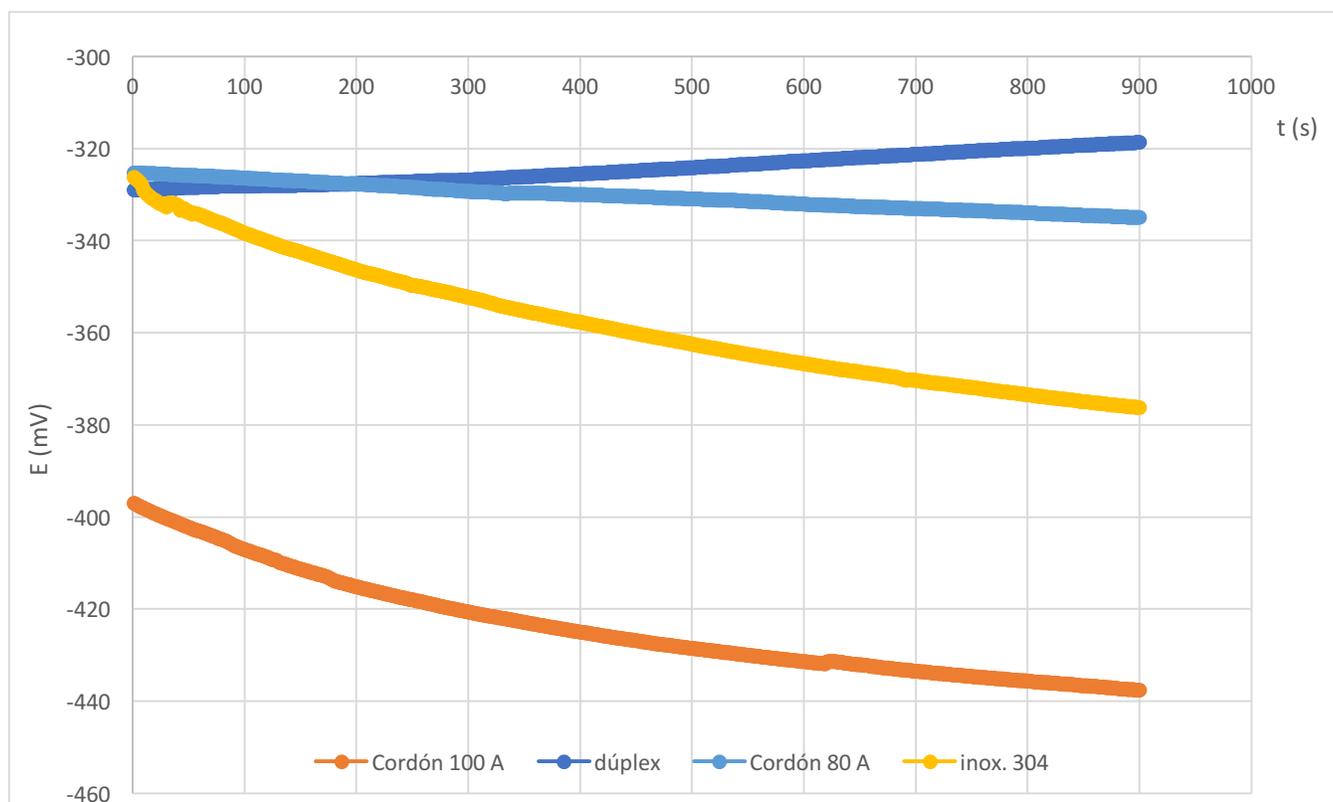


Figura 30. Curvas potencial - tiempo de metales base y soldaduras realizadas a 80 y 100 A.

### 3.12 Resistencia a la polarización (Rp)

En la tabla 15 se aprecian los valores de  $i_{corr}$  y velocidad de corrosión de los metales base y soldaduras realizadas a distintas condiciones, al igual que en la prueba de curvas de polarización observamos que la soldadura realizada con una corriente de 100 A sufrirá degradación antes que la soldadura realizada a 80 A y los metales base. De nuevo, esto se debe a la microestructura obtenida en la ZAC y a las pilas electroquímicas que se forman en el cordón de soldadura de 100 A.

*Tabla 15.  $i_{corr}$  y velocidad de corrosión obtenidas de la prueba resistencia a la polarización.*

Rp		
	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	V corr (mpy)
Dúplex	1.82964E-06	0.8386
Inox.304	7.76259E-06	3.5579
soldadura 80A	4.30833E-06	1.9747
soldadura 100A	1.23641E-05	5.6669

### 3.11 Curvas de polarización

En la figura 31 se puede observar como las curvas de Tafel muestran la misma tendencia, una disolución del material en cada una de las curvas así como una diferencia en la densidad de corriente de al menos un orden de magnitud teniendo en cuenta que el cordón realizado a 100 A y el material de acero inoxidable 304 son más susceptibles a la corrosión, se puede apreciar en la tabla 16 las velocidades de corrosión obtenidas.

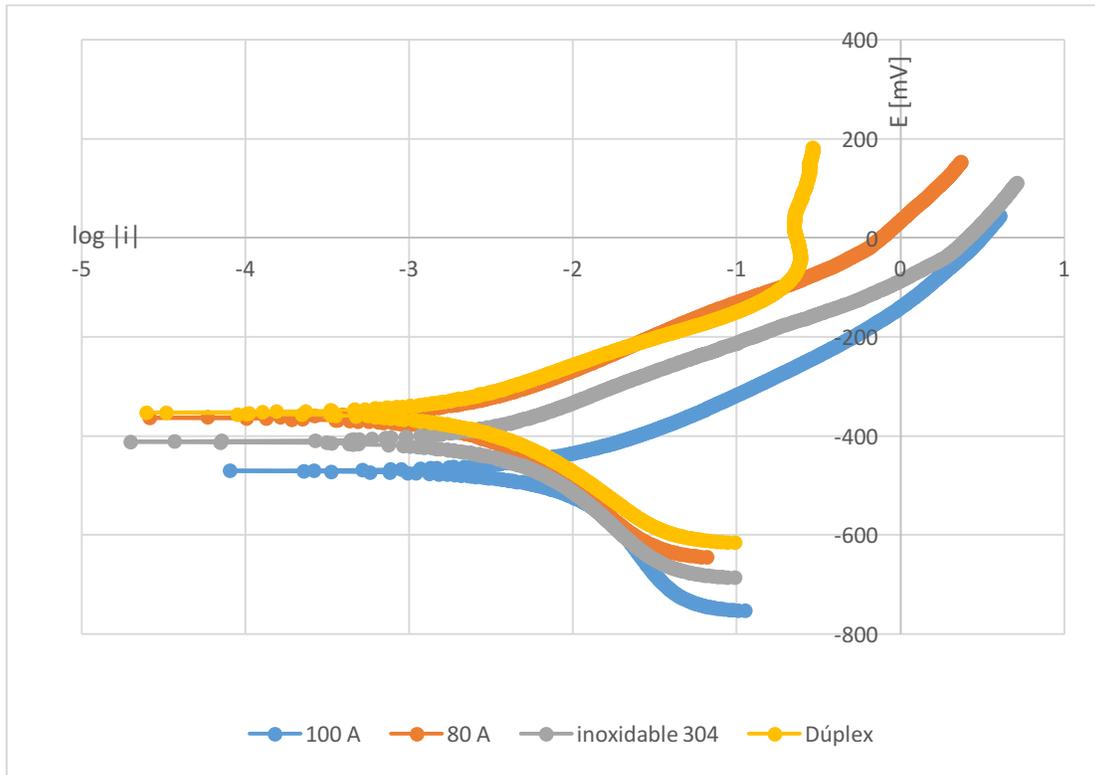


Figura 31. Curvas de polarización obtenidas de los metales base y soldaduras realizadas a 80 y 100 A.

La  $i_c$  de corrosión como la velocidad de corrosión son similares entre ellas excepto en la soldadura realizada a 100 A esto debido a que al aplicar una corriente de soldadura mayor, la microestructura en la ZAC es distinta a la del acero dúplex, en comparación la ZAC de la soldadura realizada a 80 A, pues está al sufrir un enfriamiento más lento muestra una similitud en la microestructura con el acero dúplex. Debido a la diferencia microestructural en la ZAC de la soldadura a 100 A, es posible que exista una mayor formación de pilas en esa zona lo que hace que la velocidad de corrosión y la  $i_{corr}$  incrementen, indicándonos que la soldadura realizada a 100 A sufrirá más rápido una degradación en comparación con los metales base y la soldadura realizada a 80 A.

Tabla 16.  $i_{corr}$  y velocidad de corrosión obtenidas de la prueba curvas de polarización (Tafel).

Material	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_{corr}$ (mpy)
Dúplex	0.0025	1.1513
Inox.304	0.0033	1.5177
soldadura 80A	0.0026	1.2055
soldadura 100A	0.0100	4.5833

## Capítulo IV. Conclusiones.

### 4.1 conclusiones Particulares

Las soldaduras disimiles realizadas a distinta corriente eléctrica (80 y 100 A) tienen un buen aspecto superficial y penetración a pesar de no haber sido unidas con material de aporte.

Una mayor corriente eléctrica genera un cordón de soldadura más ancho y grueso, por ende una mejor penetración y unión de los materiales base.

La soldadura realizada a 100 A tiene una menor afectación por el calor debido a que el tiempo de permanencia del electrodo fue menor, en comparación con la probeta soldada a 80 A

La microestructura de la probeta realizada a 100 A tiene una estructura más fina y uniforme en la zona de fusión, en comparación con la probeta realizada a 80 A, debido a esto la dureza HRB obtenida es homogéneas y tienen menos cambios bruscos a lo largo de la soldadura, hecho que se confirma en las micro durezas Vickers obtenidas, de acuerdo a los cambios micro estructurales la dureza sufre un aumento en la zona de fusión de ambos materiales base.

Las corrientes seleccionadas para realizar las soldaduras disimiles son aptas para realizar una buena soldadura ya que ninguna genera las condiciones necesarias para precipitar intermetálicos o fases que perjudiquen las propiedades del material base. En ambas condiciones se tienen composiciones químicas similares y congruentes respecto a las de los metales base.

La probeta realizada a 100 A muestra un mejor comportamiento en la curva esfuerzo deformación, a esta corriente las propiedades de los metales base no se ven afectadas y nos indican un buen rendimiento de la soldadura.

Respecto a las pruebas electroquímicas la probeta realizada a 80 A muestra mejores resultados pues esta no sufrirá una degradación más rápida que la de los metales base, esto debido al tiempo de solidificación y morfología similar a los metales base obtenida en la zona afectada por calor.

### 4.2 Conclusión general

La soldadura disímil realizada a una corriente de 100 A presenta una mejora tanto en la soldadura como en las propiedades mecánicas, comparada con la probeta a 80 A.

La condición óptima para soldar un material de dicho espesor (6 mm) es una corriente de 100 A, de esta manera la probeta obtendrá una mejor unión entre los materiales y sus propiedades no generarán tal cambio que perjudique las condiciones iniciales del material base, por ende estos podrán seguir cumpliendo su función.

A pesar de que la soldadura de 100 A genera mejores resultados en las propiedades mecánicas, en las pruebas electroquímicas la soldadura a 80 A es la más adecuada pues sus valores de degradación se encuentran entre la de los metales base. Debido a esto es importante saber en qué medio será aplicada la soldadura para así elegir una corriente eléctrica al realizarla, sin embargo lo ideal sería dar un mayor tiempo de enfriamiento a la soldadura realizada a 100 A con el fin de homogenizar la ZAC.

## Capítulo V. Bibliografía.

- [1 manual indura] Mauricio Ibarra Echeverría, Eduardo Núñez Solís, José Miguel Ibáñez. Manual Aceros inoxidables, Indursa, Av. Las Américas 585, Chile, 2010.
- [2 NKS] <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/> consulta: noviembre 2019
- [3 manual dúplex] Directrices prácticas para la fabricación de los aceros inoxidables dúplex. International Molybdenum Association (IMOA), Londres, Reino Unido, 2012.
- [4 tesis inglés] Jalal Alsarraf. Hydrogen embrittlement susceptibility of super dúplex stainless steels. Cranfield university, April 2010.
- [5 fases en acero dúplex] M. P. Rodríguez, J. F. Almagro, J. Botella, P. Valerga. Cinéticas de transformación de fases a 850 °C de aceros inoxidables dúplex clásicos (2205 y 2507) y de uno nuevo de bajo contenido en níquel y alto en manganeso (DBNi), Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 43 [2] 237-242 (2004).
- [6 formación de fase sigma] J. L. Garin, R. L. Mannheim, M. A. Camuss. Formación de fases sigma en uniones soldadas de acero inoxidable súper dúplex fundido, Revista de metalurgia, 47 (4), Julio-Agosto, 293-306, 2011.
- [7 soldadura Tig de ac inox] Carlos Alonso Marcos, Soldadura TIG de acero inoxidable, Ediciones Nobel, S.A., España, 2014.
- [8 metalografía] F. J. Gil Mur, J. M. Manero Planella, Metalografía, Ediciones UPC, Barcelona, 2005.
- [9 cap II] [https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/1767/02\\_CAPITULO\\_II.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/1767/02_CAPITULO_II.pdf?sequence=3&isAllowed=y) . consulta: noviembre 2019
- [10 eag] <https://www.eag.com/es/techniques/spectroscopy/energy-dispersive-x-ray-spectroscopy-eds/> . Consulta: noviembre 2019
- [11 cenim] Seminario PARALAB-CENIM (CSIC). Análisis químico de materiales metálicos e inorgánicos por técnicas de hispa-OES, XRF y LIBS, Madrid, 2016.
- [12 metalurgia mecánica] Jorge Luis González Velázquez, Metalurgia mecánica , Limusa Noriega editores, México, 2003.
- [13 liqP] Raquel Serrano, Ensayos no destructivos: Líquidos penetrantes, 2013.
- [14 técnica y práctica de la soldadura] Joseph W. Giachino, William Weeks. Técnica y práctica de la soldadura. Editorial Reverte, Barcelona. España, 2007.
- [15 manufactura, ing y tec] Serope Kalpakjian. Manufactura, ingeniería y tecnología, Pearson educación, México, 2002, 1176.
- [16 norma E8] ASTM E8M-04, Standard Test Methods fo Tension Testing of Metallic Materials, International metric, United States.

- [28-17] Y. Meas, J. Uruchurtu, A. Martínez. “Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión”, Universidad Nacional Autónoma de México, Editor J. Genescá, 2002.
- [31-18] M. G. Fontana. Corrosion Engineering. Ed. Mc Graw-Hill, Nueva York, 1986.
- [33-19] U. R. Evans. An introduction to metallic Corrosion. De. Arnold Londres. 1981.
- [68-20] Y. Meas, J. Uruchurtu, A. Martínez. “Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión”, Universidad Nacional Autónoma de México, Editor J. Genescá, 2002.
- [64-21] C. Wagner, W. Traud. Z. Elektrochem. 44 (1938) 39.
- [69-22] J. A. González. “Control de la corrosión estudio y medida por técnicas electroquímicas”, CSIC, Madrid 1989.
- [17-23chapitas] <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/LPR.PDF> .  
Consulta: noviembre 2019
- [18-24] AWS A5.12M/A5.12:2009, Specification for Tungsten and oxide Dispersed Tungsten Electrodes for Arc Welding and cutting.
- [19-25] ASTM designation : E 384-05a, Standard test method for Microindentation Hardness of materials, United States.
- [20-26] ASTM designation E 18-03, Standard test methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials, United States.
- [21-27irestalgroup] Irestal Group. Tablas técnicas del acero inoxidable.
- [22-28 blog] Metalografía, Universidad tecnológica de Preira, cap 7. Aceros inoxidables, publicado 26 Julio 2012.
- [23-29UPNA] Iosu Mutilva Martínez de Morentin, Javier Fernández Carrasquilla. Análisis de imagen sobre aceros austeníticos carburizados. Titulación: Ingeniero técnico industrial mecánico, Pamplona, 18.04.2011.