

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS POR LOS  
PROCESOS DE SOLDADURA GTAW Y RSW EN LA FABRICACIÓN DE  
MOBILIARIO HOSPITALARIO DE ACERO INOXIDABLE AISI 304**

**POR**

**ING. LEONARDO ADRIÁN CARRASCO GONZÁLEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA A 27 DE SEPTIEMBRE DEL 2012**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LAS DISCONTINUIDADES GENERADAS POR LOS  
PROCESOS DE SOLDADURA GTAW Y RSW EN LA FABRICACIÓN DE  
MOBILIARIO HOSPITALARIO DE ACERO INOXIDABLE AISI 304**

**POR**

**ING. LEONARDO ADRIÁN CARRASCO GONZÁLEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA A 27 DE SEPTIEMBRE DEL 2012**

# *Agradecimientos*

*Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado para la realización de este proyecto, así como a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), por la oportunidad que me brindó para cursar la especialidad en tecnología de la soldadura industrial dentro de su programa de especialización.*

*Agradezco al personal que labora en COMIMSA por sus enseñanzas, apoyo y ayuda en el tiempo que estuve aprendiendo y compartiendo con ellos.*

*A mi tutor académico Dr. Felipe García Vázquez por su apoyo y recomendaciones proporcionadas para la realización de la monografía, por sus consejos y apoyo brindado a lo largo de toda mi preparación como especialista. Sus consejos para realizar mi trabajo y mi desempeño, la confianza puesta en mí para aceptarme como su estudiante.*

*A mi tutor de planta Ing. Samantha Navejas Martínez por las facilidades brindadas para la realización de las pruebas del caso de estudio de la monografía.*

*Agradezco el amplio apoyo de mi familia que siempre está conmigo, que se enorgullece al decir que soy su hijo, hermano, cuñado o simplemente sobrino o primo, ya que sin su apoyo y motivación no lograría mis objetivos.*

*A mis compañeros que me apoyaron, me orientaron, me corrigieron y sobre todo me brindaron su amistad a lo largo de nuestros estudios, trabajando en equipo con alegría y empeño a la voz de "si no fuera por estos momentos y los días de pago".*

*A mi novia y su familia quien me apoyó me procuró y me cuidó a lo largo de mi desempeño académico, felicitándome y motivándome en todas mis actividades.*

*Al comité de becas de COMIMSA por su apoyo en mis estudios en el extranjero y su confianza para permitirme representar a COMIMSA fuera del país.*

## *Dedicatoria*

*A mis padres Claudia Maria González Silva y Adrián Carrasco Astello por su cariño, amor, cuidados, motivación, apoyo y por tantos y tantos sacrificios que han realizado para que yo logre conseguir mis objetivos, con su ejemplo he logrado avanzar en mi vida, con sus valores he sido reconocido y con su amor he sido amado.*

*A mi hermana Michelle Carrasco y mi cuñado Obed Pereira quienes me cuidan me apoyan y me guían en mi camino con su ejemplo, por siempre estar al pendiente de mí y siempre demostrándome su amor.*

*A mi novia Korina Berenice Degollado Villalobos quien con su ejemplo de dedicación y empeño me ha guiado por el camino de la excelencia, y que con su amor me ha enseñado la verdad de esta palabra permitiéndome expresárselo cada día de mi vida diciéndole cuanto la amo hoy, mañana y siempre.*

*A mi familia que siempre me ha apoyado y se enorgullece al referirse de mí en sus pláticas y que siempre me han hecho sentir el amor que me tienen, tias Gaby, Elisa, Marcela, Gaby, Pily, Cecy, a mis tíos Claudio, Pepe, Esteban, Paco, Hugo, Mandinga, a mi prima Lucina que no me ayudo en nada jajajaja es broma, a mis padrinos Alma Elsa y Jesus quienes me demuestran su amor como a un hijo. A la familia Degollado Villalobos por apreciarme, cuidarme y demostrarme tanto cariño.*

*A mis abuelas Lucina y Toña quienes son mi amor mi inspiración y a quienes amo con todo el corazón. A mi abuelo quien desde el cielo me cuida y observa y quien me enseñó "si vas a ser barrendero, que seas el mejor del mundo".*

# ÍNDICE

SÍNTESIS.....	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo general.....	3
1.2.1 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	4
1.5 Aportación tecnológica.....	5
1.6 Alcance.....	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 Aceros Inoxidables.....	7
2.1.1 Generalidades.....	7
2.1.2 Clasificación de los aceros inoxidables.....	9
2.1.3 Acero Inoxidable AISI 304.....	16
2.2 Proceso de soldadura por arco gas-tungsteno GTAW.....	17
2.2.1 Descripción.....	17
2.2.2 Componentes del equipo.....	19
2.2.3 Principales aplicaciones.....	21
2.2.4 Variables del proceso.....	22
2.3 Proceso de soldadura por puntos de resistencia.....	23
2.3.1 Descripción.....	23
2.3.2 Componentes del equipo de soldadura.....	24
2.3.4 Variables del proceso.....	31
2.4 Metalurgia de la soldadura de aceros inoxidables.....	31
2.5 Discontinuidades en las uniones de aceros inoxidable 304.....	37
2.5.1 Exceso de penetración.....	37
2.5.2 Falta de penetración.....	38
2.5.3 Socavado.....	38
2.5.4 Grietas.....	39
2.5.5 Porosidad.....	40
2.5.6 Inclusiones.....	41
2.6 Efecto de los parámetros de proceso GTAW en la microestructura y geometría del cordón de soldadura.....	42

2.7 Factores que influyen en la soldadura por puntos de resistencia en aceros inoxidables austeníticos .....	52
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA .....	59
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO .....	62
4.1 Materiales y equipo .....	63
4.2 Análisis y discusión de resultados .....	66
4.3 Conclusiones parciales .....	72
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....	74
BIBLIOGRAFÍA .....	76
LISTADO DE FIGURAS .....	79
LISTADO DE TABLAS .....	82
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO .....	83

# SÍNTESIS

En este trabajo se estudia las discontinuidades presentes en las uniones de acero inoxidable 304 elaboradas por los procesos de soldadura por arco de gas-tungsteno (GTAW) y soldadura por puntos de resistencia (RSW), enfocados a la elaboración de mobiliario hospitalario.

El estado del arte abarca puntos descriptivos referentes a los posibles defectos presentes en las uniones del proceso GTAW y el proceso RSW, así como problemáticas metalúrgicas presentes en el material como lo es la sensibilización del acero inoxidable.

Se analiza información referente al impacto de las simulaciones para establecer parámetros de soldadura adecuados y por lo tanto generar soldaduras sin defectos y de calidad.

El caso de estudio presente en este documento se enfoca en el empleo de los conocimientos plasmados en el estado del arte para evitar la presencia de discontinuidades en una unión mediante el proceso de soldadura GTAW de dos placas de acero inoxidable de 1/8" de espesor por 2" de largo, analizando las fases presentes en el cordón de soldadura, al igual que su morfología y los niveles de microdureza presentes.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

En la elaboración de mobiliario hospitalario los puntos de mayor importancia son la calidad, la duración y la limpieza del material que se emplea, es aquí donde entra en juego el acero inoxidable, el cual por su conocida alta resistencia a la corrosión es uno de los más empleados para la fabricación de dicho mobiliario.

Para llevar a cabo el proceso de soldadura se pueden emplear procesos de distinto tipo, uno de ellos conocido como soldadura por arco gas-tungsteno (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW por sus siglas en inglés) en el cual se emplea un material de aporte, preferentemente del mismo material a soldar y en el cual el gas forma una capa protectora al momento de soldar. Otro proceso



conocido es el de soldadura por puntos de resistencia (Resistance Spot Welding, RSW por sus siglas en inglés) el cual se lleva a cabo sin material de aporte, generalmente empleado para materiales de bajo calibre donde a través de dos puntas conocidas como electrodos fluye una corriente logrando fundir los metales y así formar la unión soldada.

Dentro de la gama de los aceros inoxidable el 304 es uno de los más utilizados por sus características aplicadas para embutición profunda, corte y rolado, entre sus aplicaciones encontramos contenedores de productos químicos, almacenamiento de vinos, enfriadores e intercambiadores de calor por mencionar algunos.

## **1.2 Objetivo general**

Reunir la información concerniente al efecto de las variables involucradas en los procesos de soldadura GTAW y RSW aplicados a la unión de acero inoxidable 304, para conocer las causas de falla en las uniones soldadas y lograr establecer una configuración óptima en los procesos de soldadura estudiados.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Identificar las fallas que se presentan en el proceso de soldadura GTAW y RSW al trabajar con acero inoxidable 304.
- Identificar los parámetros de configuración del equipo al momento de trabajar con los procesos de soldadura GTAW y RSW.
- Desarrollar un caso de estudio para poder definir una configuración óptima de las variables en los procesos de soldadura GTAW y RSW.

- Con base a los resultados definir un procedimiento de soldadura para tener los resultados óptimos y con la menor cantidad de fallas posibles.

### **1.3 Justificación**

Debido a la falta de conocimiento de los procesos de soldadura y de personal preparado específicamente en el área de soldadura, en la actualidad las empresas basan sus procesos de trabajo y las configuraciones de los equipos en la experiencia del personal soldador o bien en experimentación sin tener un conocimiento certero de por qué razón se están presentando las fallas.

El identificar los tipos de fallas y conocer la razón de porqué se están presentando, es una de las principales bases de este estudio con el cual se desea brindar la información necesaria para poder reducir los costos de retrabajo así lograr una mayor productividad.

### **1.4 Planteamiento del problema**

Actualmente la fabricación de mobiliario hospitalario involucra los procesos de corte y doblado en acero inoxidable 304. Una vez listas las piezas, son sometidas a procesos de soldadura principalmente GTAW y RSW, finalmente se llevan las piezas al área de pulido y acabado.

Durante el proceso de soldadura, no se cuenta con algún estándar de trabajo en el cual el personal soldador se pueda basar para la configuración del equipo o el modo de proceder en piezas de dificultad.

Al momento de pulir la pieza para dar el acabado necesario y eliminar rebaba peligrosa para el usuario final, el operario presenta la problemática de la separación o ruptura de la unión soldada por lo cual la pieza es rechazada y enviada para re-trabajo.

Al no tener conocimiento de la razón de la falla y no llevar a cabo un análisis del producto defectuoso, es imposible lograr identificar las causas que originan el problema ya sean la soldadura, los parámetros o bien el proceso.

Por tal motivo, realizar un estudio a detalle de dichos procesos de fabricación es necesario para poder comprender el desarrollo completo del producto y optimizar los recursos de elaboración principalmente tiempo.

## **1.5 Aportación tecnológica**

El acero inoxidable es empleado en la rama de la medicina y en el área alimenticia, así también es bien conocido que por no ser ambientes de trabajo rudo no se tiene presente la resistencia de las uniones soldadas en situaciones de alto riesgo, altos esfuerzos o bien impactos para los productos finales.

Pero es necesario conocer hasta donde podemos lograr desarrollar el producto y qué está pasando en las uniones soldadas, así como predecir su tiempo de vida con mayor efectividad y poder prolongarlo con algún anexo al proceso común de soldadura. Para la industria este estudio significará una base para poder llevar a cabo el proceso, conociendo y comparando lo aquí presentado con lo aplicado o bien con algún proceso innovador.

## **1.6 Alcance**

El presente estudio brindará información referente a los defectos que están presentes en el proceso de unión de acero inoxidable 304 por medio de los

proceso de soldadura GTAW y RSW aplicados a la elaboración de mobiliario hospitalario, desarrollando un caso de estudio para analizar y definir los factores que influyen en su desarrollo.

# **CAPÍTULO 2**

## **ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 Aceros Inoxidables**

#### **2.1.1 Generalidades**

Los aceros inoxidables son básicamente aleaciones de Hierro (Fe)- Cromo (Cr), Fe-Cr-Carbono (C) y Fe-Cr-Níquel (Ni). El término de inoxidable se agrega a aquellos aceros en los cuales se genera una capa de protección contra la oxidación, también conocida como “pasivación de los aceros”, esto generado principalmente por el contenido de cromo presente, el cual debe, por lo menos, presentar un 10.5 % e.p. de cromo. [1]

Los altos contenidos de cromo provocan que el acero cambie sus propiedades, dentro de los cuales la resistencia a la corrosión es la principal,

por tal motivo se les denomina “Aceros Inoxidables” (Stainless Steel, por su traducción en inglés).

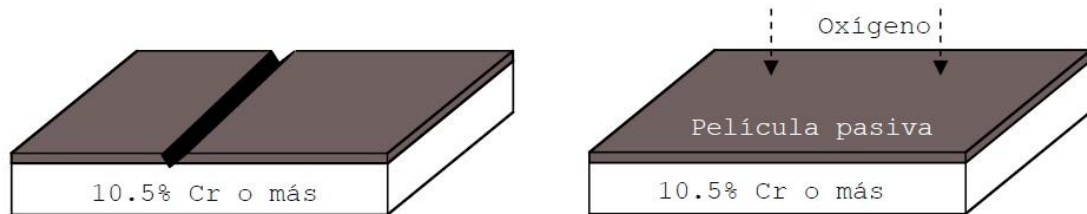
Desde 1821 Frenchman Berthier desarrolló aleaciones que incluían Cr como elemento aleante presentando problemas con la formabilidad del material, posteriormente se realizaron estudios con los aceros llamados martensíticos o ferríticos modificando su contenido de cromo. Con los estudios se dio amplia relevancia a la resistencia a la corrosión para usos industriales. El primer lingote de acero inoxidable por fundición en Estados Unidos fue hecho por Firth Sterling Ltd. en Pittsburgh el 3 de Marzo de 1915. [1]

La resistencia a la corrosión es debido a la formación de su capa de pasividad (antes mencionada) por efecto del cromo al estar en contacto con el oxígeno del ambiente. Esta capa es una barrera para la formación o acumulación de agentes oxidantes o bien como protección contra algunos tipos de ácidos. Tal como se muestra en la Fig. 2.1., cuando se presenta un daño en el acero inoxidable y al estar en contacto con el oxígeno, se forma una capa protectora de óxido de cromo sobre la falla.



**Figura 2.1.** Película de óxido de cromo. El oxígeno del medio crea una capa protectora de óxido de cromo en el acero inoxidable. [2]

Cabe mencionar que dicha capa pasiva formada sobre la falla no rellenará el daño, si es que este logró hacer una fractura a la pieza, sino que lo cubrirá para brindarle protección como al resto del material. En otras palabras, se puede decir que si algún agente desgasta una sección de la capa pasiva, ésta se regenerará al estar en contacto con el oxígeno. (Fig. 2.2)



**Figura 2.2:** Ejemplificación de regeneración de capa protectora (película pasiva) de óxido de cromo. [2]

### 2.1.2 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se clasifican en base a las fases presentes en su estructura, tomando en cuenta para su clasificación la fase predominante o bien la que presentan en su mayoría, de aquí se definen 5 familias existentes:

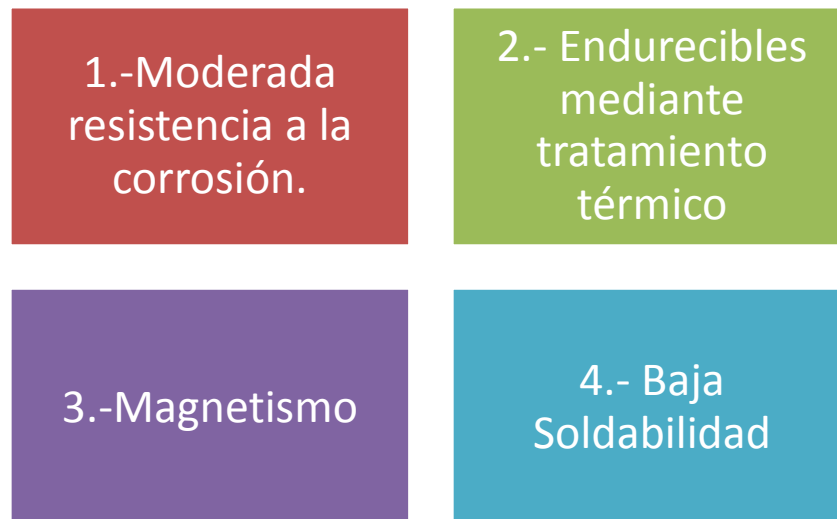
- Martensíticos
- Ferríticos
- Austeníticos
- Dúplex
- Endurecidos por precipitación

**Tabla 2.1.** Clasificación de Aceros Inoxidables. [2]

<i>Clase</i>	<i>Clasificación AISI</i>
I Martensíticos	Serie 400
II Ferríticos	
III Austeníticos	Series 200 y 300
IV Dúplex	Se usa el nombre comercial
V Endurecidos por Precipitación	

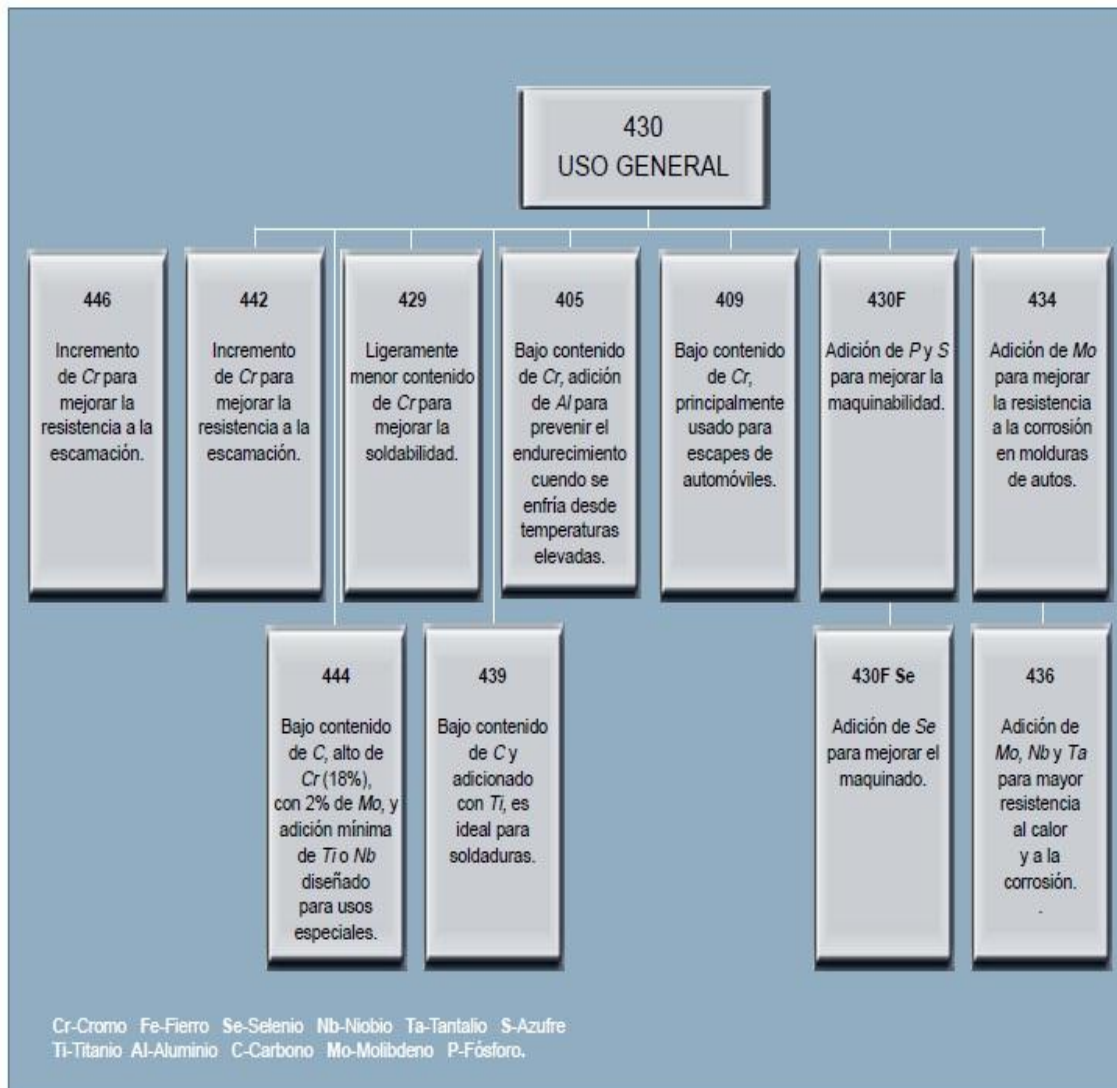
Los aceros inoxidables denominados Martensíticos son aquellos que contienen cromo en rangos de 10.5 a 18 (% e.p.) y carbono en un rangos altos que logran alcanzar hasta el 1.2% e.p., dicha combinación de cromo y carbono esta balanceada para así lograr obtener la estructura martensítica al aplicar el tratamiento térmico. Su clasificación según el Instituto Americano de Hierros y Aceros (American Iron and Steel Institute, AISI por sus siglas en inglés) asigna la serie 400. [2]

Entre sus principales características se encuentran:

**Figura 2.3.** Principales características de aceros inoxidables martensíticos. [2]



Los tipos de acero de la familia de martensíticos se describen en la Fig. 2.4.



**Figura 2.4.** Familia de los aceros inoxidables martensíticos. [2]

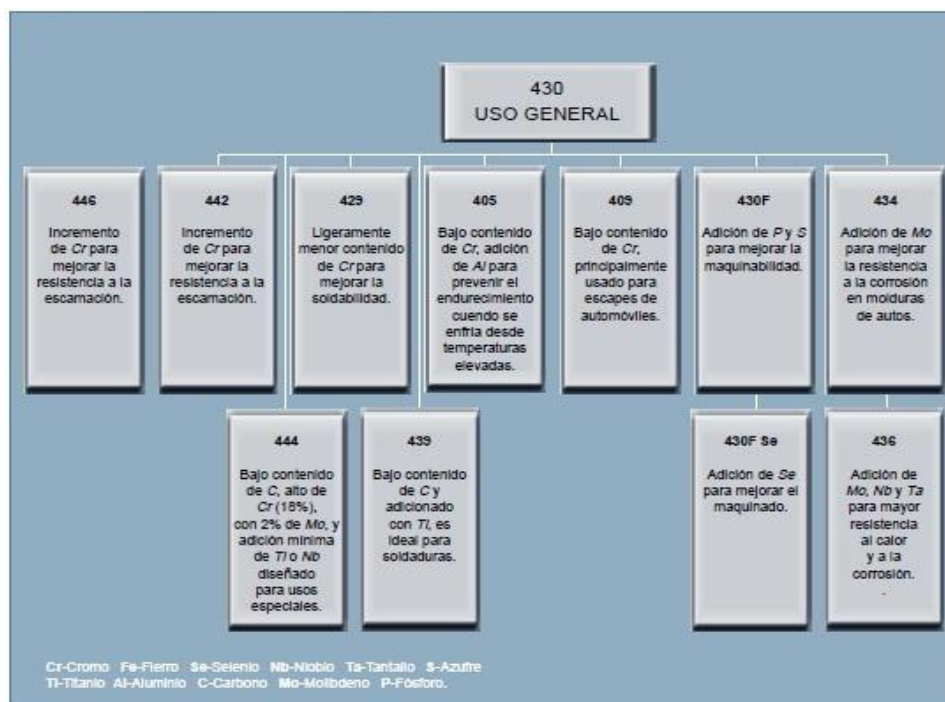
La presencia únicamente de cromo hasta por niveles del 30 %e.p. en el acero nos produce un acero inoxidable del tipo ferrítico, ya que la mayoría de su estructura es ferrita. Este tipo de acero inoxidable es magnético, su clasificación también pertenece a la serie AISI 400. [2]

Entre sus características encontramos:



**Figura 2.5.** Principales características de aceros inoxidable ferríticos. [2]

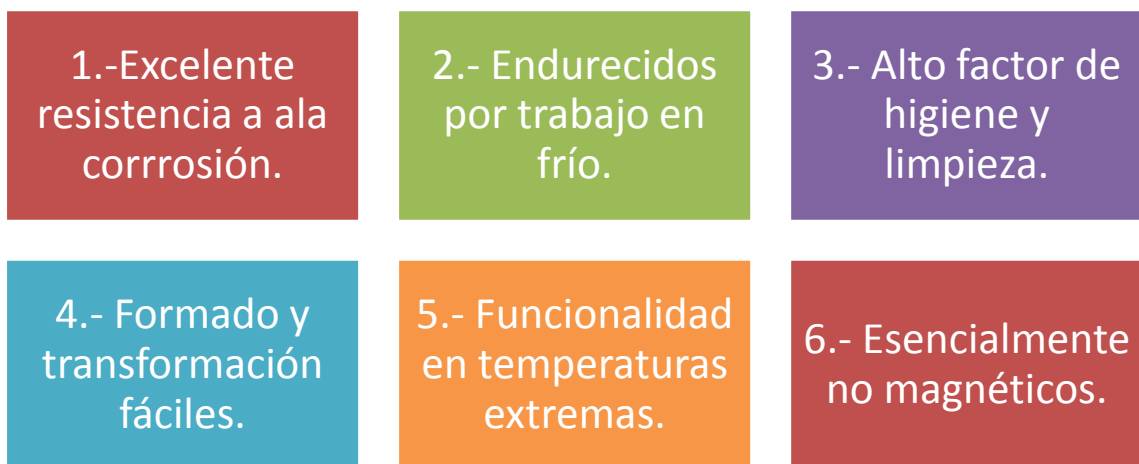
La adición de elementos, así como la reducción de contenidos de Cr o C nos brinda variaciones en las propiedades del material clasificados por nomenclatura numérica como se muestra en la Fig. 2.6.



**Figura 2.6.** Familia de los aceros inoxidable ferríticos. [2]

Los aceros inoxidable austeníticos es la familia que tiene mayor empleo debido a sus excelentes características de formabilidad y presentar una resistencia a la corrosión superior. Los aceros inoxidable austeníticos tienen dureza equivalente a los aceros dulces de aproximadamente 210 Mp, un esfuerzo de cedencia mínimo a temperatura ambiente. [1]

Entre sus principales características podemos encontrar:



**Figura 2.7.** Principales características de aceros inoxidable austeníticos. [2]

Para lograr mantener la fase austenítica en un amplio rango de temperatura se añade níquel (Ni) y también el manganeso (Mn) aunque este último en mucha menor cantidad. Estos elementos son conocidos como promotores de la fase austenita al igual que el nitrógeno (N), otro de los elementos de importancia en la formación de esta clase de aceros inoxidable.

Los contenidos de Cr se encuentran entre el 16 y el 26 % e.p. considerándose altos, mientras que el carbono debe permanecer a niveles

realmente bajos oscilando entre 0.03 y 0.08% e.p.. Para su nomenclatura asignada por la AISI encontramos a dos familias (ver Fig.2.8):

- Serie 300 AISI. Básicamente aleaciones de Cr-Ni
- Serie 200 AISI. Son aleaciones Cr-Mn-N

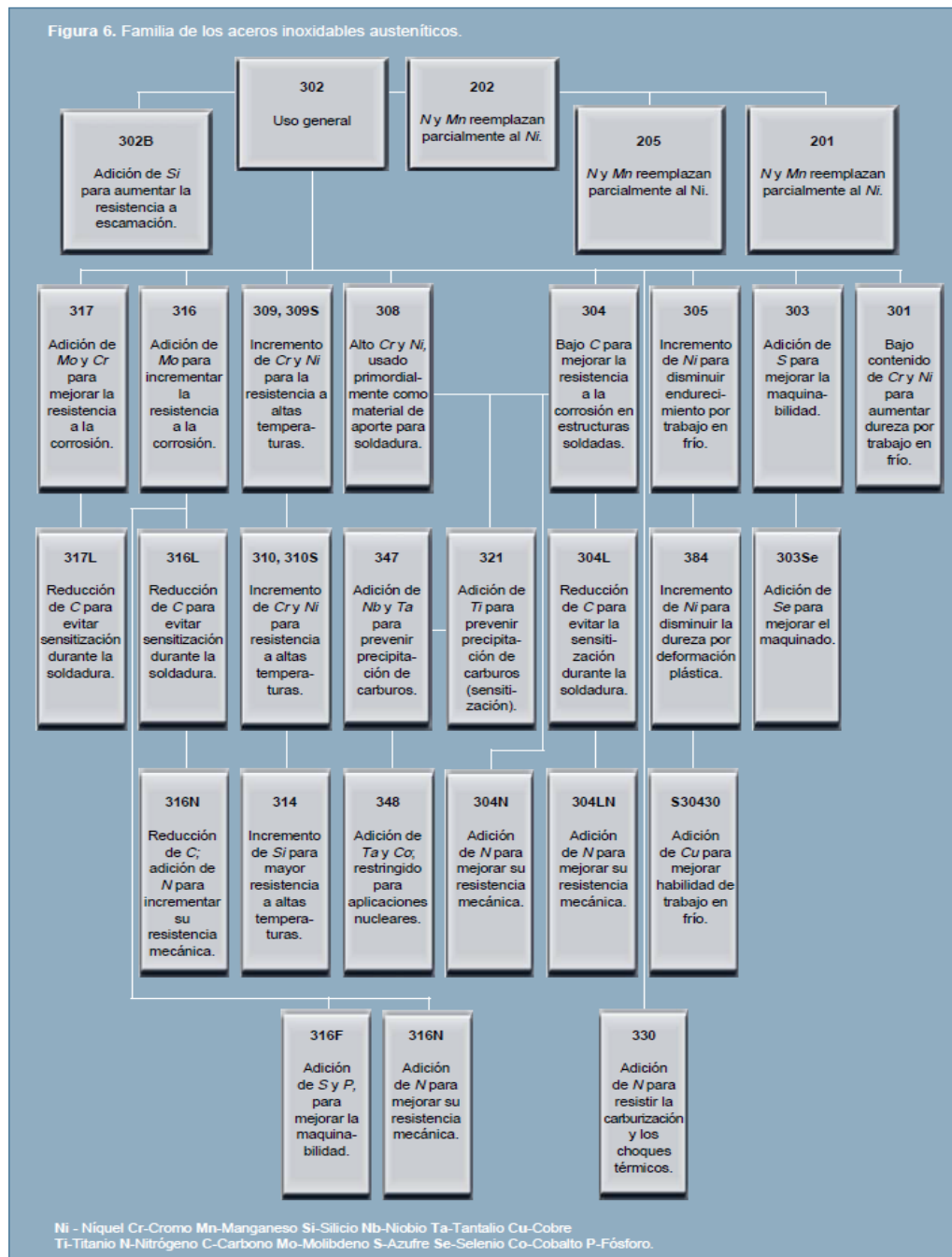


Figura 2.8. Familia de los aceros inoxidable austeníticos. [2]

Los aceros inoxidable dúplex obtienen su nombre debido a que a temperatura ambiente la microestructura que presentan es mitad ferrita y mitad austenita, es una combinación de los austeníticos y ferríticos. Este tipo de acero inoxidable es empleado en aplicaciones que requieren una resistencia a la corrosión superior, elevadas propiedades mecánicas o ambas [1]. Básicamente son aleaciones Cr-Ni-Mo, elementos que logran formar austenita y ferrita en cantidades aproximadamente iguales.

Sus principales características son:



**Figura 2.9.** Principales características de aceros inoxidables dúplex. [2]

La última familia en la clasificación son los aceros inoxidables endurecibles por precipitación (Precipitation Hardening Stainless Steel, también se les denomina PH). La base de estos aceros inoxidables es la característica de endurecimiento por medio de un tratamiento térmico, dándole características mecánicas elevadas como de maquinabilidad. Son aleaciones principalmente de Fe-Cr-Ni, en una sub-clasificación podemos definirlos como: [3]

- Austeníticos
- Semi- austeníticos
- Martensíticos

### 2.1.3 Acero Inoxidable AISI 304

Este acero inoxidable es característico por tener propiedades para una gran cantidad de aplicaciones, siendo el área de la medicina el punto de interés. Este acero inoxidable al contar con alta resistencia a la corrosión se postula como principal material en la elaboración de mobiliario hospitalario, ya que su capacidad de soldabilidad junto con su limpieza son factores de importancia.

Al trabajar con altas temperaturas (800-900°C) no se logra la formación de carburos, esto es ocasionado por el bajo contenido de carbono. La composición química del acero inoxidable AISI 304 se muestra en la tabla 2.2 [3] La microestructura del acero AISI 304 austenítico se muestra en la Fig. 2.10, en donde se observan granos equiaxiales característicos de la fase microestructura. (Fig. 2.10)

**Tabla 2.2.** Composición química AISI 304. [3]

Composición química (Elementos)							
Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
AISI 304	0.08% max.	2.00% max.	0.045% max.	0.03% max.	1.00% max.	18-20% max.	8-10.5% max.



**Figura 2.10.** Microestructura AISI 304 austenítico. [3]

En la Tabla 2.3 se muestran las propiedades de los aceros inoxidable austeníticos, resaltando las correspondientes al acero AISI304.

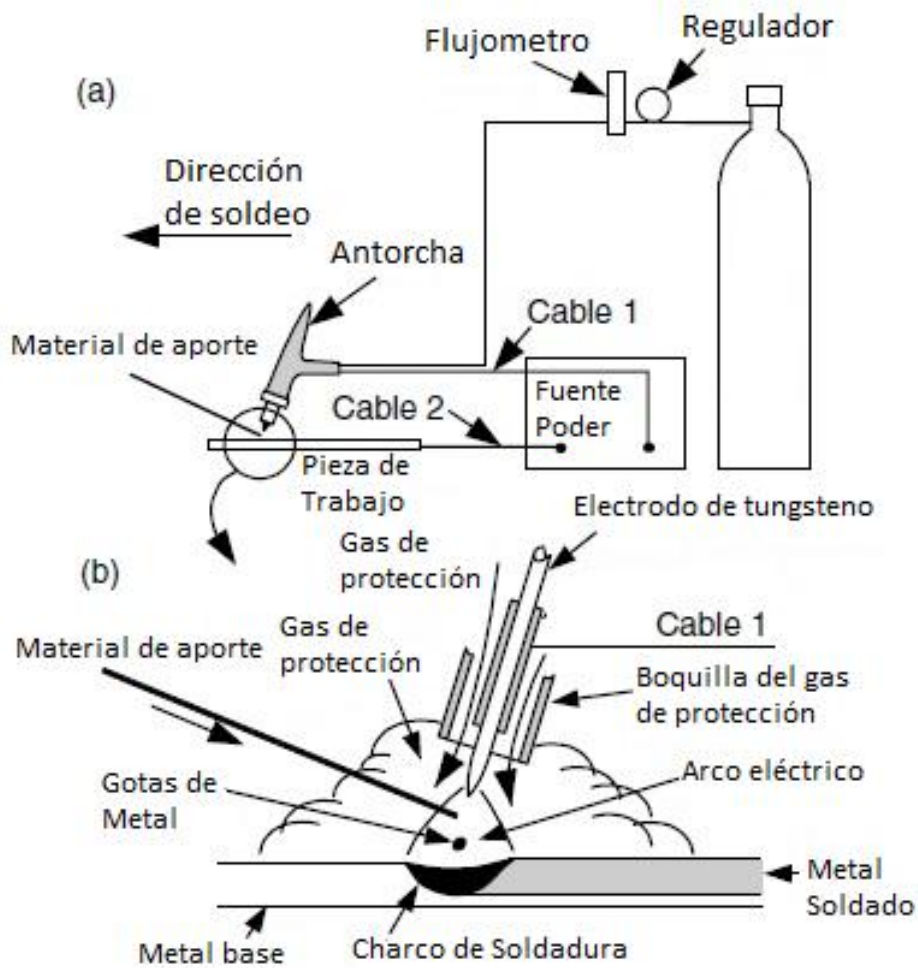
**Tabla 2.3.** Listado de propiedades a temperatura ambiente de aceros inoxidable austeníticos. [3]

Aleación	Resistencia a la tensión		Esfuerzo de Cedencia		Elongación (%)	Reducción de área (%)
	MPA	ksi	MPA	ksi		
302	515	75	205	30	40	50
304	515	75	205	30	40	50
304L	480	70	170	25	40	50
308	515	75	205	30	40	50
309	515	75	205	30	40	50
310	515	75	205	30	40	50

## 2.2 Proceso de soldadura por arco gas-tungsteno GTAW

### 2.2.1 Descripción

El proceso de soldadura por arco de gas tungsteno (Gas-Tungsten Arc Welding, GTAW por sus siglas en inglés) es el proceso en el cual se tiene un electrodo de tungsteno (no es consumible) en el interior de la pistola o antorcha con la cual se generará el arco eléctrico necesario para fundir el elemento de aporte, generalmente del mismo material a soldar. Así también por la antorcha se libera un gas inerte el cual crea una capa protectora para mantener al oxígeno del ambiente fuera del cordón de soldadura hasta que éste logre solidificar evitando así problemas en la unión soldada. En la Fig. 2.11 se muestra una representación esquemática del proceso GTAW/TIG. [4]



**Figura 2.11.** Esquema del proceso GTAW/TIG. [3]

El equipo de soldadura comprende los siguientes sistemas:

- Fuente de poder
- Antorcha
- Depósito de gas
- Válvulas y mangueras
- Material de aporte



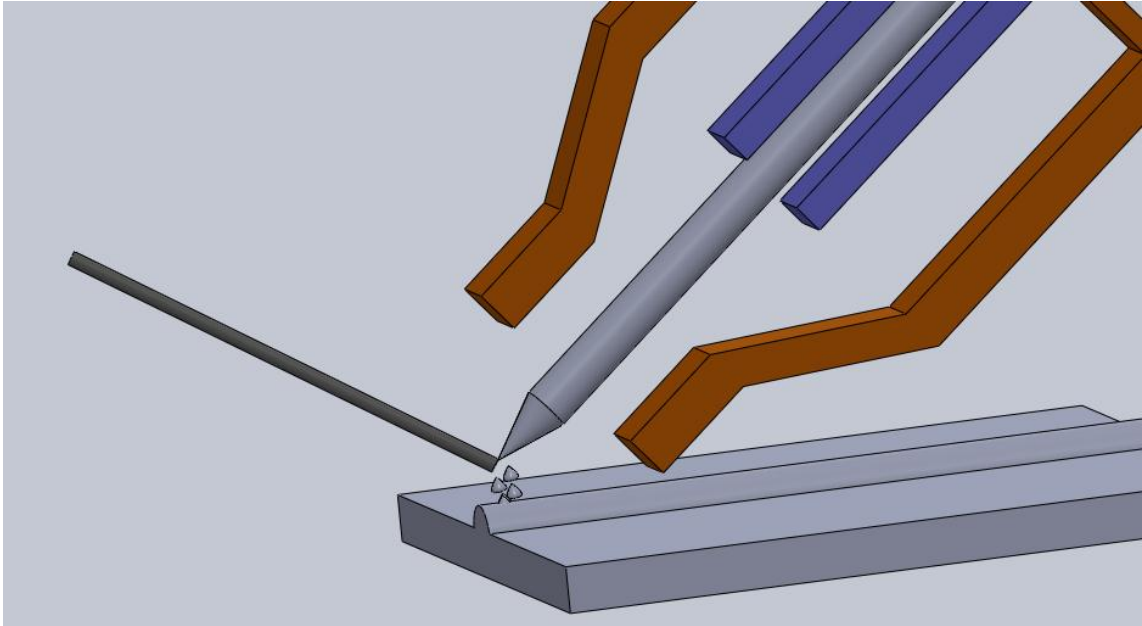
## 2.2.2 Componentes del equipo

La fuente de poder es la que provee la energía suficiente para generar el arco de corriente entre el material y el electrodo de tungsteno al cerrar el circuito mediante la conexión del material a soldar con la pinza de tierra. Una vez generado el cortocircuito, se libera un gas que forma una capa protectora sobre el cordón de soldadura. (Fig. 2.12)



**Figura 2.12.** Equipo de soldadura Miller Maxtar 200. [5]

La antorcha es el control principal del equipo en la cual se localiza el electrodo de tungsteno en la parte central para que sea el medio por el cual fluye la corriente. Unos conductos rodean al electrodo, por los cuales se esparce el gas inerte para formar la capa protectora que evitará la oxidación en el cordón de soldadura hasta que éste solidifique y con esto evitar defectos. (Fig. 2.13)



**Figura 2.13.** Esquema de antorcha en funcionamiento, proceso GTAW.

Para el almacenamiento del gas se emplea un tanque diseñado para el proceso, el cual es capaz de contener una mezcla de argón/ $\text{CO}_2$ , argón o nitrógeno. Es necesario tener en cuenta el diseño del tanque para la combinación de gases a emplear (Fig. 2.14). Es necesario tener siempre presente la seguridad de la válvula de conexión, la cual puede convertirse en el punto más riesgoso del equipo pudiendo generar una fuga. [6]



**Figura 2.14.** Tanque de Gas empleado en proceso GTAW. [6]

Para el control, regulación y transporte de gas al momento de soldar entran en juego las válvulas y mangueras del equipo. Éstas últimas también son conocidas como reguladores y son por medio de los cuales se controlan el flujo de salida. (Fig.2.15)



**Figura 2.15.** 1) Conector de regulador de salida. 2) Válvula de tanque. [6]

El material de aporte para el proceso de soldadura es aquel material con el cual se lleva a cabo la unión, generalmente es del mismo tipo de material a soldar para así evitar la mayor cantidad de disimilitudes en el mismo.

### 2.2.3 Principales aplicaciones

Dentro de las características que aventajan a este proceso en comparación a los conocidos por arco se encuentra la facilidad de posiciones, la capacidad de trabajo fino sin generación de escoria y principalmente su trabajo con espesores finos (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4** Aplicaciones de los principales procesos de soldadura. [4]

Material	Grosor	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW
Aceros al carbon	S	X	X	X		X		
	I	X	X	X	X	X		
	M	X	X	X	X			
	T	X	X	X	X			X
Acero de baja aleación	S	X	X	X		X		
	I	X	X	X	X	X		
	M	X	X	X	X			
	T	X	X	X	X			X
Aceros Inoxidables	S	X	X	X		X	X	
	I	X	X	X	X	X	X	
	M	X	X	X	X		X	
	T	X	X	X	X			X
Hierros fundidos	I	X						
	M	X	X	X	X			
	T	X	X	X	X			X
Niquel y aleaciones	S	X		X		X	X	
	I	X	X	X		X	X	
	M	X	X	X			X	
	T	X		X				
Aluminio y aleaciones	S			X		X	X	
	I			X		X		
	M			X		X		
	T			X				

Este proceso de soldadura es empleado con materiales de espesores de bajo a medio, donde se requiere un control de la microestructura. Con el empleo de los procesos de soldadura automatizada, es de gran importancia el control de los parámetros para cada material en específico para obtener calidad con un costo mínimo. [7]

### 2.2.4 Variables del proceso

En el proceso de soldadura GTAW las variables de mayor importancia son:

- Calibración de corriente en equipo.
- Configuración de la polaridad del electrodo [4]
  - a. Corriente directa con electrodo a negativo.
  - b. Corriente directa con electrodo a positivo.
  - c. Corriente alterna.

- Gas de protección.
- Material de aporte.
- Proceso de soldado.
- Tipo de material a soldar.

El tener amplio conocimiento de estas variables, tanto teórica como empíricamente, es de gran importancia para obtener la configuración óptima para evitar fallas en las soldaduras a elaborar. [4]

Dentro del manejo del flujo de la corriente se pueden emplear pulsos y no un flujo constante, lo cual altera las características de la soldadura principalmente la profundidad del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor. [8]

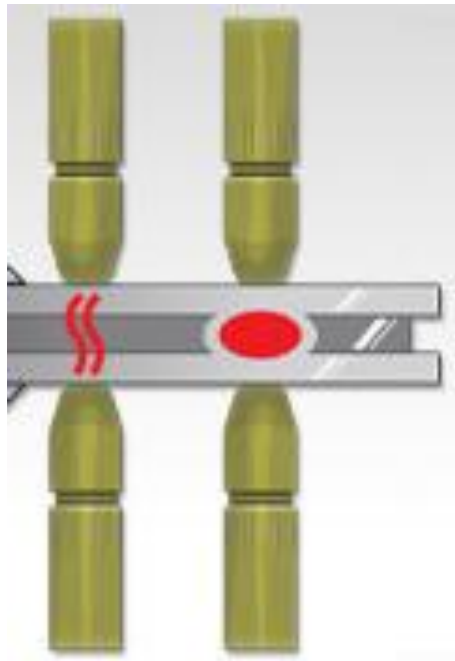
## **2.3 Proceso de soldadura por puntos de resistencia**

### **2.3.1 Descripción**

La soldadura por puntos de resistencia (Resistance Spot Welding, RSW por sus siglas en inglés) es uno de los procedimientos de soldadura más antiguos que siguen siendo aplicados por las industrias, principalmente por la automotriz en sus líneas de producción automatizadas, esto debido a la rapidez y calidad del proceso además de su capacidad de programación. [9]

El proceso de soldadura por puntos de resistencia está basado en el principio de que los metales se oponen al flujo de la corriente eléctrica generando así el efecto del calor. Éste logra hacer que los metales se empiecen a fundir en el punto de contacto, este efecto es causa de una inducción de corriente por medio de electrodos.

Los electrodos, generalmente de cobre, son el medio por el cual la corriente que genera la máquina es focalizada en el punto específico. Después de un tiempo establecido, en el cual se llega al punto de fusión de los metales, se elimina la corriente más no la presión, ya transcurrido el ciclo de enfriamiento con la presión presente, se libera la pieza y punto de contacto solidificado a formado así una conexión metálica sólida entre los dos metales (Fig. 2.16). [10]



**Figura 2.16.** Esquema básico de proceso de soldadura RSW. [11]

### **2.3.2 Componentes del equipo de soldadura**

El proceso RSW a diferencia con otros sistemas de soldadura, no requiere un agente externo para realizar el proceso de unión. Las máquinas de soldadura por puntos de resistencia se dividen en los siguientes sistemas principales:

- Transformadores
- Sistema de fuerza
- Control
- Estructura o gabinete
- Brazos y electrodos

Los transformadores son dispositivos eléctricos empleados para poder cubrir las altas demandas de corriente (Amperes) y muy bajos niveles de voltaje (Volts) siendo estas características principales para el proceso de soldadura RSW. Para soldar aceros de bajo carbono se requieren de 10,000 A aproximadamente. Esta cantidad de corriente no se obtiene de una toma de alimentación común, por tal motivo es necesario emplear transformadores para así poder cubrir las demandas del proceso. Dichos transformadores son elaborados con dos bobinas de alambre y un núcleo de hierro, las bobinas son denominadas primaria y secundaria, para obtener los altos valores de corriente se divide el número de vueltas del primario entre el secundario, el resultado será multiplicado por la cantidad de corriente con la que se alimenta la bobina primaria y así obtener el incremento de corriente en la salida.

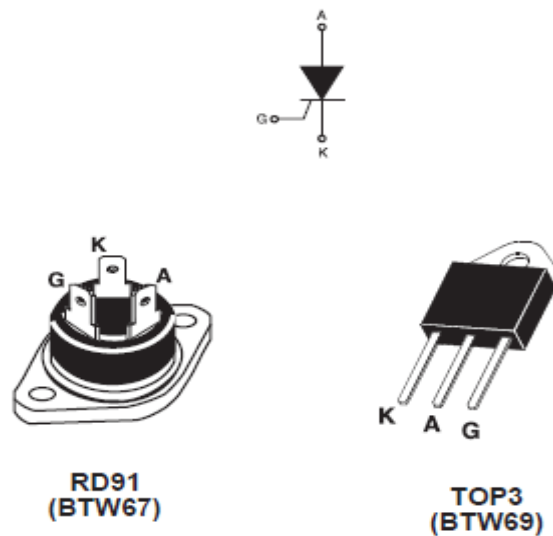
Los transformadores se identifican según su capacidad en kilo volts-ampere (KVA) y según su función, ya sea elevador o reductor, libera corriente por pequeñas cantidades de tiempo, esto es llamado el ciclo de trabajo que es definido como el tiempo en que el transformador se encuentra trabajando. Si un transformador libera corriente por 10 segundos cada minuto, su ciclo de trabajo será del 16.6% ( $10/60 = .1666$  o 16.6%). El ciclo de trabajo es una de las variables de importancia en el proceso de soldadura por punto de resistencia.

[9]

El tiempo de aplicación de la corriente es manejado directamente desde el controlador lógico programable (Programmable Logic Controller, PLC por sus siglas en inglés) el cual mediante dispositivos como lo es el Rectificador

controlado de silicio (Silicon Controlled Rectifier, SCR por sus siglas en inglés) (Fig. 2.17) puede manipular el tiempo que fluirá la corriente.

Por las características del SCR como componente electrónico, solo cuando este activa la señal en la compuerta (G), se permitirá el flujo de la corriente dando respuesta en procesos con tiempos muy pequeños los cuales no pueden ser manipulados mecánicamente a tal velocidad. [9]



**Figura 2.17.** Esquema básico de SCR. [12]

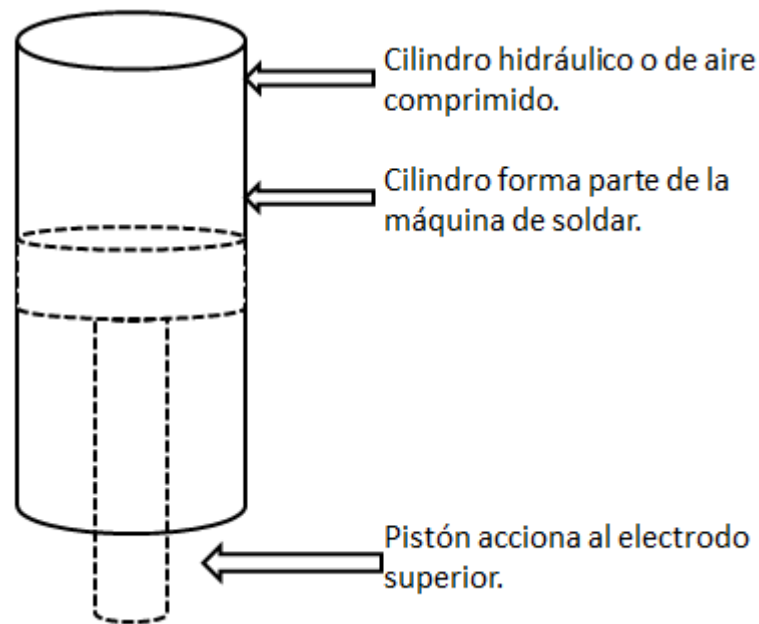
Los sistemas de fuerza tienen como principal tarea asegurar un buen contacto y así llevar a cabo la conducción entre los metales a soldar. Además deben asegurar que no existirá movimiento a mitad de proceso o bien, hasta que la unión haya solidificado para así asegurar un proceso de calidad. Los sistemas empleados para el proceso de soldadura RSW son [9]:

- Mecánicos
- Hidráulicos
- Neumáticos
- Magnéticos



El tipo de mecanismo de fuerza depende de la máquina y el proceso empleado, generalmente se utilizan sistemas neumáticos o hidráulicos. La función del aire en un sistema neumático, es desplazar al pistón que se encuentra dentro del cilindro (Fig. 2.18), el desplazamiento ocurre mediante la alimentación de aire, el pistón acciona al electrodo superior para hacer la presión del material en conjunto con el electrodo inferior.

La presión ejercida debe conservarse hasta que el punto de unión haya solidificado; el tiempo de duración de la presión del cilindro es programado al PLC según el material y el proceso. [9]

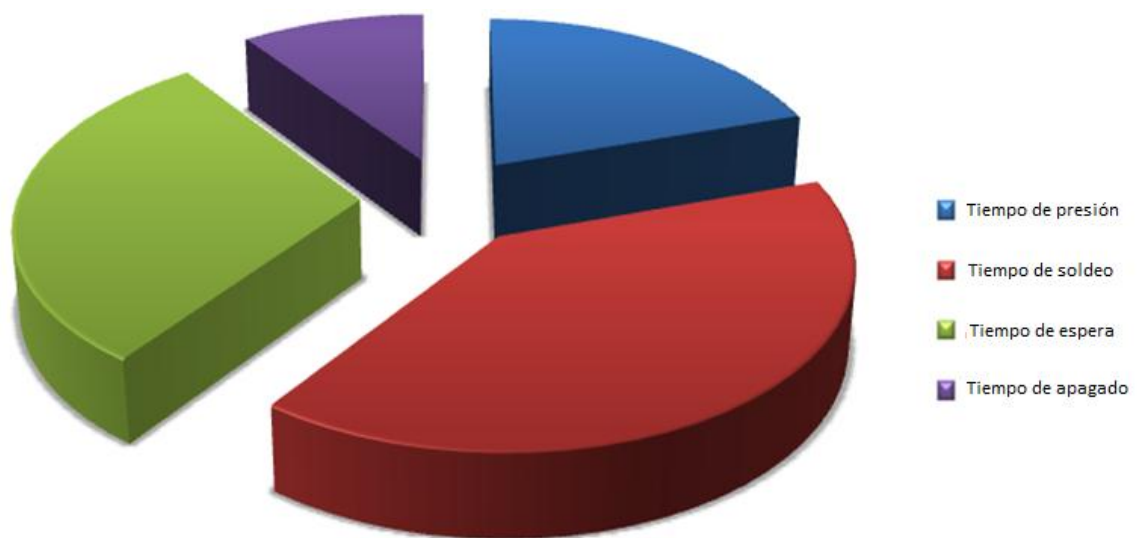


**Figura 2.18.** Esquema de sistema de presión neumático. [9]

El sistema de control está basado en un Controlador Lógico Programable, es el cerebro de la operación. Puesto que la soldadura por puntos de resistencia es un proceso que generalmente toma menos de un segundo, el PLC es capaz de manejar las variaciones de tiempo y corriente necesarias para realizar el proceso.

El tiempo de presión es el tiempo que tarda a la pinza hacer la presión por medio de los electrodos, este tiempo es necesario para que la pinza llegue a su aplicación de fuerza necesaria para dar paso al tiempo de soldar. El tiempo de soldado es el tiempo que dura la aplicación de corriente en los electrodos para poder crear el punto de soldadura.

El tiempo de espera es el tiempo que dura la pinza ejerciendo la fuerza después de la aplicación de corriente para dar oportunidad a que el punto de soldadura solidifique de manera correcta. El tiempo de apagado es el tiempo final de la operación donde los electrodos son desconectados de la operación. [10]



**Figura 2.19.** Esquema del ciclo de tiempo del proceso RSW.

La estructura o gabinete es todo el bastidor o carcasa del equipo en el cual se montan todos los dispositivos como lo son brazos, pinzas, la base que soporta al pistón.

Los electrodos tienen que ser elaborados de un material con alta resistencia y que sea buen conductor de la electricidad, debido a esto el cobre y sus

aleaciones, es el más utilizado para la fabricación de los electrodos, además por su mínima tendencia de alearse con el material a soldar.

En la tabla 2.5 se muestran algunas aleaciones y sus características designadas para la soldadura por puntos de resistencia. [13]

**Tabla 2.5.** Ejemplos de aleaciones aplicables para proceso RSW. [13]

Designación	K-201	K-202
Composición química nominal	99 % Cu 1 % Cr	98.8 % Cu 1 % Cr 0.2 % Zr
Conductibilidad eléctrica % I.A.C.S.	75-80	70-80
Dureza Rockwell B R/B Dureza Brinell HB	49-72 90-130	49-72 90-130
Resistencia a la tracción Kg/mm <sup>2</sup>	32-46	32-46
Alargamiento 50 mm%	12-27	12-27
Límite elástico Kg/mm <sup>2</sup>	18-22	18-22
Temperatura de ablandamiento °C	500	525
Peso específico Kg/dm <sup>3</sup>	8.9	8.9
Aplicaciones K-201 K-202 Electrodos, útiles y partes de máquinas de soldar por resistencia, anillos rozantes, contactos, aparellage eléctrico, discos, mordazas de hornos eléctricos, pinzas de soldar por resistencia, electroerosión...		

El ensamble se compone de un electrodo (Fig. 2.20) y un portaelectrodo (Fig. 2.21).



**Figura 2.20.** Ejemplos de electrodos para RSW. [14]



**Figura 21.** Ejemplos de portaelectrodos para RSW. [14]

Los electrodos se insertan en los portaelectrodos y en su interior llevan el sistema de enfriamiento generalmente a base de agua.

### **2.3.4 Variables del proceso**

En el proceso de soldadura RSW se divide en tres variables principales:

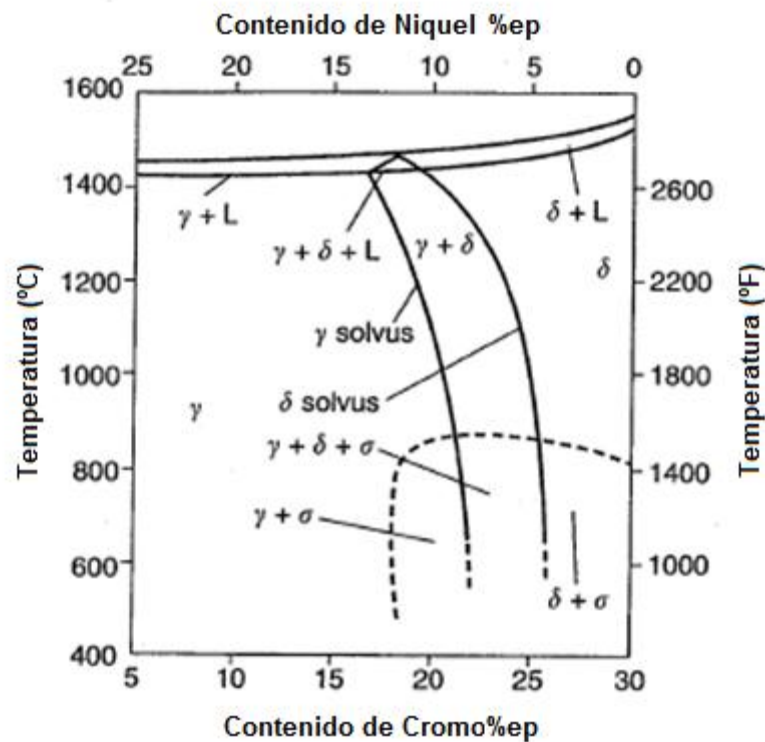
- Calor
- Presión
- Tiempo

El calor es propiciado por los electrodos de la pinza al utilizar una gran cantidad de corriente para hacer la unión de los dos materiales y crear el “punto” de soldadura sin tener un agente externo como material de unión. La presión es desarrollada por un sistema generalmente neumático que trabaja mediante un cilindro que ejerce la presión calibrada al momento de cerrar las pinzas y con la influencia del tercer factor que es el tiempo que incluye los ciclos de soldado, enfriamiento, presión y tiempos muertos. [10]

Los tiempos de los ciclos son la duración programada de cada parte del proceso. Es de mayor importancia conocer los tiempos requeridos para cada tipo de material para lograr la configuración óptima para cada uno en específico. [10]

## **2.4 Metalurgia de la soldadura de aceros inoxidable**

En el proceso de solidificación se emplean diagramas basados en los principales elementos de los aceros inoxidable tales como el Cr y el Ni, a la par de estos elementos se han diseñado diagramas para explicar las características de solidificación. (Fig. 2.22) [15]



**Figura 2.22.** Diagrama Fe-Cr-Ni. [1]

En base a los contenidos de Cr y Ni las curvas de solidificación expresan que fase será la primera en formarse y a que temperatura. Cuando se tienen altos contenidos de Cr y Ni, la primera fase en solidificar es la ferrita ( $\delta$ ) y mientras que con bajos contenidos la fase presente es la austenita. [1]

En los aceros inoxidable dos de los defectos presentes en mayor proporción son la falta de penetración y el agrietamiento por solidificación. Esto se atribuye a las propiedades químicas de los materiales, el efecto que tiene la relación entre el calor de entrada generado en el proceso de soldadura y el efecto que tiene en la velocidad de enfriamiento.

Los procesos de soldadura más comunes empleados para soldar los aceros inoxidable son soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en inglés), soldadura de arco gas-metal (GMAW por sus siglas en inglés) y soldadura por arco gas-tungsteno (GTAW por sus siglas en inglés). [15]

Al realizar la unión de acero inoxidable mediante proceso de arco durante la solidificación se tiene la formación de ferrita  $\delta$  (delta) debido a la solidificación fuera del equilibrio se consigue una matriz austenítica con dendritas de ferrita  $\delta$ . [16]

El rápido enfriamiento en el proceso de soldadura es la razón de que la ferrita  $\delta$  no logre su transformación a fase austenita para que exista una homogeneidad completa. [15]

Otro fenómeno presente en el proceso de soldadura es la sensibilización del material, que se puede describir como la precipitación de fases ricas en cromo a lo largo de distintas zonas tales como:

- Interfaz austenita-ferrita  $\delta$ .
- Límites de grano.
- Límites de dendritas.

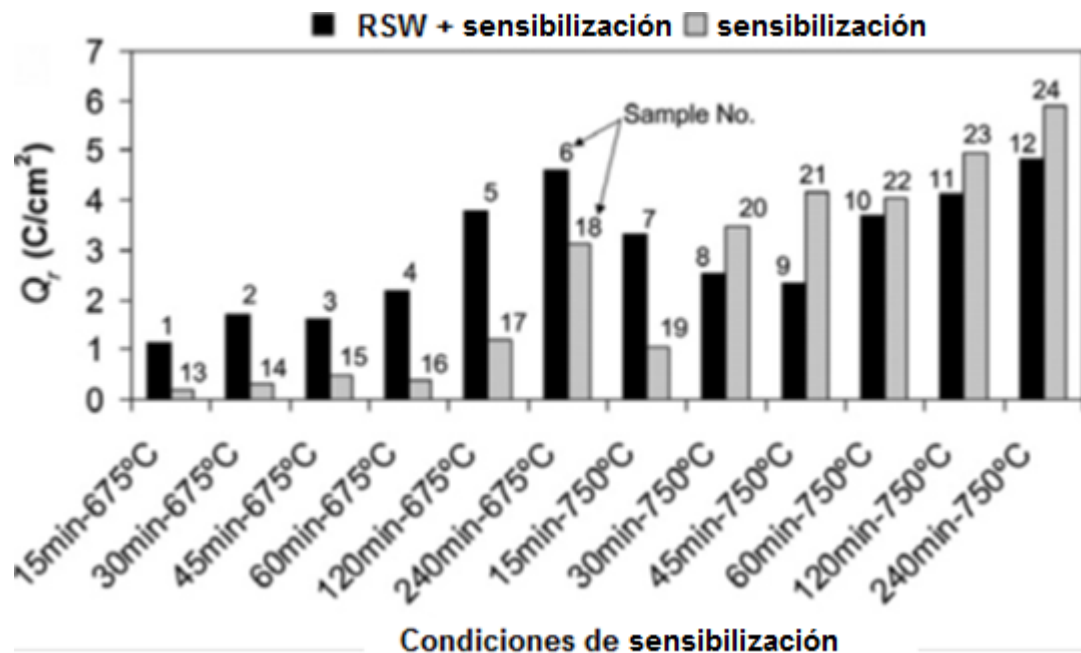
Dependiendo de la zona donde se presente la corrosión se denota una clasificación: en la zona de interfaz se presenta la corrosión transgranular, en el límite de grano se presenta la intergranular y en los límites de dendritas se denomina corrosión interdendrítica. [15]

Estudios realizados específicamente en la sensibilización del acero inoxidable demuestran las variaciones tiempo-temperatura del grado de sensibilización (DOS por sus siglas en inglés) medidos con pruebas semi-destructivas conocida como reactivación electroquímica potenciodinámica (EPR por sus siglas en inglés), en las cuales se presenta una comparativa de un proceso de sensibilización del acero inoxidable AISI 304 aplicando pre y post soldadura.

La sensibilización del acero inoxidable aplicada post soldadura muestra un registro mayor en comparativa con la sensibilización pre soldadura

(directamente al material base sin influencia del proceso de soldadura) a una temperatura de 675°C sin importar el tiempo de exposición, el resultado es menor.

Caso contrario cuando se incrementa la temperatura de sensibilización en el proceso pre soldadura se muestra una tendencia por incrementar el valor (expresado en unidades de Colombios/cm<sup>2</sup>). (Fig. 2.23) [15]

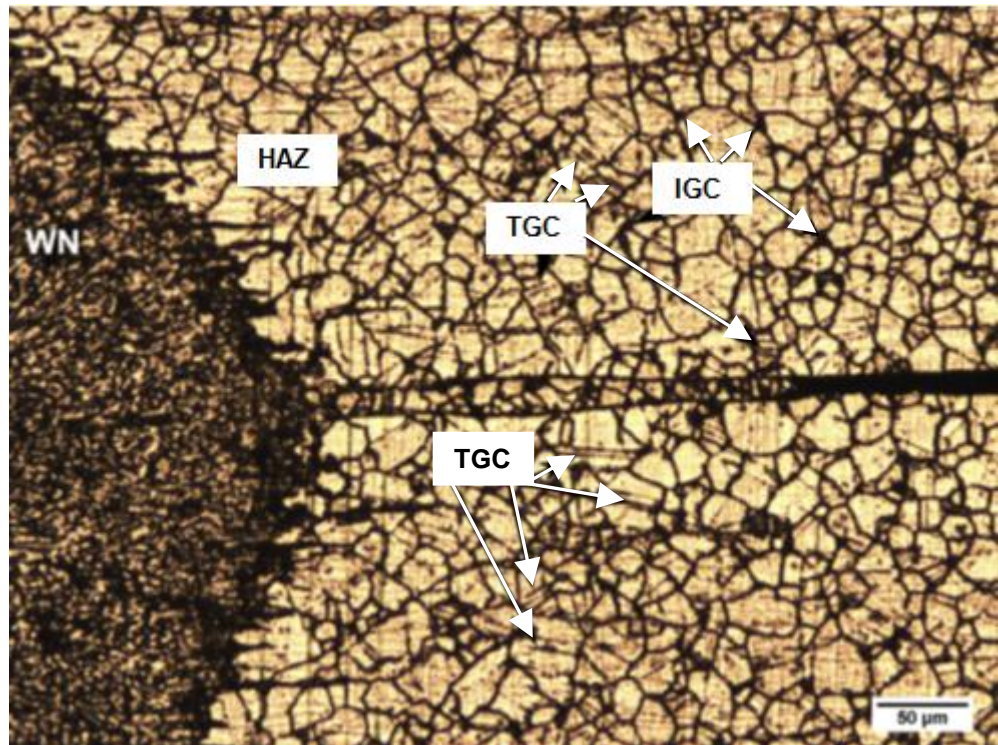


**Figura 2.23.** Cargas reactivas obtenidas por el proceso EPR. [15]

El incremento de la sensibilización con el aumento del tiempo de exposición, se deriva de los efectos del proceso de difusión de las fases ricas en cromo. La Fig. 2.24 muestra un acero inoxidable 304 soldado por RSW y sometido a un proceso de sensibilizado de 240 min a 750°C.

Se pueden apreciar fenómenos asociados con la sensibilización como lo son la corrosión intergranular (IGC) y transgranular (TGC) en la zona afectada por el calor. [15]

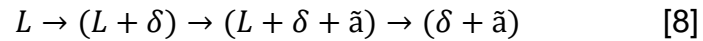




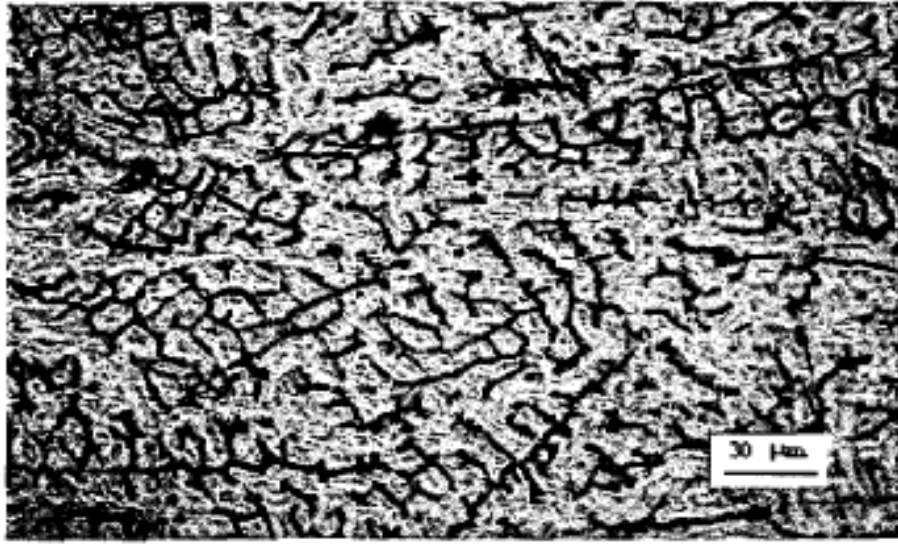
**Figura 2.24.** Microestructura muestra IGC y TGC en la zona ZAC. [15]

Los aceros inoxidable generalmente considerados con buenas características de soldabilidad, también presentan una serie de problemas en el proceso tales como impurezas, partículas de S y P, fracturas de estado sólido, recalentamiento (liberación de esfuerzos) y contaminación por partículas de electrodo.

En base a experimentaciones realizadas en acero inoxidable 304 (X5CrNi 18-10) bajo procesos de soldadura TIG micro-pulsos (corriente base 10 A, corriente de impulso 100 A y con relación de impulso 0.001/0.001s), TIG micro-pulsos (corriente base 10 A corriente de impulso 100 A y con relación de impulso 0.1/0.1s) y TIG a corriente continua de 100 A, el desarrollo del proceso de solidificación y las fases presentes se interpreta en base a la siguiente fórmula:



En un estado inicial de la fase líquida del cordón de soldadura la ferrita  $\delta$  se precipita y forma núcleos para la cristalización de la austenita, posteriormente se produce la generación de dendritas de austenita  $\tilde{a}$  (Fig. 2.25).



**Figura 2.25** Microestructura de la zona dendrítica en soldadura TIG micropulsada. [8]

En la soldadura por un proceso TIG pulsado se localizan dos tipos de fases, austenita y ferrita  $\delta$ , y en la zona afectada por el calor se tiene la presencia de pequeños contenidos de ferrita alfa. El empleo del proceso TIG micro pulsado da como resultado mayores contenidos de ferrita alfa en la soldadura, pero en la zona afectada por el calor los contenidos son similares (proceso pulsado y micro pulsado). [8]

## 2.5 Discontinuidades en las uniones de aceros inoxidables

### 304

El proceso de unión de los aceros inoxidables no está exento de presentar defectos o bien discontinuidades, las cuales se pueden catalogar en dos grupos: superficiales e internas. (Tabla 2.6)

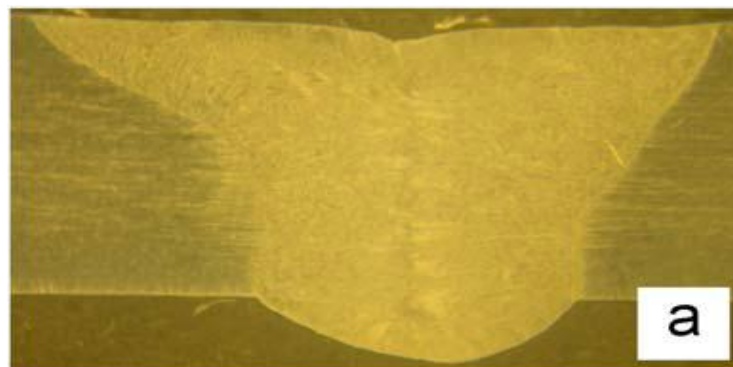
**Tabla 2.6.** Defectos en uniones de acero inoxidable.

<b>Superficiales</b>	<b>Internas</b>
Exceso de penetración	Grietas
Falta de penetración	Porosidad
Socavado	Inclusiones

Las discontinuidades superficiales son aquellas que se pueden apreciar por medio de la inspección visual del cordón de soldadura, dichas discontinuidades son explicadas a continuación:

### 2.5.1 Exceso de penetración

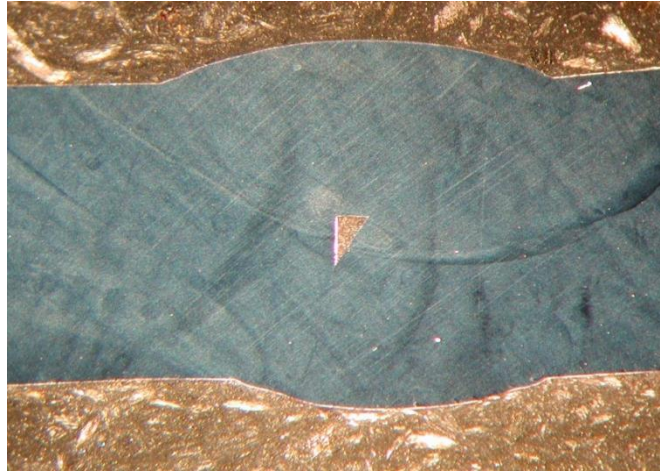
Una cantidad de material de aporte excesiva es depositada en la unión, en la cual se puede observar material colgado por debajo de ésta provocado por una mala preparación o una mala técnica de soldadura. (Fig. 2.26) [17]



**Figura 2.26.** Exceso de penetración. [16]

### 2.5.2 Falta de penetración

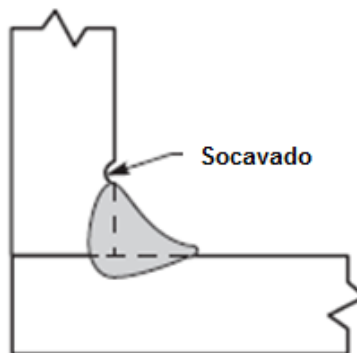
La falta de cantidad de material de aporte, la falta de calor de entrada o una velocidad de soldadura muy rápida son factores que pueden causar la falta de penetración, donde se aprecian zonas en las cuales no se logra la unión. (Fig. 2.27)



**Figura 2.27.** Falta de penetración.

### 2.5.3 Socavado

Esta discontinuidad es catalogada como una ranura en el material adyacente a la soldadura, la cual es generada en el mismo proceso y se convierte en un concentrador de esfuerzos. (Fig. 2.28)[18]



**Figura 2.28** Esquema de socavado. [18]

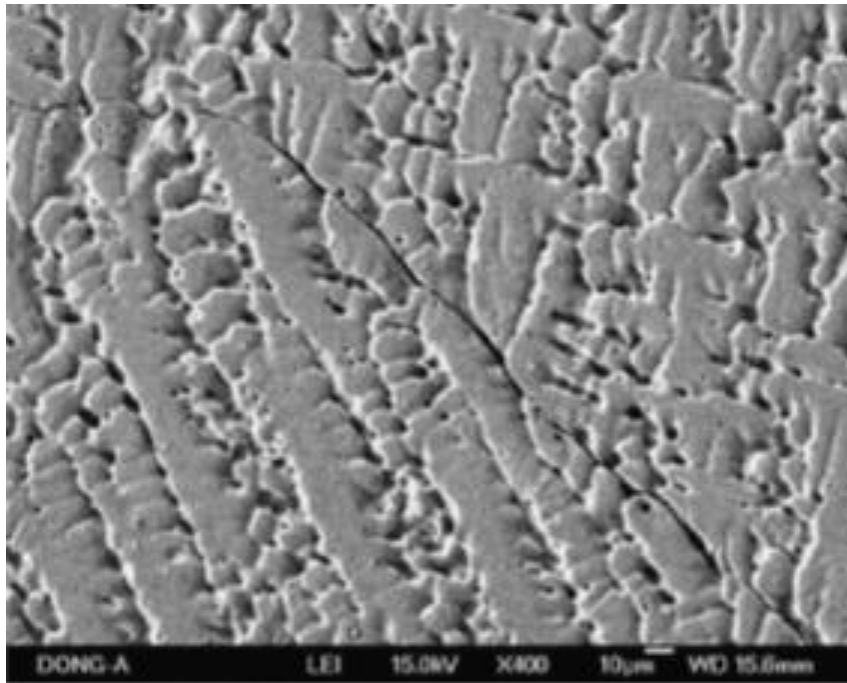
Las discontinuidades internas son aquellos defectos que no se pueden apreciar con una inspección visual, por lo tanto es necesario emplear métodos de prueba destructivos o no destructivos tales como pruebas de tensión, dobléz, radiografía, líquidos penetrantes por mencionar algunos. Dentro de éstas discontinuidades podemos identificar:

### 2.5.4 Grietas

La generación de grietas en los aceros austeníticos inoxidable es una de las principales discontinuidades presentes, esto debido principalmente a la composición del material, o bien, al tener una matriz austenítica presenta ya que presenta una mayor susceptibilidad a este tipo de discontinuidad en comparación a una matriz ferrítica. Si las grietas se generan en la zona de fusión, se les denominan grietas de solidificación y si se localizan en la zona afectada por el calor se les nombran grietas de licuación. [18](Fig. 2.29-2.30)



**Figura 2.29** Ejemplo de grieta. [19]



**Figura 2.30** Ejemplo de grieta a nivel microestructural. [19]

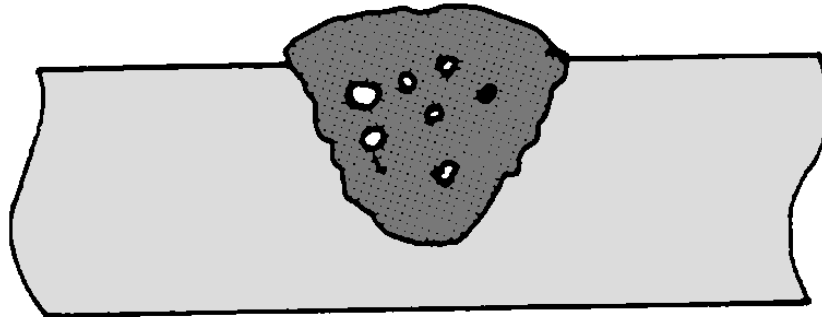
### 2.5.5 Porosidad

En el proceso de soldadura el gas que queda atrapado en el cordón debido a una rápida solidificación, genera porosidades ya sean solas y dispersas o bien agrupadas. Dichas porosidades resultan en grandes concentradores de esfuerzos por lo cual resultan problemáticas principalmente cuando se trabaja en contenedores o tuberías a presión.

Las porosidades se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Porosidad uniformemente dispersa. Es aquel tipo de porosidad que se encuentra a lo largo de la soldadura de manera distribuida y es atribuida a una técnica de soldadura deficiente.
- Porosidad agrupada. Son zonas en las cuales las porosidades están conjuntas a lo largo de la soldadura, principalmente al inicio y al fin del arco de soldadura.

- Porosidades alineadas. Presentes en su mayoría en la zona de interface metal base- soldadura. Provocada por contaminaciones de gas que no logra ser liberado.
- Porosidad vermicular. Son porosidades de gas en forma alargada que pueden estar presentes desde la raíz de la soldadura hasta la superficie. [18] (Fig. 2.31)

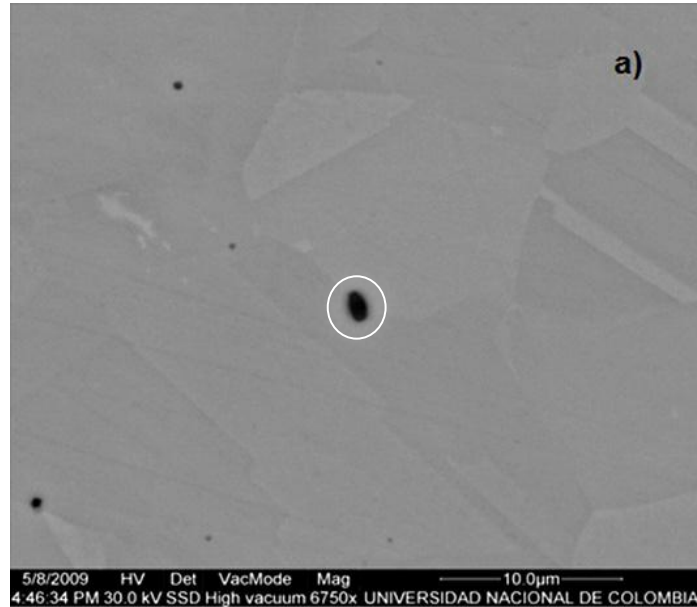


**Figura 2.31** Esquema de porosidades. [18]

### 2.5.6 Inclusiones

Las inclusiones en la soldadura se pueden presentar de dos tipos:

- Inclusiones de tungsteno. Este tipo de inclusiones son atribuidas al proceso de soldadura GTAW, donde partículas del electrodo quedan depositadas en la soldadura. Estas inclusiones son debido a una mala preparación del electrodo o bien a una mala técnica en la cual el electrodo se aproxima al cordón de soldadura o hace contacto y partículas del electrodo son aportadas a la unión.
- Inclusiones de óxido. Partículas de óxidos existentes en la superficie son atrapados en la soldadura al no poder ser fundidos y quedan presentes en el cordón solidificado, dichas inclusiones pueden generar grietas, debido a esto es necesario limpiar el área a soldar y las zonas aledañas para evitar cualquier inclusión existente. [20]



**Figura 2.32** Ejemplo de inclusiones. [20]

Dentro de los criterios de aceptación de las discontinuidades mencionadas se debe tomar en cuenta la aplicación de las piezas a realizar en base a normas, códigos y especificaciones ya establecidas.

## **2.6 Efecto de los parámetros de proceso GTAW en la microestructura y geometría del cordón de soldadura**

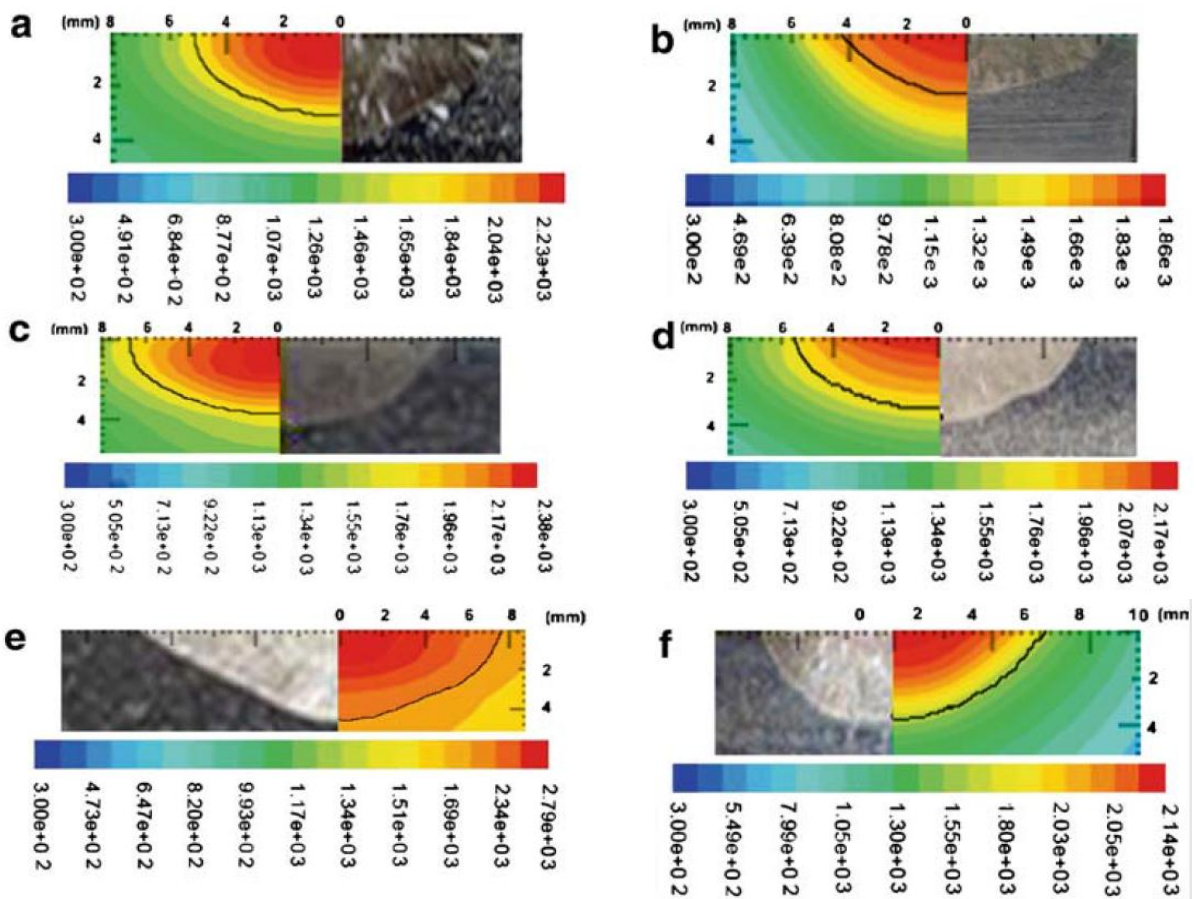
Tomando en cuenta los factores de calor de entrada y velocidad de desplazamiento se logran diseñar modelos matemáticos que son la base de la simulación para la predicción de la soldadura, la zona afectada por el calor, profundidad y ancho del cordón de soldadura. La simulación matemática se basa en las propiedades físicas del acero inoxidable. (Tabla 2.7). [21]



**Tabla 2.7.** Propiedades físicas de acero inoxidable 304. [21]

Propiedades	Valor
Densidad de líquido (kg/m <sup>3</sup> )	7.2 x10 <sup>3</sup>
Viscosidad efectiva (kg/m s)	0.1
Temperatura de solidus (°K)	1,697
Temperatura de liquidus (°K)	1,727
Coefficiente de temperatura de tensión superficial (N/m K)	-0.43 x 10 <sup>-3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	1.96 x 10 <sup>-5</sup>

El desarrollo de estos análisis numéricos juega un papel muy importante para predecir el comportamiento de la soldadura y su microestructura mediante la simulación de dichos modelos matemáticos. [21](Fig. 2.33)



**Figura 2.33.** Geometría del cordón de soldadura, simulada y experimental [21]

La Fig. 2.33 ilustra las comparaciones de la simulación con el desarrollo experimental de la soldadura, donde se observa en la simulación el efecto del calor de entrada a lo largo de la geometría de la soldadura. Los parámetros a modificar son la corriente de entrada y la velocidad de avance (Ver Tabla 2.8). [21]

**Tabla 2.8.** Valores de parámetros. [21]

Muestra	Calor de entrada (J/mm)	Corriente (Amp)	Voltaje (V)	Velocidad avance (cm/min)
a	490	110	11.5	10
b	328	110	11.5	15
c	726	150	12.6	10
d	487	150	12.6	15
e	1069	200	13.8	10
f	717	200	13.8	15

Los datos de la simulación y los experimentales muestran una reducción en la penetración del cordón de soldadura debido al incremento de la velocidad, esta variación no resulta significativa. También una reducción en el ancho del cordón de soldadura se denota en las imágenes, lo cual se puede deducir en un decremento en el volumen del cordón esto provocado por una mayor velocidad y un acumulamiento menor de calor.

Haciendo una comparación de los datos obtenidos de manera experimental y los datos simulados, se obtiene una aproximación en los valores de ancho del cordón y la profundidad del mismo. Los datos simulados son comparados con las muestras reales medidas en base a análisis de microscopía óptica a 200X. (Ver Tabla 2.9)[21]

**Tabla 2.9.** Comparación de tamaño de soldadura. [21]

Profundidad Simulación (mm)	Profundidad Experimental (mm)	Ancho simulación (mm)	Ancho experimental (mm)	Muestras
2.8	3.6	5	5.4	a
2	2.2	4.2	4.4	b
3.6	4.6	6.4	7.2	c
3.2	4.1	5.7	5.8	d
4.4	4.8	7.5	9.6	e
3.5	4.4	6.2	5.7	f

La comparación simulación-experimental brinda resultados aceptables, teniendo variaciones que pueden ser atribuidas al comportamiento no newtoniano del fluido como a la tensión superficial o viscosidad del mismo material.

Determinar la forma del cordón de soldadura es un factor importante en el desarrollo de la estructura de grano y el proceso de crecimiento dendrítico. A la par de esto, los parámetros de solidificación como el rango de crecimiento  $R$  y el gradiente térmico  $G$ , son variables esenciales en el proceso de solidificación. [21]

Para el cálculo del rango de crecimiento se emplea la ecuación:

$$R = V \cos \alpha$$

Dónde:

$R$  = Ángulo en la dirección de soldadura y la normal al cordón de soldadura

$V$  = velocidad de soldadura

Valores de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  representan la línea central de la soldadura y la zona de fusión respectivamente. Para obtener el valor en la línea central tenemos:

$$R_{CL} = V$$

Mientras que en la zona de fusión:

$$R \approx 0$$

Los rangos de G y R son muy importantes para definir la estructura de solidificación y el comportamiento de la misma, ya sea G/R o bien G·R. Al incrementar la relación G/R, la morfología de la interface cambiará de equiaxial-dendrítica a celular-dendrítica y a granos celulares.

Mediante esto se define que la estructura de solidificación será afectada por el calor de entrada modificando la estructura final, por lo cual se buscan valores de decremento para la relación G/R para así lograr una morfología equiaxial-dendrítica al final de la solidificación.

Para obtener el calor de entrada, definido como la cantidad de calor absorbido por unidad de longitud empleamos la siguiente ecuación:

$$H_{in} = \eta \frac{EI}{V}$$

Donde:

$$H_{in} = \text{Calor de entrada}$$

$$\eta = \text{Coeficiente de eficiencia de la fuente de calor}$$

$$E = \text{Voltaje}$$

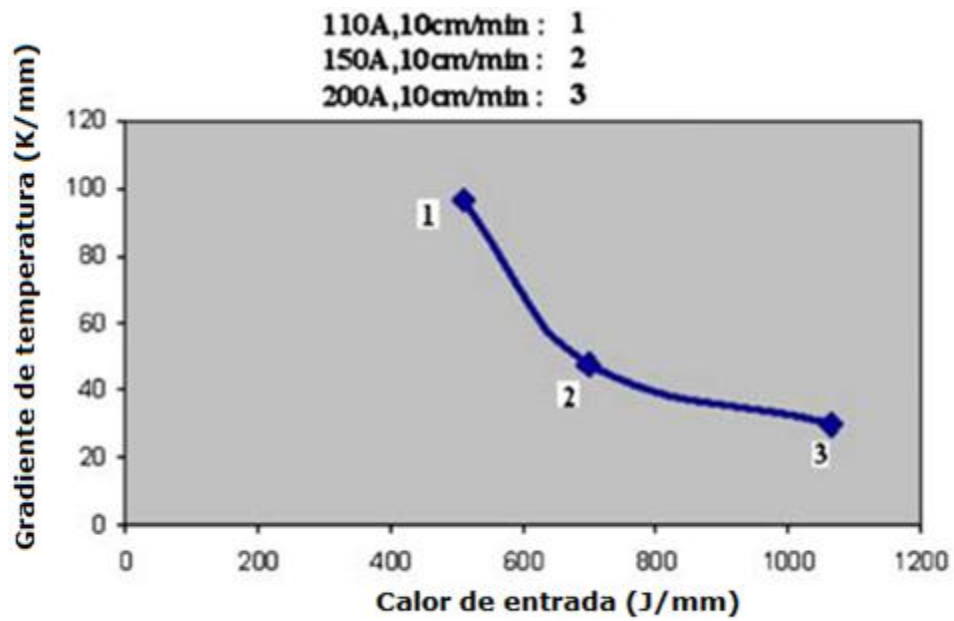
$$I = \text{Corriente}$$

$$V = \text{Velocidad de avance}$$

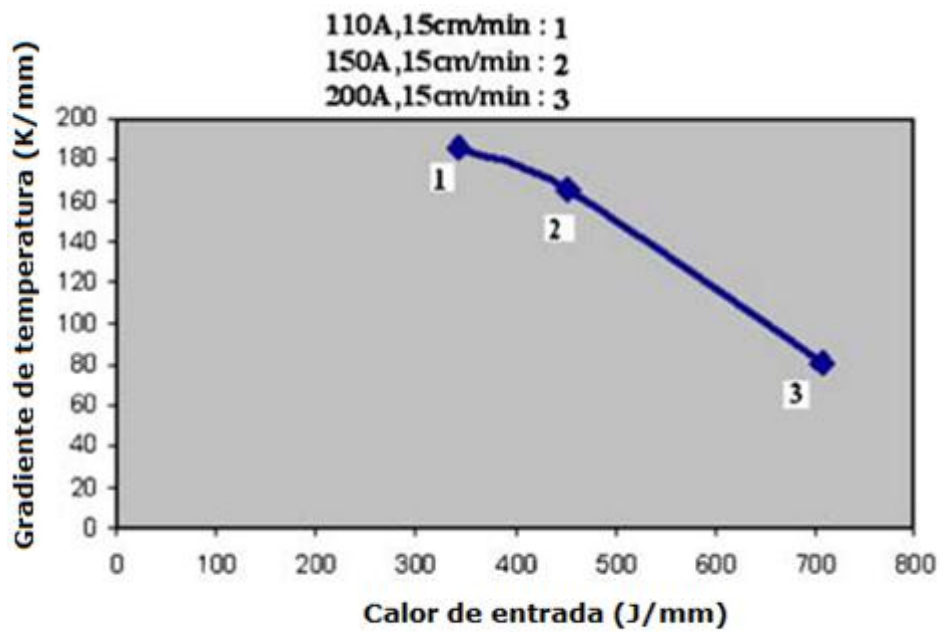
Un incremento en el calor de entrada brinda como consecuencia un decremento en los valores de la relación G/R, para esto tenemos valores del gradiente de temperatura con respecto a la línea de fusión y en la línea central.

[21]

En las gráficas que se muestra en la Fig. 2.34 se puede observar que a mayor calor de entrada con una velocidad dada se obtiene un gradiente de temperatura menor y por lo tanto un valor de la relación G/R menor, esto afectara directamente a la morfología de solidificación, obteniendo un crecimiento dendrítico, por el contrario a bajas entradas de calor se obtiene un crecimiento celular.

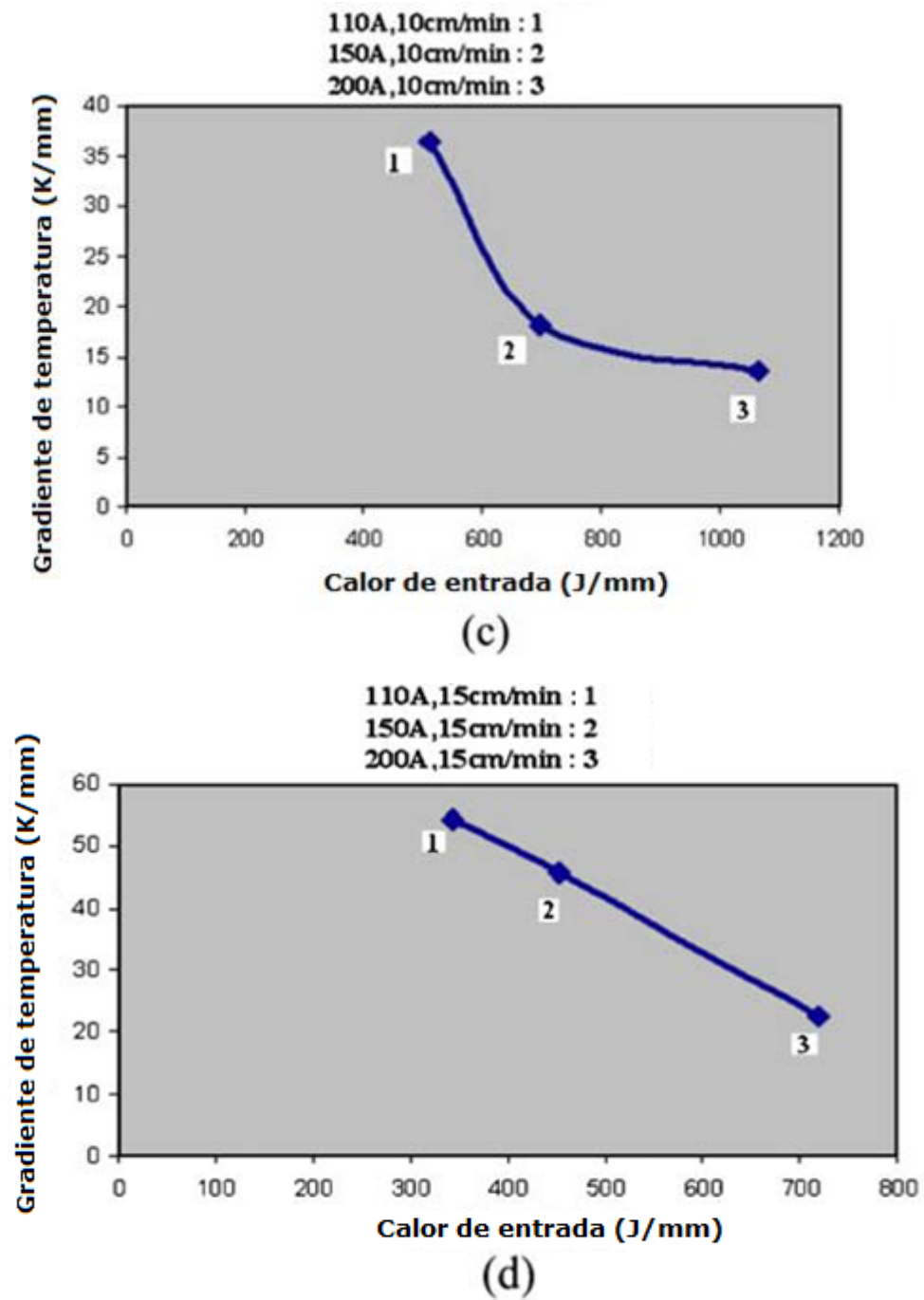


(a)

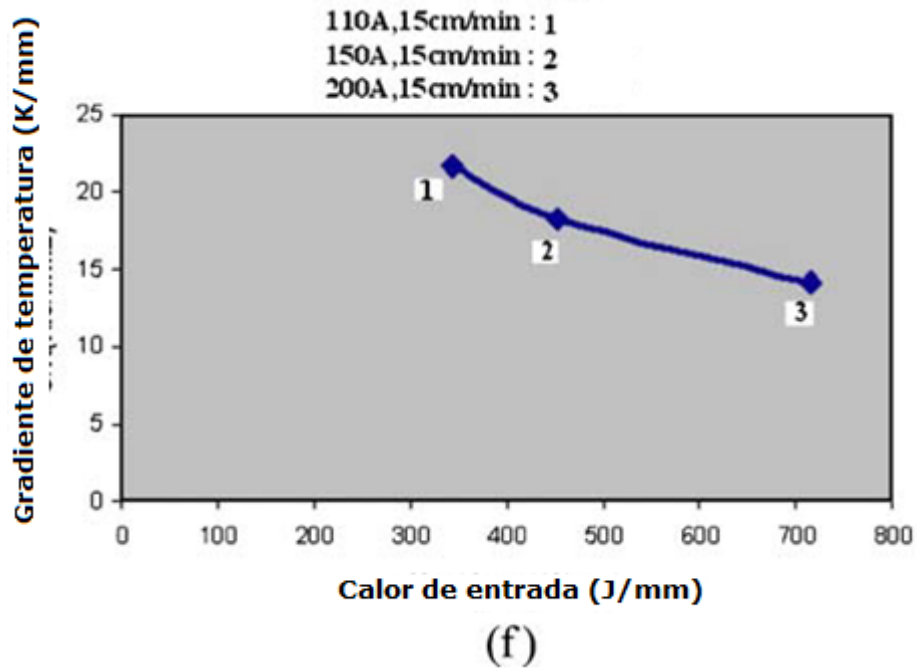
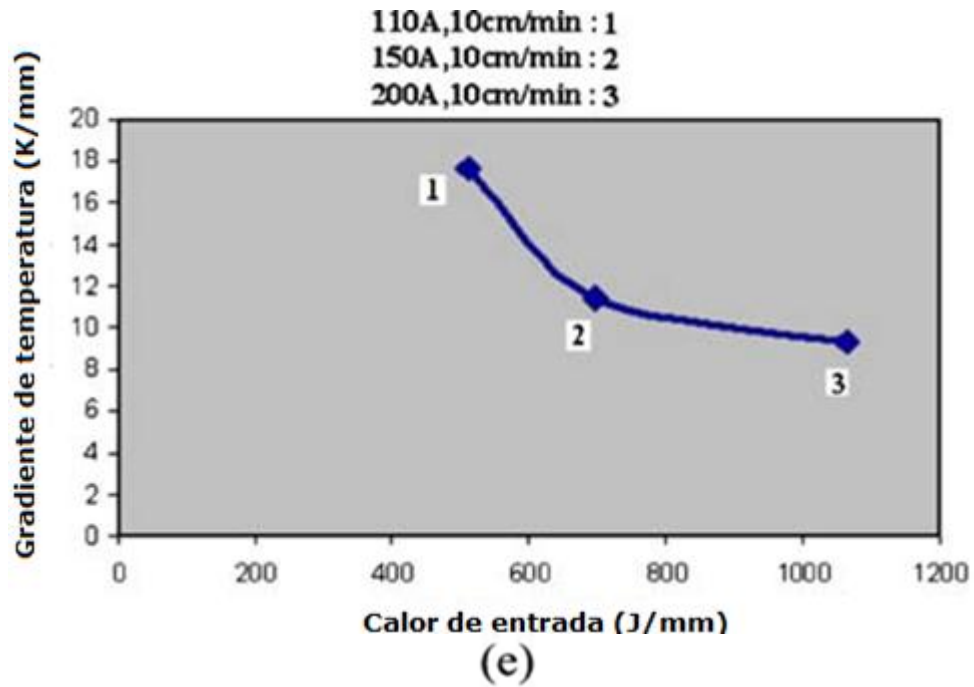


(b)

**Figura 2.34.** (a) 10 cm/min (b) 15 cm/min Gradiente de temperatura en línea de fusión. [21]

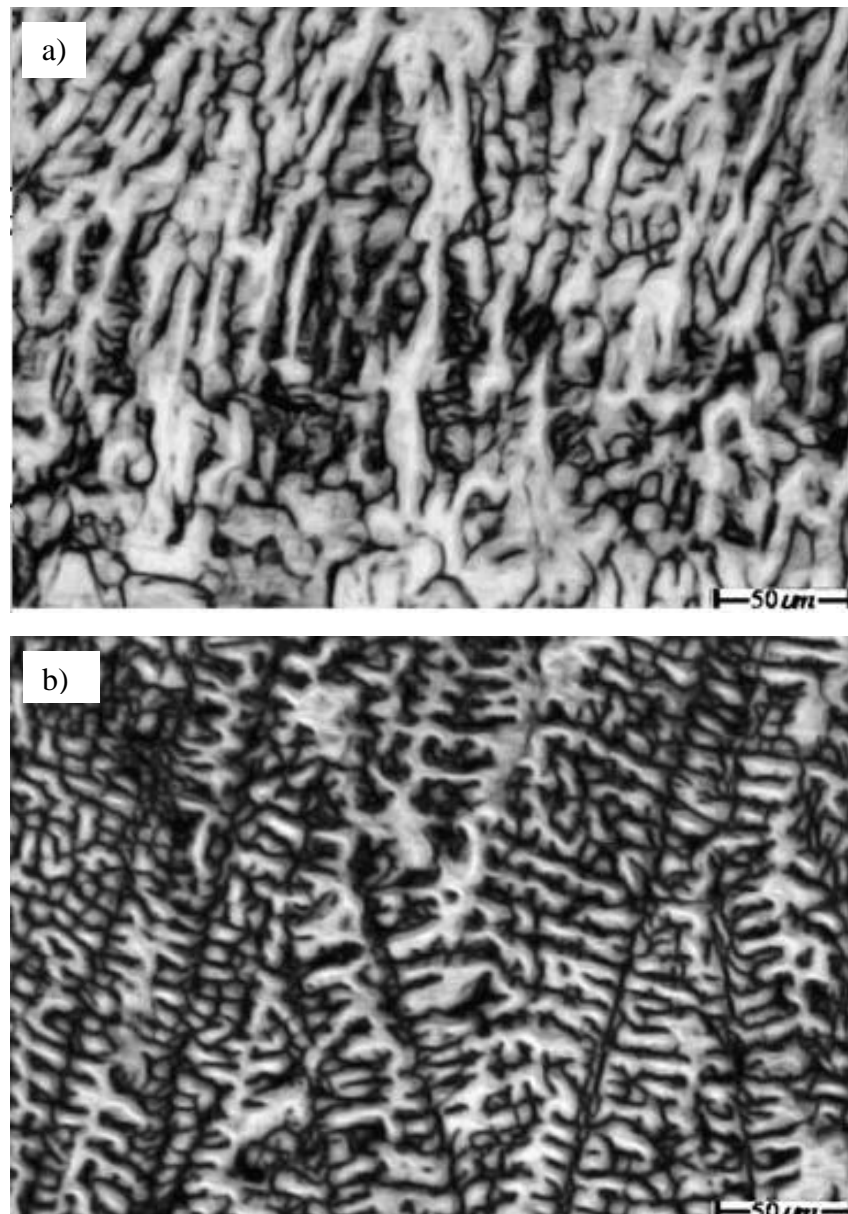


**Figura 2.35.** (c) 10 cm/min (d) 15 cm/min Gradiente de temperatura en línea central. [21]



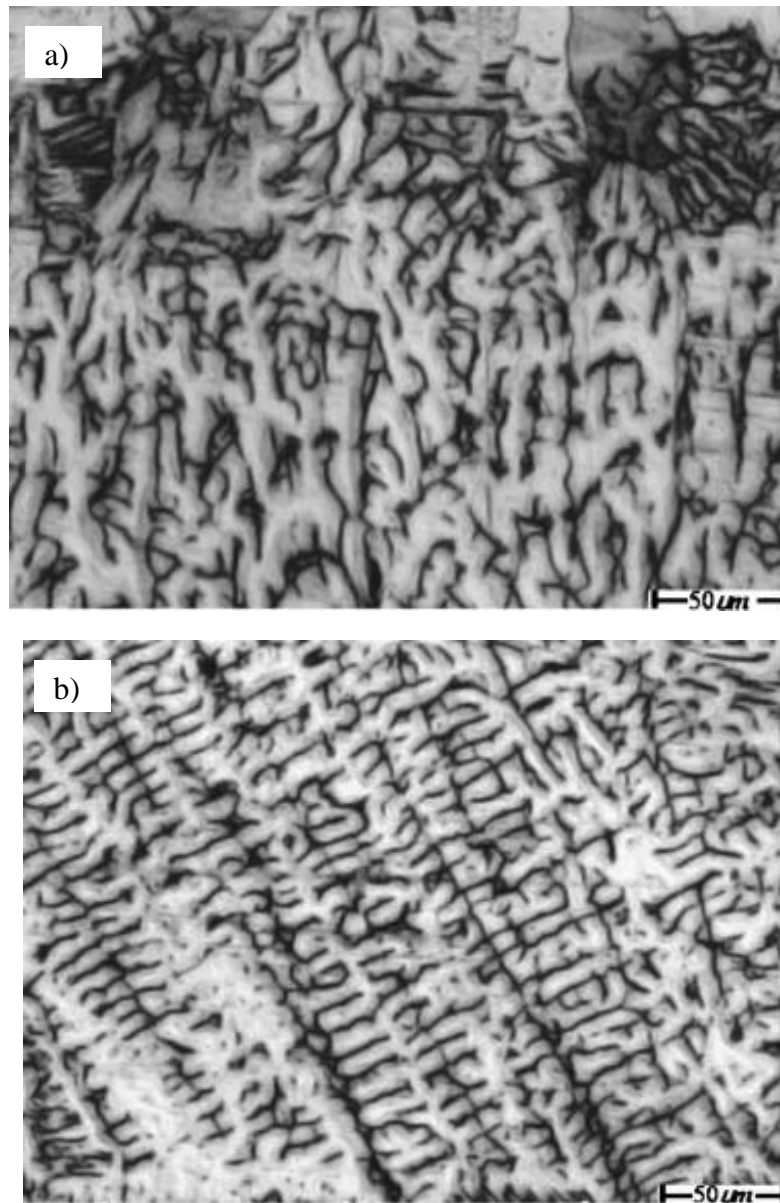
**Figura 2.36.** Valor de G/R para e) 10cm/min f) 15cm/min. [21]

En las Fig. 2.37 y 2.38 se observa la variación microestructural de la línea de fusión al centro del cordón debido al decremento en la relación G/R. [21]



**Figura 2.37.** a) Crecimiento celular en la línea de fusión b) Crecimiento dendrítico al centro de la soldadura;  $I=110A$ ,  $V=15$  cm/min. [21]





**Figura 2.38.** a) Crecimiento celular en línea de fusión b) Crecimiento dendrítico en el centro de la soldadura;  $I=150A$ ,  $V=15$  cm/min. [21]

La predicción del gradiente de temperatura  $G$  así como la relación  $G/R$  son elementos que se pueden emplear para realizar un diseño en el cual se obtendrá una microestructura deseada partiendo de que el valor crítico para la formación de una estructura dendrítica equiaxial es aproximadamente  $13K s/mm^2$ . [21]

El conocer el desarrollo de la microestructura es una base para la prevención de defectos, evitar zonas de sensibilización, microestructuras no deseadas o fases presentes que no beneficien a una aplicación definida. Tanto el ancho del cordón de soldadura como de la penetración del mismo, son factores que ayudan para prevenir problemas como faltas de fusión y exceso de penetración disponiendo así de una herramienta con la cual se puede predecir el resultado final de la unión sin necesidad de realizarla de manera física.

## **2.7 Factores que influyen en la soldadura por puntos de resistencia en aceros inoxidables austeníticos**

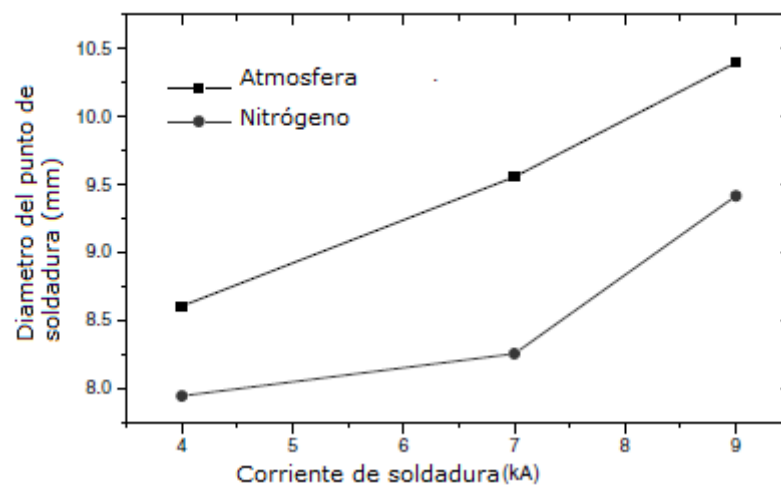
En la soldadura por puntos de resistencia existen variables a considerar al momento de llevar a cabo una unión, esto se debe a que después de realizarlas se presentan una serie de cambios en las propiedades mecánicas y metalúrgicas tanto en la zona afectada por el calor como en el punto de soldadura.

La apariencia La apariencia final de la soldadura no debe de presentar fusión en la superficie, hendiduras muy profundas ocasionadas por la presión de los electrodos en el material ni grietas en la superficie generadas durante el proceso de soldadura. En la Fig. 2.39 se muestran algunos ejemplos de uniones por puntos de resistencia. [22]

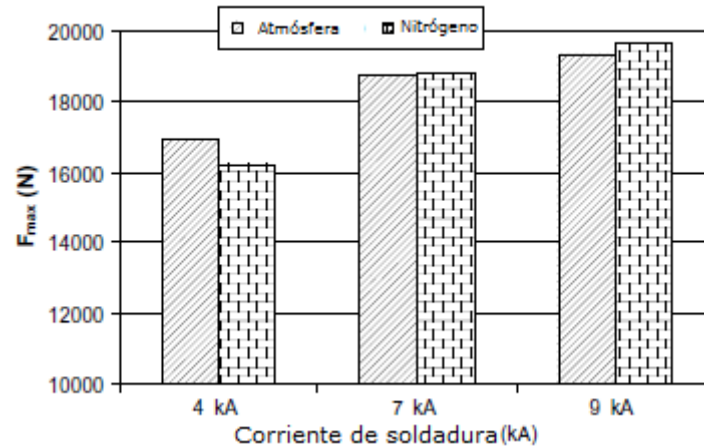


**Figura 2.39.** Uniones de RSW a distintos valores de corriente. [22]

Los parámetros de soldadura, tales como la atmosfera de soldadura y el tipo de enfriamiento son variables esenciales que influyen directamente en la unión soldada. El incremento en el tamaño en los puntos de soldadura está ligado al aumento en la corriente de entrada, siendo ésta una variable de los parámetros de configuración, brindando no solo una diferencia en el incremento del tamaño del punto de soldadura (ver Fig. 2.40), sino también un incremento en su esfuerzo de corte como se muestra en la Fig. 2.41.

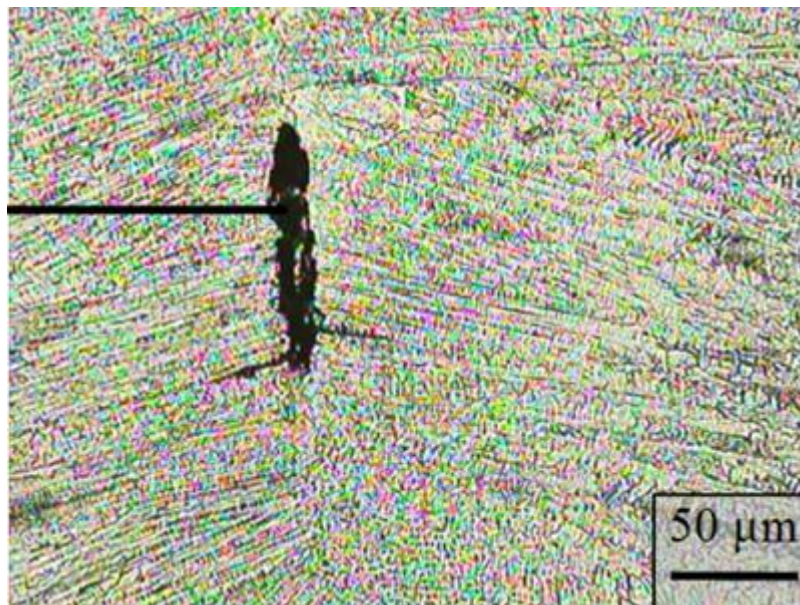


**Figura 2.40.** Gráfica de incremento de diámetro. [22]



**Figura 2.41.** Gráfica corriente- Esfuerzo de corte. [22]

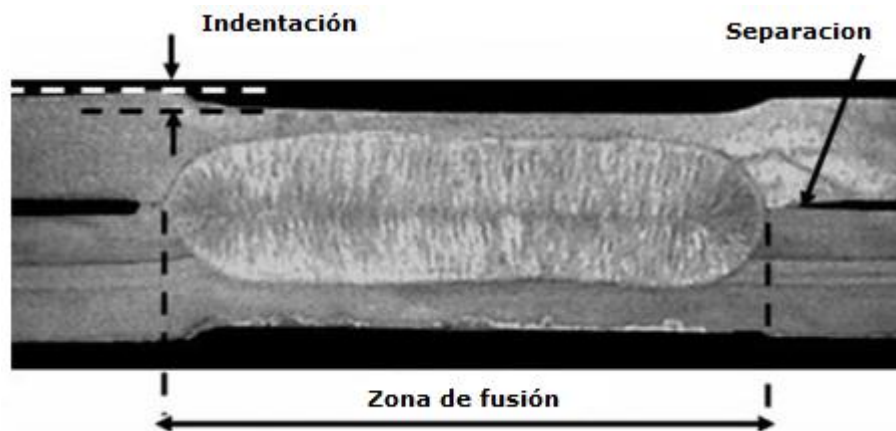
Cabe mencionar que el incremento en la corriente, partiendo de la premisa de los mismos tiempos de ciclos de trabajo, genera un calor de entrada más elevado, factor que se identifica como una de las causas de la generación de cavidades o grietas post-soldadura como se observa en la Fig. 2.42 que es una grieta ubicada al centro del puto de soldadura después de realizar la unión y enfriado a temperatura ambiente. [22]



**Figura 2.42.** Ejemplo de cavidad al centro del botón de soldadura. [22]

En las gráficas mostradas en las Fig. 2.40 y 2.41 se observan los resultados de muestras a 3 distintos valores de corriente en dos medios de enfriamientos distintos, a la atmósfera y en nitrógeno. El objetivo de éste último es el tratar de evitar los efectos del incremento de calor de entrada y evitar las grietas en el botón de soldadura, tal como se muestra en la Fig. 2.42. [22]

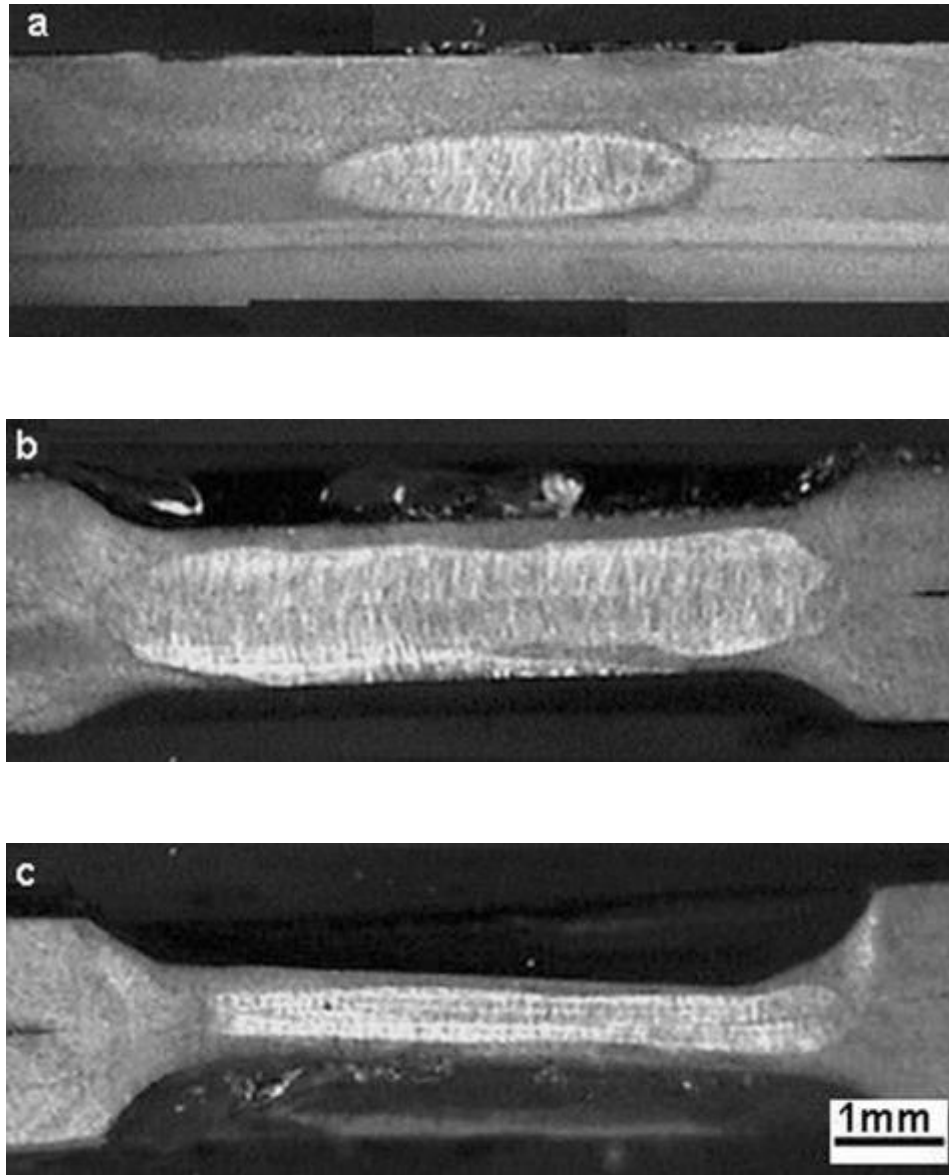
Un ejemplo de un botón de soldadura se puede observar en la Fig. 2.43 en la cual se identifican las dos placas de material base, el botón de soldadura, la zona de fusión y la indentación provocada por los electrodos. [23]



**Figura 2.43.** Macroestructura típica de botón de soldadura. [23]

Las variaciones en la corriente de entrada pueden generar defectos en el botón de soldadura los cuales pueden ser identificados en la Fig. 2.44:

- a) Falta de fusión debido a que el calor de entrada generado por el equipo no es suficiente para lograr derretir el material y el botón no se forma.
- b) Indentación de los electrodos muy marcada con valores de corriente y tiempos muy elevados provocando una exposición del botón en la parte inferior.
- c) Indentación excesiva, reducción del espesor muy considerable, un botón de soldadura delgado y por lo tanto sensible a fallas. [23]



**Figura 2.44.** Ejemplos de soldaduras por puntos de resistencia. [23]

El ancho del botón de soldadura incrementa con el aumento de corriente como se visualiza en la Fig.2.40, se complementa con la gráfica de la Fig. 2.45 en la cual se observa un incremento en el tamaño del botón de soldadura (zona de fusión).

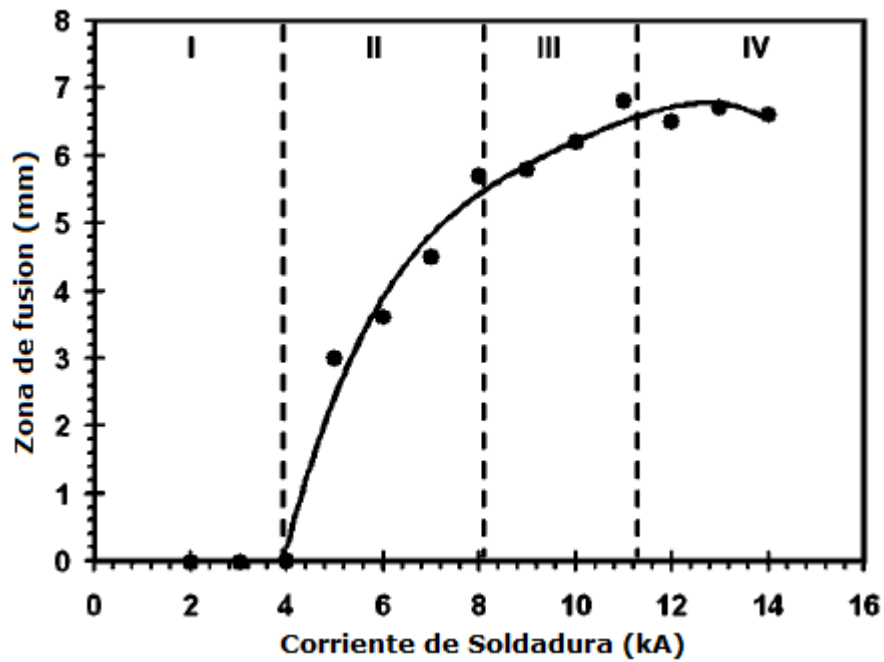


Figura 2.45. Gráfica de incremento de la zona de fusión. [23]

Dos tipos de falla son identificados en las uniones por puntos de resistencia que son:

- a) Entre caras (interfacial)
- b) Salida (pull-out)

Estos tipos de fallas o defectos en las uniones son identificados en la Fig. 2.46

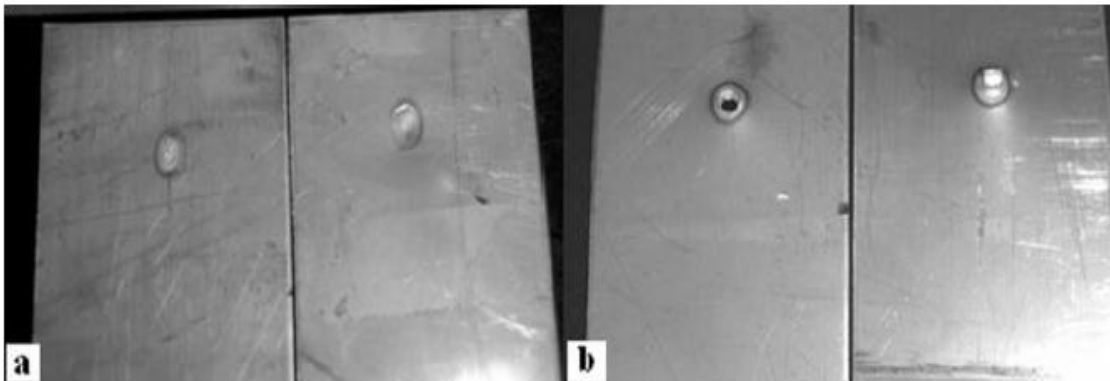
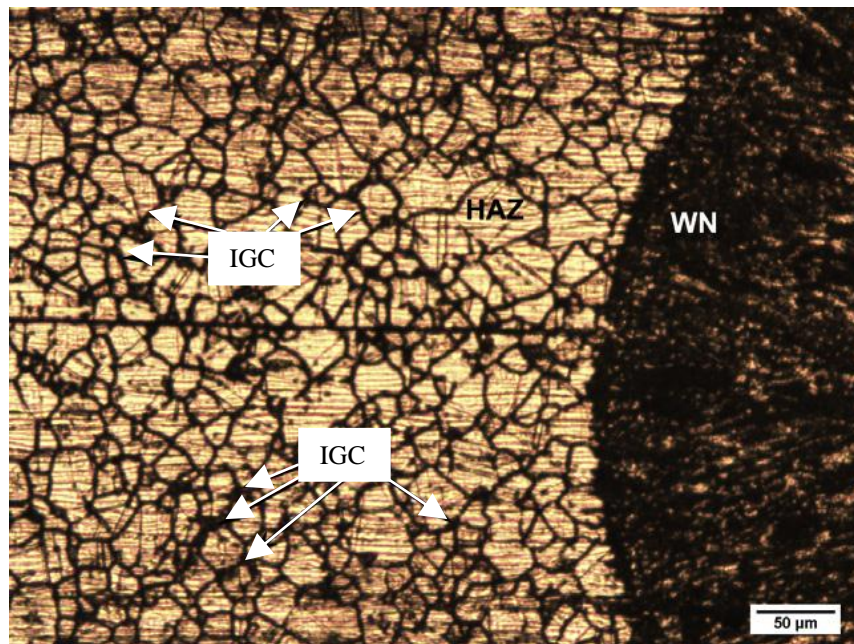


Figura 2.46. Defectos a) Entre caras b) Salida [23]

En la Fig. 2.47 se muestra una unión por puntos de resistencia, en donde se tiene la presencia de ferrita (símbolo) en el cordón de soldadura. Además, se identifican la zona afectada por el calor (HAZ) y las áreas de corrosión intergranular. [15]



**Figura 2.47.** Corrosión interdendrítica en soldadura por puntos de resistencia.

[15]



## **CAPÍTULO 3**

# **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA**

Los aceros inoxidables son ampliamente aplicables en la elaboración de mobiliario hospitalario, cabe destacar que es necesario cumplir con una serie de factores muy importantes que son:

- Parámetros del equipo bien establecidos
- Preparación adecuada del material
- Habilidad del personal soldador

Estos puntos son de alta importancia ya que si no se cuenta con el amplio control de los tres y lo que estos agrupan, no será posible desarrollar una unión de calidad.

Los parámetros de soldadura incluyen:

- Corriente del equipo
- Voltaje
- Gas de protección
- Electrodo
- Material de aporte
- Velocidad de avance
- Posición de soldadura

La corriente del equipo debe estar regulada y comprobado que la configuración es adecuada para la pieza a soldar, un valor inferior significa una falta de calor de entrada y posiblemente una falta de fusión, por el contrario un incremento excesivo en la corriente no significa que se logrará una fusión completa e inclusive puede generar una serie de defectos mayores por las excesivas concentraciones de calor.

El gas de protección así como el flujo del mismo debe asegurar la protección completa de la unión soldada, para de este modo evitar cualquier contaminación y una solidificación adecuada. En conjunto con la protección, es necesaria una preparación del electrodo para no tener la presencia de inclusiones y un arco de soldadura completamente estable.

La posición, velocidad de avance y material de aporte, están ampliamente relacionados con el personal soldador y su habilidad para manejar estos elementos e interactuar con ellos para lograr una soldadura de calidad en la cual se pueda realizar una unión sin la presencia de defectos.

La preparación de la unión es un factor que define los parámetros de soldadura, ya que la configuración de los parámetros se basa en el tipo de unión a desarrollar. El personal soldador debe estar ampliamente capacitado con el equipo a trabajar, demostrar una técnica de calidad en el desarrollo de la

unión para lograr desarrollar piezas de calidad, el entrenamiento continuo y capacitación especializada es necesaria y obligatoria.

Al desarrollar una soldadura de calidad se evitan defectos como faltas de fusión, porosidades y socavados. Dichos defectos no pueden ser permitidos en el desarrollo de mobiliario hospitalario por los altos estándares de calidad y la necesidad de limpieza y esterilización.

Dentro de las uniones se logran identificar algunas zonas como son la de soldadura (con presencia de ferrita ( $\delta$ ) en una matriz austenítica), la zona afectada por el calor y el metal base.

La ferrita- $\delta$  presente en la soldadura se desarrolla por las velocidades de enfriamiento en las cuales no alcanza a transformar completamente a austenita, la presencia de la ferrita- $\delta$  mejora la dureza de la soldadura y resulta de beneficio para la elaboración de estas piezas.

En las zonas afectadas por el calor se visualizan granos más grandes que en el material base para los casos de soldadura TIG y RSW, pero es necesario tener en cuenta la presencia de los tipos de corrosión ya sea interdendrítica, intergranular o transgranular, puesto que pueden generar puntos en los cuales se debilita el factor de resistencia a la corrosión propia del acero inoxidable 304 y para fines médicos puede resultar adverso.

La predicción y anticipación a los resultados físicos mediante la simulación, es una herramienta que brinda un amplio panorama para establecer parámetros correctos para cierto tipo de aplicación, los detalles físicos de la soldadura y las posibles características de la unión. Cabe mencionar que las simulaciones no son simples de desarrollar pero el beneficio es ampliamente de utilidad.

# **CAPÍTULO 4**

## **CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentan los resultados de un análisis en uniones soldadas por el proceso GTAW en placas de 1/8" de acero inoxidable AISI 304 con una preparación sin bisel. Una pieza identificada como FRAME de MAYO, el cual abarca tres modelos en la empresa conocida como BLICKMAN ubicada en Manufacturas Parque Zapalinamé en Saltillo, Coahuila México.

Los análisis de difracción de rayos X fueron empleados para la identificación de la fase Ferrita- $\delta$  presente en una matriz austenítica. Los parámetros de soldadura obtenidos como resultado de esta investigación están basados en el desarrollo de una serie de pruebas para identificar los valores adecuados para realizar una unión tomando como principales parámetros la corriente, presión de gas de protección, material de aporte, velocidad de avance y la habilidad del soldador.

Los aceros inoxidable son conocidos por sus excelentes propiedades mecánicas, su principal característica es la resistencia a la corrosión debido a la capa de protección que se genera en el material, por tal motivo la elaboración de mesas, carros para utensilios de quirófano gabinetes para el área médica, emplea este tipo de materiales. Debido a esta aplicación, la presencia de defectos en las uniones es inaceptable por mínimo que este sea por los ambientes esterilizados en los cuales el mobiliario se encuentre.

#### 4.1 Materiales y equipo

La composición química del acero inoxidable AISI 304 está dada en la Tabla 4.1, en la cual se aprecian sus principales elementos que son Cr y Ni. La Tabla 4.2 muestra las propiedades mecánicas pertinentes a dicho material. El equipo de soldadura empleado en el desarrollo de la experimentación es un equipo Matxtar 200.

La caracterización microestructural en la zona de unión de las muestras se llevó a cabo mediante: microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (MEB) con un equipo LEICA CAMBRIDGE STEREOSCAN 440, y para la difracción de rayos X se utilizó un equipo SIEMENS D500 CrKr RADIATION. Para el perfil de microdureza fue empleado un peso de 50 gr al momento de efectuar las indentaciones.

**Tabla 4.1.** Composición química del acero inoxidable AISI304.

%e.p.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V
AISI 304	0.04	1.40	0.024	0.022	0.42	18.03	8.74	0.11	0.10	0.09

**Tabla 4.2.** Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304.

Material	Resistencia a la Tensión	Esfuerzo de cedencia	Elongación %	Dureza HRB
AISI 304	669 Mpa	346 Mpa	54	86

Para establecer los parámetros de soldadura adecuados se desarrolló una serie de muestras iniciales, la cual constaba de 10 uniones con el mismo procedimiento realizado y con variaciones en los parámetros de corriente y material de aporte tal como se muestran en la Tabla 4.3. El procedimiento de soldadura fue de tipo manual, con un control del equipo mediante pedal.

En base a los resultados de la primera lista de muestras, se desarrollaron 9 adicionales de la misma pieza con parámetros de soldadura iguales exceptuando el tiempo de soldadura en cada cordón (tiempo C1 y C2) y con tres soldadores distintos para analizar la posible variación en los resultados (ver Tabla 4.4).

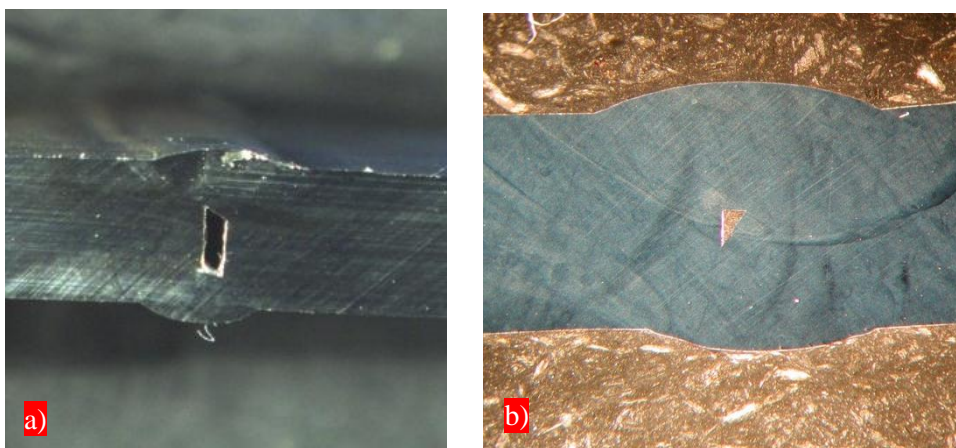
**Tabla 4.3.** Parámetros de muestras FR01-FR10.

Muestra	Corriente (Amp)	Presión de Gas (cfh)	Aporte (pulgadas)	Tiempo C1 (seg)	Tiempo C2 (seg)
FR01	65	28	.045"	18	17
FR02	70	28	.045"	16.5	14
FR03	75	28	.045"	17.5	18.5
FR04	80	28	.045"	15	17
FR05	85	28	.045"	17.5	18.5
FR06	65	28	$\frac{1}{16}$ "	18.5	18.5
FR07	70	28	$\frac{1}{16}$ "	13	13.5
FR08	75	28	$\frac{1}{16}$ "	15	17
FR09	80	28	$\frac{1}{16}$ "	17.5	17
FR10	85	28	$\frac{1}{16}$ "	15.5	18

**Tabla 4.4.** Parámetros de muestras FR11-FR19.

Muestra	Corriente (Amp)	Presión de Gas (cfh)	Aporte (pulgadas)	Tiempo C1 (seg)	Tiempo C2 (seg)
FR11	75	28	.045"	21	26
FR12	75	28	.045"	21.5	20
FR13	75	28	.045"	23	24
FR14	75	28	.045"	30	30
FR15	75	28	.045"	27	27
FR16	75	28	.045"	25.5	25
FR17	75	28	.045"	46	44.4
FR18	75	28	.045"	42	45
FR19	75	28	.045"	41	39

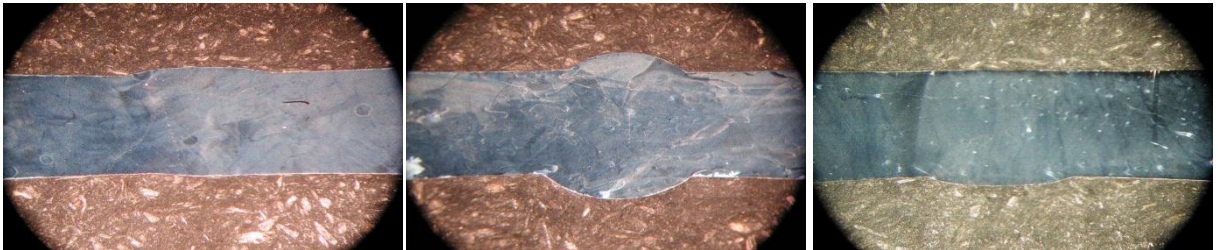
La problemática existente es una falta de conocimiento en los parámetros adecuados para llevar a cabo la unión, esto provoca la presencia de falta de fusión al centro de la unión (ver Fig. 4.1a y 4.1b) generando fracturas en la soldadura al someter la pieza a trabajo. Por tal motivo, el definir parámetros adecuados para realizar una soldadura con fusión completa es el punto principal, en conjunto con la caracterización de la unión para observar las fases presentes en la soldadura.



**Figura 4.1.** a) Muestras FR01 vista con el estereoscopio 4x y b) muestra FR12 con falta de fusión presente 16x.

## 4.2 Análisis y discusión de resultados del caso de estudio

Para el desarrollo de las muestras se emplearon placas de 2" x 2" x 1/8", el diseño de la unión no presentó bisel únicamente existe una separación no mayor a 1/32" entre las placas. Una unión con fusión completa se obtuvo de las muestras FR03, FR13, FR15 y FR16 como se identifica en la Fig. 4.2. no se identifican porosidades o fracturas en las mismas

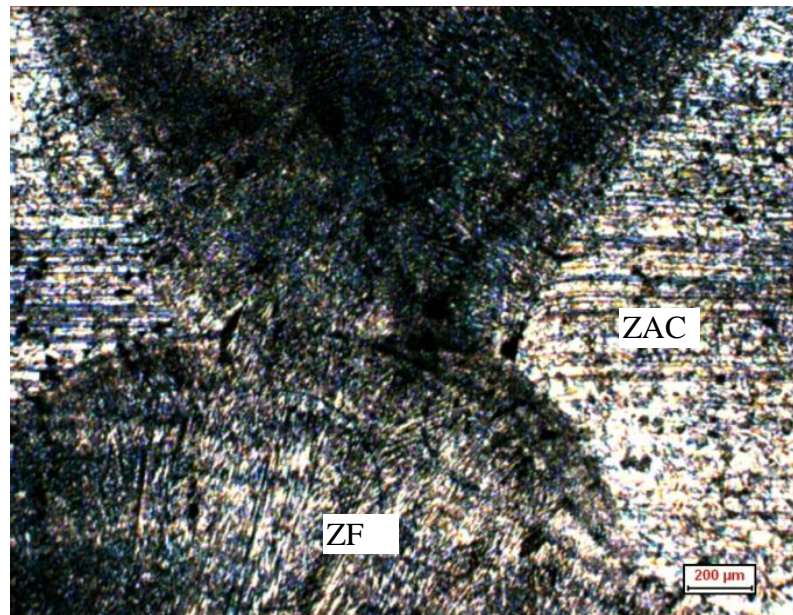


**Figura 4.2.** Fotografías de estereoscopio tomadas a 4X.

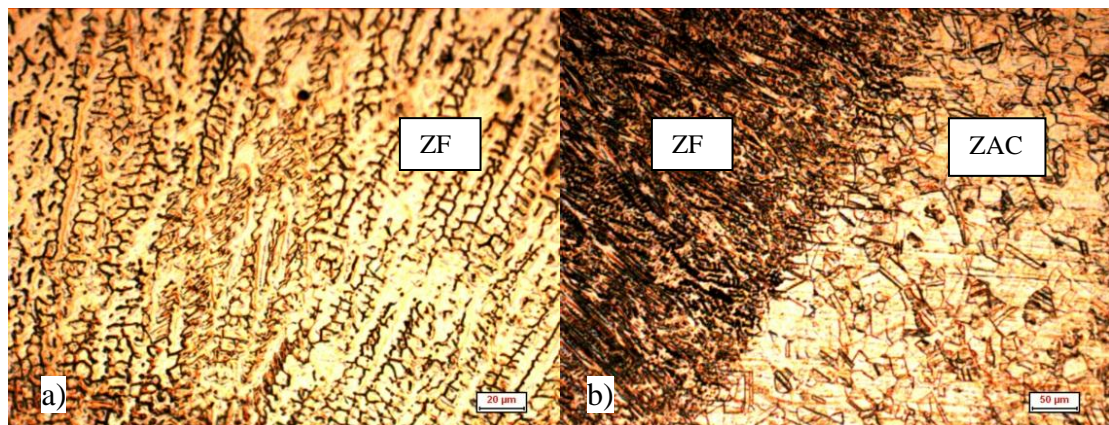
Para la preparación de la muestra se empleó desbaste con lijas de grano 80, 120, 350, 500, 800, 1200 y 2400, posteriormente el pulido se realizó con sílica de 3 micras y se procedió a la inspección. Para revelar la microestructura de la soldadura, del material base y de las zonas afectadas por el calor por medio de microscopía óptica, se atacaron las muestras con Agua Regia (15ml de HCl y 5ml de HNO<sub>3</sub>) por un periodo de 15-20 segundos, el reactivo se debe trabajar con una preparación reciente, no mayor a los 10 min para tener efectividad.

En la Fig. 4.3 se observa la zona de fusión y la afectada por el calor de la unión FR15, la fusión completa de los cordones superior e inferior en la zona de la soldadura. En las microestructuras mostradas en las Fig. 4.4a y 4.4b se visualiza la fusión completa de los cordones de soldadura en la cual se identifica un crecimiento dendrítico en distintas orientaciones.



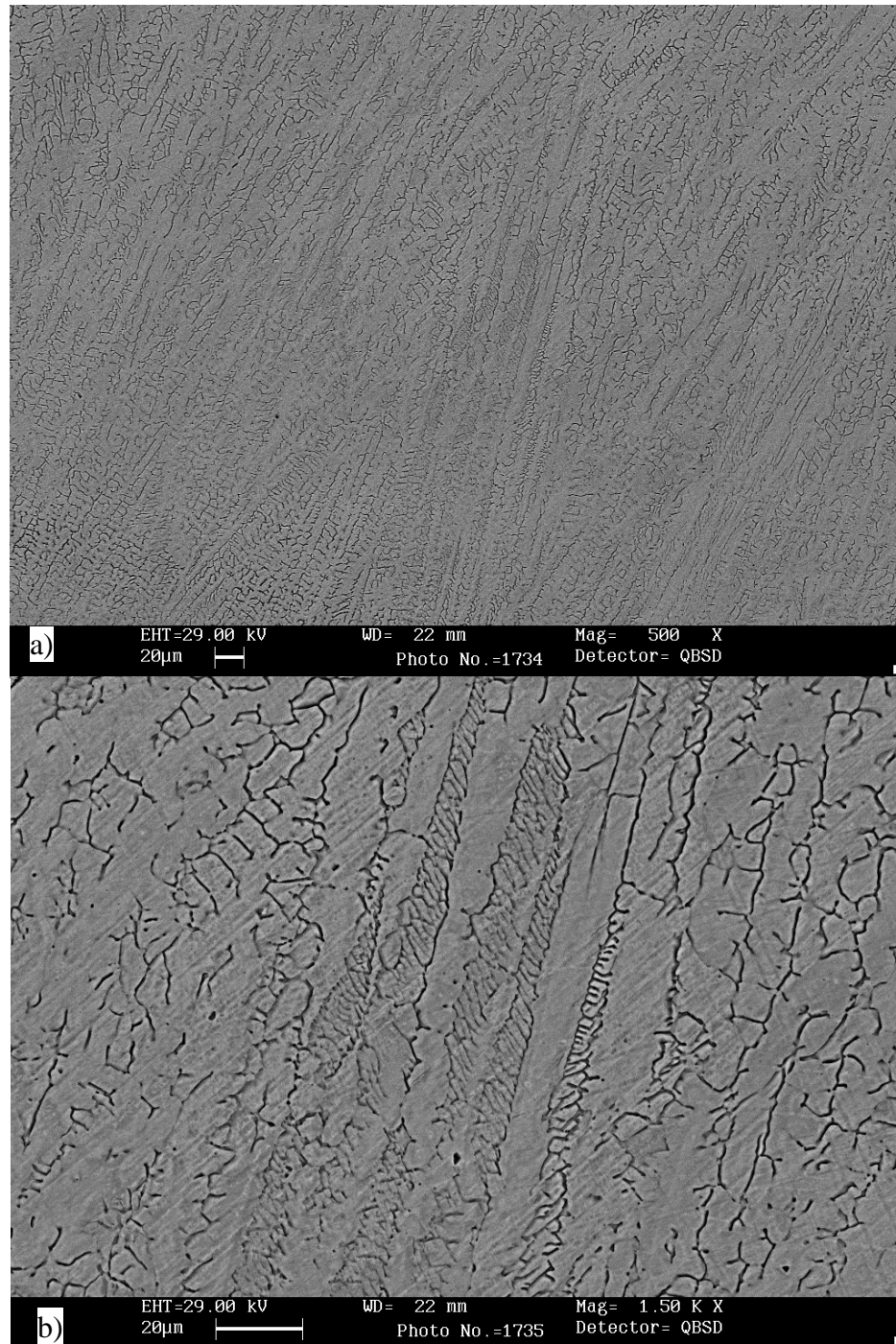


**Figura 4.3.** Microestructura FR15 a 10X.



**Figura 4.4.** a) Zona de soldadura a 50X; b) Zona de fusión y zona afectada por el calor a 20X.

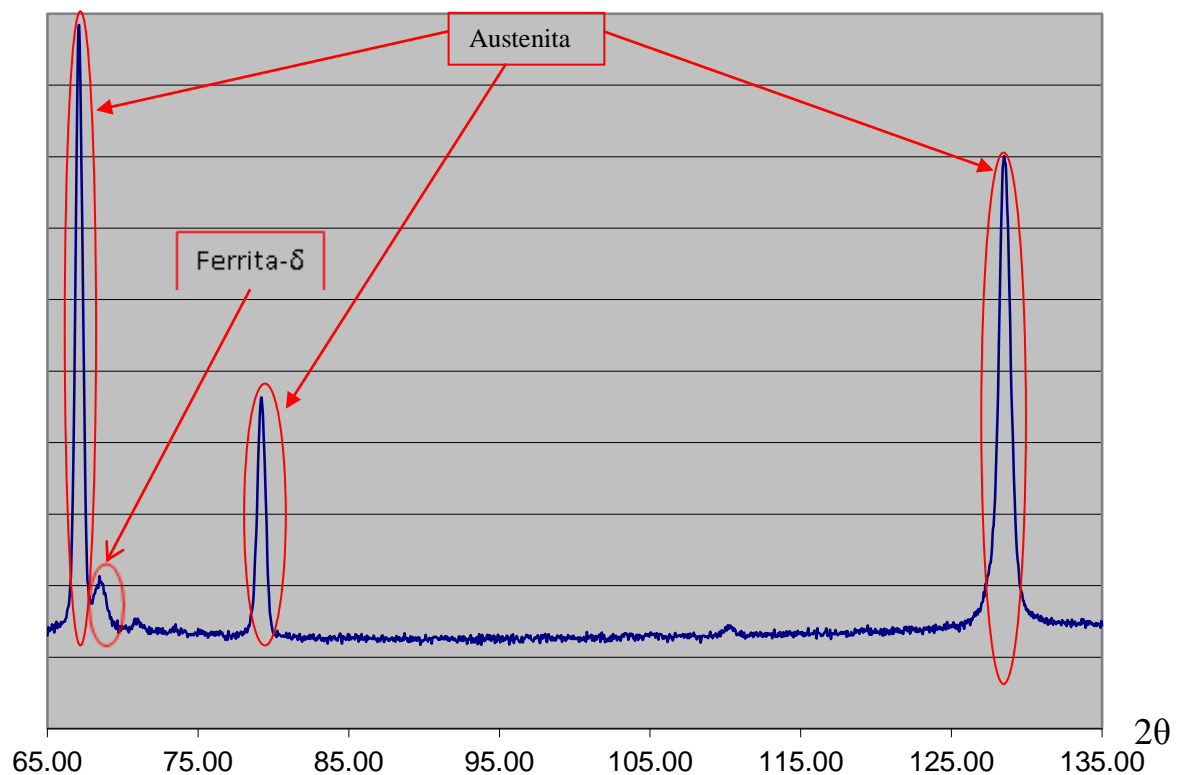
En la Fig. 4.5 se muestra una microestructura con morfología en forma de esqueleto que corresponde a la ferrita ( $\delta$ ) presente en una matriz austenítica.



**Figura 4.5.** FR16 Imágenes obtenidas por MEB de la zona de soldadura presentando morfología en forma de esqueleto. a) 500X b) 1500X.

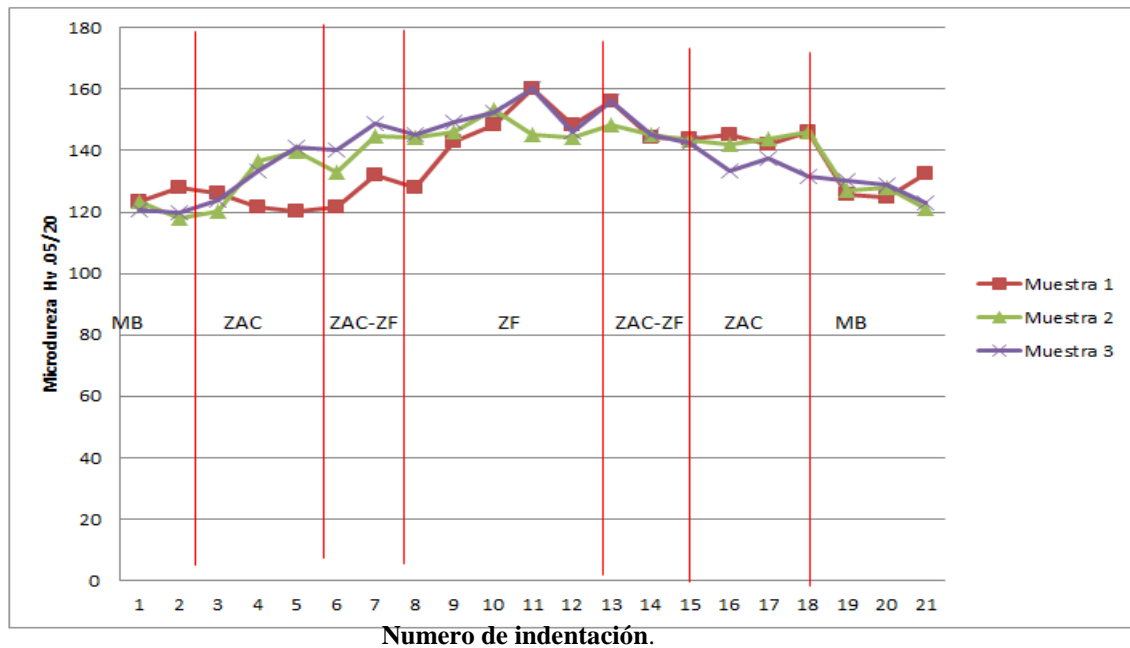
El problema de sensibilización en los aceros inoxidable es uno de los más frecuentes, afectando sus características de resistencia a la corrosión. Precipitaciones de fases ricas en cromo, altos niveles de calor de entrada y lentas velocidades de avance promueven este defecto.

Para corroborar la presencia de ferrita ( $\delta$ ) se emplea un análisis por difracción de rayos X para una muestra de  $\frac{1}{2}$  " x  $\frac{1}{4}$  ". En la Fig. 4.6 se muestra el difractograma de dicha muestra, en donde se observan los picos representativos de austenita en las posiciones  $2(\theta) = 67.79^\circ$ ,  $128.3^\circ$  y  $79.1^\circ$ , también está presente un pico en  $2(\theta) = 68.5^\circ$  que corresponde a la fase ferrita ( $\delta$ ).



**Figura 4.6.** Gráfico de difracción de rayos X, señalando los espectros de austenita y ferrita- $\delta$ .

El perfil de microdureza se realizó en 3 muestras que presentaban fusión completa de manera transversal en las zonas de material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), zona de interfaz ZAC –ZF y la zona de fusión o de soldadura (ZF), obteniendo el gráfico de la Fig. 4.7, en la cual se observan valores promedio a los 123 Hv .05/20 para el material base e incrementos a partir de la interfaz de la zona afectada por el calor y la soldadura (ZAC-ZF), en la cual se observan rangos aproximados a los 150 Hv .05/20, se destacan valores pico en la soldadura de hasta 160 Hv .05/20.

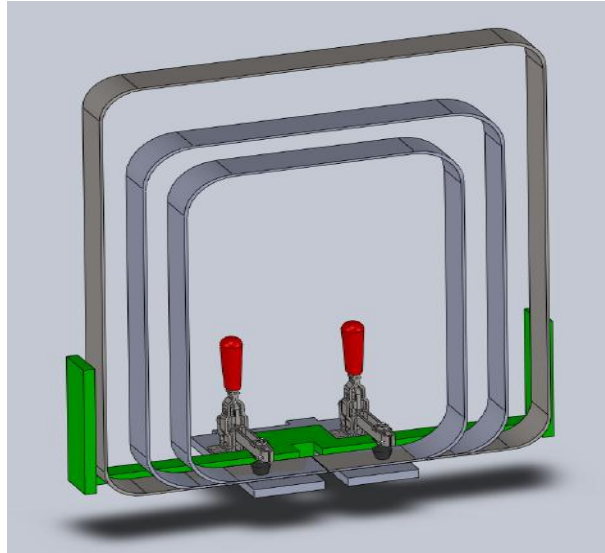


**Figura 4.7.** Perfil de microdureza.

La adecuación de los parámetros de soldadura son la base para obtener soldaduras de calidad, la configuración de éstos, refleja cambios en los resultados o bien pueden significar la presencia de defectos en las uniones. Uno de los parámetros en donde no se tiene control absoluto, es la habilidad del soldador.

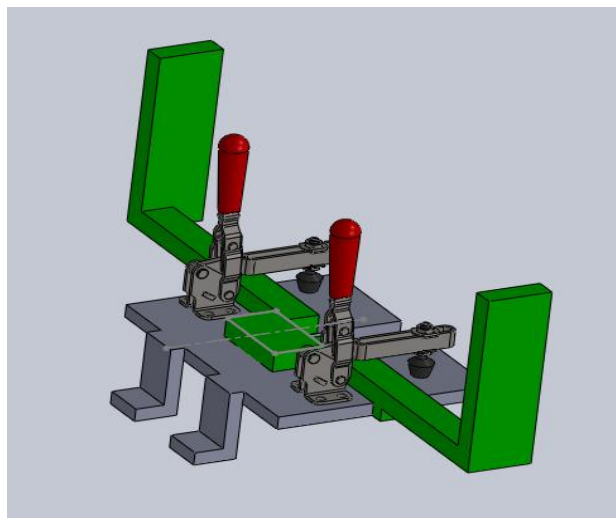
Para establecer un procedimiento de soldadura es necesario establecer los parámetros, tal como se mencionó anteriormente, al igual que las posiciones y los pasos a seguir durante el desarrollo de la unión. Por tal motivo la

implementación de dispositivo de sujeción (fixture) para el posicionamiento de la pieza se vuelve necesaria. En la Fig. 4.8 se muestra el diseño de un fixture como opción para desarrollar el procedimiento, en la cual se ilustran los tres modelos que presentan el mismo tipo de unión.



**Figura 4.8.** Diseño de Fixture para pieza FRAME de MAYO.

El diseño consta de 2 piezas principales de montaje rápido, diseñadas para trabajar montando la base en la mesa de trabajo y dependiendo el modelo del FRAME intercambiar el fixture superior. (Ver Fig.4.10)



**Figura 4.9.** Ensamble de fixture completo.

El procedimiento de soldadura desarrollado consta de los siguientes pasos:

- Calibración de los parámetros de soldadura para FRAME de MAYO
- Revisión de preparación de electrodo de tungsteno
- Montaje de base de fixture
- Montaje de dimensionador según modelo a trabajar
- Fijar la pieza mediante clamps, asegurando un GAP de 1/32" max. 1/16"
- Punteo en la parte superior e inferior
- Revisión de GAP
- Unión de cordón interior en posición plana
- Liberación de pieza y giro para posicionar y trabajar en cordón exterior
- Fijar la pieza nuevamente
- Unión de cordón exterior en posición plana
- Liberación de pieza

### **4.3 Conclusiones del caso de estudio**

- En las uniones realizadas con 3 distintos soldadores y con parámetros establecidos, se identificaron 4 uniones completas y libres de defectos, las cuales pertenecían a 2 de los soldadores. Debido a esto se establecieron como adecuados dichos parámetros; 75 Amp. de corriente, 28 cfh de argón, aporte de .045" y velocidad de avance de 4"/min.
- En las uniones que no presentaron fusión completa con los parámetros establecidos, se visualizó una reducción en el área sin fusión de un 40% inicial a un 10% final.
- La posición de soldadura afecta directamente al resultado de la unión y va a depender de la habilidad del soldador.
- Se pueden generar uniones completas con los procesos GTAW sin preparación y libres de defectos para aceros inoxidables 304.
- La configuración de los parámetros es esencial para obtener soldaduras con fusión completa.
- Material de aporte de mayor diámetro no asegura una fusión completa.

- Los soldadores deben contar con capacitación necesaria para lograr soldaduras de calidad.
- Los análisis de microscopía óptica muestran crecimientos dendríticos en la soldadura con morfología esquelética libres de defectos.
- Los análisis de difracción de rayos X muestra la presencia de ferrita- $\delta$  en las uniones soldadas inmersa en una matriz austenítica.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

- El análisis de la revisión bibliográfica y del caso de estudio permitió obtener las conclusiones siguientes:
- El diseño de experimento basado en problemáticas existentes en la industria puede emplear procesos de simulación para predecir los resultados y así lograr un ajuste de parámetros adecuados dependiendo el tipo de unión, materiales a unir y el proceso de soldadura.
- Los aceros inoxidable 304 son susceptibles a presentar faltas de fusión en las uniones, principalmente debido a una configuración de parámetros incorrecta o bien una falta de habilidad del soldador.
- La presencia de ferrita- $\delta$  en las uniones soldadas es debido a las velocidades de enfriamiento rápidas que impiden que la ferrita- $\delta$  logre



transformar por completo en austenita. La cantidad de ferrita- $\delta$  depende de los procesos de soldadura empleados así como de sus parámetros. En base a esto, con un proceso láser, la cantidad de ferrita ( $\delta$ ) presente será mayor que en un proceso GTAW.

- La sensibilización del material tanto intergranular, transgranular o interdendrítica son factores que debilitan al material y puede generar fracturas en las uniones soldadas. Por tal motivo la regulación de los parámetros en los procesos GTAW y RSW son de vital importancia para evitar la formación de defectos y así poder realizar uniones completas en el acero inoxidable 304.
- El incremento en la corriente no es solución a la problemática de faltas de fusión, es necesario un análisis de cada tipo de unión basado en su aplicación.

# BIBLIOGRAFÍA

1. Kotecki, John C. y Lippold, Damian J. 2005 Welding Metallurgy and Weldability of Satainless Steels. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
2. Inoxidable, Centro Nacional para el Desarrollo del Acero. Aceros Inoxidables Características y Clasificación. [Internet] [Citado el: 09 de Enero de 2012.] <http://www.iminox.org.mx/pdf/manual1.pdf>.
3. Kou, Sindo.2003. Welding Metallurgy. Hoboken, New Jersey : John Whiley & Sons Inc.
4. ASM International.2005 Properties and Selection: Irons Steels, and High Performance Alloys.1305.
5. Miller. [http://www.millerwelds.com/pdf/spec\\_sheets/DC32-0.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/DC32-0.pdf) [En línea] [Citado el: 05 de Enero del 2012] <http://www.millerwelds.com>.
6. BOC. <http://www.bocworldofwelding.com.au/media/pdf/SAFETY-Cylinder%20safety.pdf> [En línea] [Citado el 23 de Julio del 2012] <http://www.bocworldofwelding.com.au>.
7. Giridharan, P K y Murugan, N. 2008. Optimizati3n of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets. Chennain, Tamil Nadu India : Springer-Verlag London.
8. Surowska, B y Brudkiewicz, D. 2007. TIG-micropulse welding of thin austenitic steel sheet.. 1072954, Mortimer Street, London : Taylor & Fancis.

9. Controls, Entron. <http://www.entroncontrols.com/images/stories/700081B.pdf> [En línea] [Citado el 10 de enero del 2012] <http://www.entroncontrols.com>.
10. Miller Electric Mfg. Co. <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>. [En línea] [Citado el: 5 de Enero del 2012.] <http://www.millerwelds.com>.
11. Prospot. <http://prospot.com/products/i5/#auto-weld> [En línea][Citado el 26 de Junio del 2012 ] <http://prospot.com>.
12. ST Microelectronics <http://pdfdata.datasheetsite.com/web/16219/BTW69.pdf> [En línea][Citado el 26 de Junio del 2012] <http://pdfdata.datasheetsite.com>
13. Coksa cobres k S.A . <http://www.coksa.com/es/aleaciones.php> [En línea] [Citado el: 2012 de 01 de 11.] <http://www.coksa.com/es/aleaciones.php>.
14. Semirca. <http://www.semirca.com/images/z-nkl-sp.pdf> [En línea] [Citado el: 17 de Julio del 2012] <http://www.semirca.com>.
15. De Tiedra P, Martín O & López M. 2011. Combined effect of resistance spot welding and post-welding sensitization on the degree of sensitization of AISI 304 stainless steel. Valladolid, España: Elsevier.
16. Yan J., Gao M., Zeng X. 2009. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. Wuhan, China: Elsevier.
17. American Welding Society. 2000. B1.11 Guide for the visual inspection of welds, Miami, Florida

18. Pérez V. 2010. Análisis de discontinuidades generadas al aplicar el proceso de GTAW en tuberías de ¼" Y ¾" en aceros inoxidable 304L. [Monografía] [Saltillo, Coahuila, Mexico] Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A.
19. Lee D. J., Byun J.C., Sung J.H., Lee H.W. 2009. The dependence of crack properties on the CrNi equivalent ratio in AISI 304L austenitic stainless steel weld metals. Busan, Korea. Elsevier.
20. Galvis A., Hormaza W. 2011. Characterization of failure modes for different welding processes of AISI/SAE 304 stainless steel. Bogota, Colombia. Elsevier.
21. Jamshidi H, Farzadi A, Serajzadeh S, Kokabi A. 2008. Theoretical and experimental study of microstructures and weld pool geometry during GTAW of 304 stainless steel. Tehran, Iran. Springer.
22. Özyürek, D. 2007. An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel. Karabük, Turkey. Elsevier.
23. P. Marashi, et al. 2008. Relationship between failure behaviour and weld fusion zone attributes of austenitic stainless steel resistance spot welds. Maney on behalf

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1: Película de óxido de Cromo. El oxígeno del medio crea una capa protectora de óxido de cromo en el acero Inoxidable	8
Figura 2.2: Ejemplificación de regeneración de capa protectora (película pasiva) de óxido de cromo	9
Figura 2.3. Principales características de aceros inoxidable martensíticos	10
Figura 2.4. Familia de los aceros inoxidable martensíticos	11
Figura 2.5. Principales características de aceros inoxidable ferríticos	12
Figura 2.6. Familia de los aceros inoxidable ferríticos	12
Figura 2.7. Principales características de aceros inoxidable austeníticos	13
Figura 2.8. Familia de los aceros inoxidable austeníticos	14
Figura 2.9. Principales características de aceros inoxidable Dúplex	15
Figura 2.10. Microestructura AISI 304 austenítico	16
Figura 2.11. Esquema de proceso GTAW/TIG	18
Figura 2.12. Equipo de soldadura Miller Maxtar 200	19
Figura 2.13. Esquema de antorcha en funcionamiento, proceso GTAW	20
Figura 2.14. Tanque de gas empleado en proceso TIG	20
Figura 2.15. 1) Conector de regulador de salida. 2) Válvula de tanque	21
Figura 2.16. Esquema básico de proceso de soldadura RSW	24
Figura 2.17. Esquema básico de SCR	26
Figura 2.18. Esquema de sistema de presión neumático	27
Figura 2.19. Esquema de ciclo de tiempo en proceso RSW	28
Figura 2.20. Ejemplos de electrodos para RSW	30
Figura 2.21. Ejemplos de porta electrodos para RSW	30
Figura 2.22. Diagrama Fe-Cr-Ni [1]	32
Figura 2.23. Cargas reactivas obtenidas por el proceso EPR	34
Figura 2.24. Microestructura muestra IGC y TGC en la zona ZAC	35

Figura 2.25. Microestructura de la zona dendrítica en soldadura TIG micro pulsada	36
Figura 2.26. Exceso de penetración	37
Figura 2.27. Falta de penetración	38
Figura 2.28. Esquema de socavado	38
Figura 2.29. Ejemplo de grieta	39
Figura 2.30. Ejemplo de grieta a nivel microestructural	40
Figura 2.31. Esquema de porosidades	41
Figura 2.32. Ejemplo de inclusiones	42
Figura 2.33. Geometría de cordón de soldadura simulada y experimental	33
Figura 2.34. (a) 10 cm/min (b) 15cm/min Gradiente de temperatura en línea de fusión	47
Figura 2.35. (c) 10cm/min (d) 15cm/min Gradiente de temperatura en línea central	48
Figura 2.36. Valor de G/R para e) 10cm/min f) 15cm/min	49
Figura 2.37. a) Crecimiento celular en la línea de fusión b) Crecimiento dendrítico al centro de la soldadura; $I=110A$ , $V=15$ cm/min	50
Figura 2.38. a) Crecimiento celular en la línea de fusión b) Crecimiento dendrítico al centro de la soldadura; $I=150A$ , $V=15$ cm/min	51
Figura 2.39. Uniones de RSW a distintos valores de corriente	53
Figura 2.40. Gráfica de incremento de diámetro	53
Figura 2.41. Gráfica corriente- Esfuerzo de corte	54
Figura 2.42. Ejemplo de cavidad al centro del botón de soldadura	54
Figura 2.43. Macroestructura típica de botón de soldadura	55
Figura 2.44. Ejemplos de soldaduras por puntos de resistencia	56
Figura 2.45. Gráfica de incremento de la zona de fusión	57
Figura 2.46. Defectos a) Entre caras b) Salida	57
Figura 2.47. Corrosión inter dendrítica en soldadura por puntos de resistencia	58

Figura 4.1 a) Muestras FR01 vista con el estereoscopio 4x y b) muestra FR12 con falta de fusión presente 16x	65
Figura 4.2. Fotografías de estereoscopio a tomadas 4X	66
Figura 4.3 Microestructura FR15 a 10X	67
Figura 4.4 a) Zona de soldadura a 50X; b) Zona de fusión y zona afectada por el calor a 20X	67
Figura 4.5 FR16 Imágenes MEB zona de soldadura presentando morfología esquelética a) 500X b) 1500X	68
Figura 4.6 Gráfico de difracción de rayos X, señalando los espectros de austenita y ferrita- $\delta$	69
Figura 4.7 Perfil de microdureza	70
Figura 4.8 Diseño de Fixture para pieza FRAME de MAYO	71
Figura 4.9 Ensamble de fixture completo	71

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de aceros inoxidables	10
Tabla 2.2. Composición química AISI 304	16
Tabla 2.3. Listado de propiedades a temperatura ambiente de aceros inoxidables austeníticos	17
Tabla 2.4. Aplicaciones de los principales procesos de soldadura	22
Tabla 2.5. Ejemplos de aleaciones aplicables para proceso RSW.	29
Tabla 2.6. Defectos en uniones de acero inoxidable.	37
Tabla 2.7. Propiedades físicas de acero inoxidable 304	43
Tabla 2.8. Valores de parámetros	44
Tabla 2.9. Comparación de tamaño de soldadura	45
Tabla 4.1. Composición química del acero inoxidable AISI304	63
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304	63
Tabla 4.3. Parámetros de muestras FR01-FR10	64
Tabla 4.4. Parámetros de muestras FR11-FR19	65