

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN LA SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 304L Y 316L**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**PATRICIA ELIZABETH CHANGO GUTIÉRREZ**

pechg\_31@hotmail.com

**DIRECTOR: Ing. DIEGO ESPINOSA**

diego.espinosa@epn.edu.ec

**Quito, Mayo 2014.**

## **DECLARACIÓN**

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

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

---

**PATRICIA ELIZABETH CHANGO GUTIÉRREZ**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Patricia Elizabeth Chango Gutiérrez, bajo mi supervisión.

---

**ING. DIEGO ESPINOSA  
DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida, la capacidad suficiente y la fortaleza necesaria para vencer los obstáculos y seguir superándome en la vida. También por permitirme disfrutar de toda mi Familia y amigos.

A mis amados Padres, Marina y Oswaldo por ser mi apoyo constante, por darme su ejemplo de superación y de lucha en cada situación, por enseñarme que la vida tiene muchos retos y que estos son alcanzables con perseverancia y dedicación. Gracias por darnos tanto amor y enseñarnos nuestra importancia en sus vidas.

A mis Abuelitos bellos que antes de convertirse en mis angelitos me llenaron de amor y dulzura.

A mi ñaña Esthelita, que a pesar de la distancia me enseñó que un corazón fuerte puede soportarlo todo, a ella mi gratitud inmensa por no dejarme derrumbar ante su ausencia, por sus consejos, su apoyo y sus buenos deseos aun siendo estos en la distancia.

A mis hermosos sobrinos Matías y Oswaldo que aún sin entender lo que es la vida siempre estuvieron para brindarme sus sonrisas, sus locuras y su amor.

A Andresito que desde que lo conocí siempre estuvo ahí para darme sus consejos, su apoyo incondicional y sobretodo su amor, y por enseñarme la alegría de sonreír aún en situaciones difíciles.

A todos mis amigos que he conocido en el transcurso de mi vida, con quienes hemos compartido buenos y malos momentos, siempre formarán parte de mi corazón. Un eterno agradecimiento a mi gran amigo Alexander por estar siempre en cada instante que lo necesité.

Al Ing. Diego Espinosa por su acertada dirección en este proyecto y confianza en mí, de igual manera a los Ingenieros Gabriel Velasteguí y Miguel Aldas, por su colaboración en el proyecto y por brindarme su amistad.

*Paty*

## DEDICATORIA

A Dios por permitirme despertar cada día y poder observar lo maravilloso que tiene vida.

A mis Padres, Marina y Oswaldo, que me han dado la vida, su amor, su ejemplo, su sacrificio por verme feliz y sobre todo por haber depositado su confianza en mí, les dedico una de mis metas logradas, les estaré agradecida toda la vida.

A Esthelita, Matías y Oswaldo que valoren su vida, que se esfuercen para conseguir todo lo que se propongan y que sobretodo siempre lo hagan con amor.

*Paty*

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES ESPECIFICACIONES Y APLICACIONES .....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACERO INOXIDABLE .....	1
1.1.1 PASIVIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	1
1.2 APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	2
1.3 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES. ....	3
1.4 ESPECIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	4
1.5 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES .....	4
1.5.1 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS .....	5
1.5.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.....	6
1.5.3 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX.....	6
1.5.4 ACEROS INOXIDABLES POR PRECIPITACIÓN .....	7
1.5.5 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS .....	7
1.5.5.1 Característica general del acero inoxidable austenítico. ....	10
1.6 CARACTERÍSTICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304L Y AISI 316L... .....	12
1.6.1 ACERO INOXIDABLE AISI 304L .....	12
1.6.1.1 Aplicaciones .....	12
1.6.1.2 Ventajas del acero AISI 304L.....	13
1.6.2 ACERO INOXIDABLE AISI 316L .....	13
1.6.2.1 Aplicaciones .....	14
1.6.2.2 Ventajas del acero AISI 316L .....	15
1.7 DESCRIPCIÓN DE LOS ALEANTES DEL ACERO INOXIDABLE .....	15
1.7.1 CROMO (CR) .....	16
1.7.2 NÍQUEL (NI) .....	16
1.7.3 CARBONO (C).....	16
1.7.4 MOLIBDENO (MO) .....	17
1.7.5 MANGANESO (MN).....	17
1.7.6 SILICIO (SI) .....	17
1.7.7 OTROS.....	17

1.8	TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	18
1.8.1	TRATAMIENTO TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.....	18
1.8.1.1	Tratamientos térmicos en juntas soldadas.....	18
1.8.1.2	Tratamientos térmicos de Post soldadura.....	19
1.8.1.3	Resultados obtenidos por los tratamientos térmicos.....	19
	<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>21</b>
	<b>ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE .....</b>	<b>21</b>
2.1	SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	21
2.2	TIPOS DE SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....	21
2.2.1	SOLDADURA ELÉCTRICA CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW). ...	22
2.2.2	SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW).....	23
2.2.3	SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO BAJO PROTECCIÓN DE GAS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA DE ELECTRODO TUBULAR (FCAW). .....	24
2.2.4	SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO BAJO PROTECCIÓN DE GAS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA DE ELECTRODO SÓLIDO (GMAW). .....	24
2.2.5	SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO CON PROTECCIÓN GASEOSA (GTAW).....	25
2.2.5.1	Aplicaciones del proceso GTAW .....	26
2.2.5.2	Material de aporte.....	26
2.2.5.3	Descripción de proceso .....	27
2.2.5.4	Características del proceso .....	27
2.2.5.5	Ventajas .....	27
2.2.5.6	Limitaciones del proceso GTAW.....	28
2.2.5.7	Equipo del proceso GTAW consta de: .....	28
2.2.5.8	Electrodos .....	28
2.2.6	PRECALENTAMIENTO DE LA SOLDADURA .....	30
2.2.6.1	Precalentamiento en aceros inoxidables .....	30
2.3	SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.....	30
2.3.1	DIAGRAMAS DE CONSTITUCIÓN.....	31

2.3.2	METALURGIA DE LA SOLDADURA .....	33
2.3.2.1	Evolución de la microestructura en la zona de fusión. ....	33
2.3.2.2	Inter caras en el metal de soldadura de fase austenítica. ....	36
2.3.2.3	Límites de solidificación de subgrano (SSGB) .....	37
2.3.2.4	Límites de solidificación de granos (SGB) .....	37
2.3.2.5	Límites de grano migrados (MGB) .....	37
2.3.2.6	Zona afectada por el calor .....	38
2.4	FENÓMENOS A CONSIDERAR EN LA SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES. ....	39
2.4.1	PRECIPITACIÓN DE CARBUROS .....	39
2.4.2	FISURACIÓN EN CALIENTE .....	40
2.4.3	FORMACIÓN DE LA FASE SIGMA. ....	41
2.4.4	FISURACIÓN INDUCIDA POR HIDRÓGENO .....	41
	<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>42</b>
	<b>CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES .....</b>	<b>42</b>
3.1	CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES .....	42
3.1.1	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN .....	42
3.2	TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	43
3.2.1	CORROSIÓN INTERGRANULAR .....	43
3.2.1.1	Mecanismo de corrosión intergranular .....	44
3.2.1.2	Sensibilización a la corrosión intergranular en los aceros inoxidables austeníticos. ....	45
3.2.1.3	Factores que influyen en la corrosión intergranular .....	46
3.2.1.4	Protección contra la corrosión intergranular .....	48
3.2.2	CORROSIÓN POR PICADURA.....	49
3.2.3	CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.....	50
3.2.4	CORROSIÓN POR FATIGA .....	50
3.2.5	CORROSIÓN GALVÁNICA .....	51
3.2.6	CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA .....	51
3.3	MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN. ....	51
3.3.1	ENSAYOS DE CORROSIÓN.....	52
3.3.1.1	Ensayos de planta o campo .....	52



3.3.1.2	Pruebas en laboratorio. ....	52
3.3.2	LA NORMA ASTM B 117. ....	53
3.3.2.1	Resumen de la norma ASTM B 117 “Salt Spray Test” .....	53
3.3.3	ENSAYO DE NIEBLA SALINA .....	54
3.3.4	CÁMARA DE NIEBLA SALINA .....	55
3.3.4.1	Características principales del equipo de niebla salina .....	56
3.3.4.2	Panel de control .....	56
3.3.4.3	Tanque de solución .....	57
3.3.4.4	Torre de dispersión central .....	57
3.3.4.5	Saturador (humidificador) .....	57
3.3.4.6	Atomizador o pulverizador .....	57
3.3.4.7	Soporte de probetas o portamuestras.....	58
3.3.5	PROCEDIMIENTOS A LAS PROBETAS ANTES DE SER INTRODUCIDAS EN LA CÁMARA SALINA. ....	58
3.3.5.1	Duración de la prueba .....	58
3.3.5.2	Número de probetas .....	58
3.3.5.3	Preparación de la superficie de las probetas .....	58
3.3.5.4	Marcado de las probetas para la identificación. ....	59
3.3.5.5	Mapeo .....	59
3.3.6	PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA DE LAS PROBETAS DESPUÉS DE SER SACADAS DE LA CÁMARA SALINA. ....	59
3.3.6.1	Limpieza mecánica .....	60
3.3.6.2	Limpieza química.....	60
3.3.6.3	Limpieza electrolítica .....	61
3.3.7	VELOCIDAD DE CORROSIÓN .....	61
3.4	PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN .....	62
3.4.1	GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE .....	63
3.4.2	GALVANIZADO O CINCADEO ELECTROLÍTICO .....	63
3.4.3	RECUBRIMIENTOS CON POLVO DE ZINC .....	63
3.4.4	PROTECCIÓN ANTICORROSIVA CATÓDICA .....	64
3.4.5	RESVESTIMIENTO CON PINTURA.....	64

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>65</b>
<b>METODO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>65</b>
4.1 INTRODUCCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL .....	65
4.1.1 BASE DE PRECALIFICACIÓN DE METAL .....	65
4.1.2 SELECCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA .....	65
4.1.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE.....	66
4.1.3.1 Varillas de aporte .....	66
4.1.4 APLICACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN .....	69
4.1.4.1 Diagrama Schaeffler .....	69
4.1.4.2 Diagrama de WRC.....	70
4.1.5 PREPARACIÓN DE LAS PLACAS.....	72
4.1.6 PRECALENTAMIENTO DE LAS PLACAS .....	72
4.1.7 SOLDADURA DE LAS PLACAS.....	73
4.1.7.1 Equipo de soldadura. ....	74
4.1.8 REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO AISI/AWS D1.6.....	75
4.1.8.1 Tamaño de las probetas .....	75
4.1.9 CRITERIO DE ACEPTACIÓN SEGÚN LA NORMA AWS D1.6.....	76
4.1.9.1 Inspección visual .....	76
4.1.9.2 Doblado de Raíz /Doblado de Cara. ....	77
4.1.9.3 Ensayo de tensión .....	77
4.1.9.4 Macrografías .....	77
4.1.9.5 Micrografías .....	77
4.1.10 ENSAYO DE TENSIÓN .....	78
4.1.10.1 Resultados del ensayo de tracción .....	80
4.1.11 ENSAYO DE DOBLADO .....	85
4.1.12 MACROGRAFÍAS .....	89
4.1.13 MICROGRAFÍAS.....	90
4.1.13.1 Material AISI 304L con precalentamiento a 300°C. ....	90
4.1.13.2 Material AISI 304L sin precalentamiento .....	91
4.1.13.3 Material AISI 316L con precalentamiento a 300°C. ....	92
4.1.13.4 Material AISI 316L sin precalentamiento. ....	93
4.1.14 ENSAYO DE NIEBLA SALINA.....	94

4.1.14.1 Descripción de la prueba.....	94
4.1.15 PROCEDIMIENTO Y PREPARACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ANTES DE COMENZAR EL ENSAYO DE NIEBLA SALINA. ....	95
4.1.15.1 Marcación de las probetas.....	95
4.1.15.2 Registro de cada probeta antes de introducir en la cámara salina.....	96
4.1.15.3 Colocación de las probetas dentro de la cámara salina.....	97
4.1.15.4 Encendido de la cámara y colocación de la solución salina.....	98
4.1.16 PROCEDIMIENTO LUEGO DE LA EXPOSICIÓN A LA NIEBLA SALINA. .....	99
4.1.16.1 Pérdida de masa vs tiempo de exposición sin limpieza química.....	101
4.1.16.2 Acero AISI 304L.....	102
4.1.16.3 Acero AISI 316L.....	102
4.1.17 LIMPIEZA QUÍMICA DE LAS PROBETAS LUEGO DE SALIR DE LA CÁMARA SALINA. ....	103
4.1.17.1 Elaboración de la solución.....	103
4.1.18 PROBETAS LUEGO DE SER EXPUESTAS A LA LIMPIEZA QUÍMICA. .....	105
4.1.18.1 Masa de las placas luego de la limpieza química.....	105
4.1.19 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	108
4.1.19.1 Área del cordón de soldadura.....	108
4.1.19.2 Cálculo de la velocidad de corrosión.....	108
4.1.19.3 Sin limpieza Química.....	109
4.1.19.4 Con limpieza Química.....	111
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>113</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>113</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	113
5.2 ANÁLISIS DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA. .	113
5.2.1 INSPECCIÓN VISUAL.....	113
5.2.2 ENSAYO DE TENSIÓN.....	113
5.2.3 ENSAYO DE DOBLADO (RAÍZ Y CARA).....	114
5.2.3.1 Resultados:.....	116
5.2.4 ANÁLISIS MACROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS.....	116

5.2.5	ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS. ....	117
5.2.5.1	Probetas de acero AISI 304L con precalentamiento .....	117
5.2.5.2	PROBETAS DE ACERO AISI 304L SIN PRECALENTAMIENTO .....	118
5.2.5.3	PROBETAS DE ACERO AISI 316L CON PRECALENTAMIENTO .....	118
5.2.5.4	PROBETAS DE ACERO AISI 316L SIN PRECALENTAMIENTO .....	119
5.2.6	ANÁLISIS DEL ENSAYO DE NIEBLA SALINA. ....	119
5.2.6.1	Velocidad de corrosión sin limpieza química .....	120
5.2.6.2	Velocidad de corrosión con limpieza química .....	120
5.2.6.3	Resultados. ....	121
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>123</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>123</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	123
6.2	RECOMENDACIONES .....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO 1

Tabla 1.1 Designación y tipos de los Aceros Inoxidables. ....	4
Tabla 1.3 Características de Aceros Inoxidables Austeníticos Serie 300 .....	9
Tabla 1.4 Descripción de los Aceros Inoxidables Austeníticos Serie 200 .....	10
Tabla 1.5 Composición química 304L.....	12
Tabla 1.6 Propiedades del acero 304L.....	12
Tabla 1.7 Composición química del acero 316L.....	14
Tabla 1.8 Propiedades del Acero AISI 316L.....	14

### CAPITULO 2

Tabla 2.1 Código de color y elementos de aleación .....	29
Tabla 2.2 Tipos de solidificación y transformaciones en estado sólido .....	34

### CAPITULO 4

Tabla 4.1 Composición química de la varilla ANSI/AWS ER 308L .....	67
Tabla 4.2 Composición química de la varilla ANSI/AWS ER 316L .....	68
Tabla 4.3 Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama de Schaeffler. ....	69
Tabla 4.4 Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama WRC. ....	70
Tabla 4.5 Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama WRC. ....	71
Tabla 4.6 Tabla requerimientos de la norma AWS D1.6 .....	75
Tabla 4.7 Números de Probetas para el ensayo de Tensión. ....	79
Tabla 4.8 Resultados del Ensayo de Tracción de las probetas. ....	84
Tabla 4.9 Resultados del ensayo de Doblado de Cara y Doblado de Raíz. ....	88
Tabla 4.10 Cámara Salina Q- FOG- CCT-600.....	94
Tabla 4.11 Masa en Gr. de las probetas.....	96
Tabla 4.12 Parámetros del Equipo Cámara Salina.....	98
Tabla 4.13 Masa de las probetas luego de salir de la cámara salina.....	100
Tabla 4.14 Pérdida de Masa.....	101

Tabla 4.15 Masa de las probetas luego de la Limpieza Química.....	105
Tabla 4.16 Masa Perdida del acero 304L.....	106
Tabla 4.17 Masa Perdida del acero AISI 316L .....	107
Tabla 4.18 Velocidad de corrosión en mpy .....	109
Tabla 4.19 Velocidad de corrosión en mpy .....	111

## **CAPITULO 5**

Tabla 5.1 Resultados de los ensayos realizados.....	116
Tabla 5.2 Velocidades de corrosión.....	120
Tabla 5.3 Velocidad de corrosión con limpieza química .....	121

## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1

Figura 1.1 a) El acero inoxidable forma una capa de óxido de cromo, b) Cuando es rayado, esta película protectora es removida y c) La capa protectora es restaurada.....	2
Figura 1.2 Tanques de almacenamiento de acero inoxidable.....	3
Figura 1.3 Representación gráfica de la clasificación de los aceros inoxidables en función del contenido de Cr y Ni. ....	5
Figura 1.4 Influencia del níquel en la fase gamma de un acero con 18% Cr. ....	8
Figura 1.5 Microestructura de la Austenita .....	8
Figura 1.6 Características del acero inoxidable austenítico.....	11
Figura 1.7 Algunas Aplicaciones del acero AISI 304L, .....	13
Figura 1.8 Algunas aplicaciones del acero inoxidable AISI 316L,.....	15

### CAPITULO 2

Figura 2.1 Soldadura eléctrica con electrodo revestido (SMAW).....	22
Figura 2.2 Proceso de soldadura de arco sumergido .....	23
Figura 2.3 Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo tubular (FCAW).....	24
Figura 2.4 Soldadura Eléctrica Por Arco Bajo Protección De Gas Con Alimentación Continua De Electrodo Sólido (GMAW).....	25
Figura 2.5 Soldadura por arco de tungsteno con protección gaseosa GTAW....	26
Figura 2.6 Diagrama de Schaeffler de 1949 .....	31
Figura 2.7 Diagrama de De Long de 1973 con número de Ferrita.....	32
Figura 2.8 Diagrama WRC-92.....	33
Figura 2.9 Representación esquemática de los modos de solidificación en los aceros austeníticos.....	35
Figura 2.10 Tipos de solidificación en los aceros inoxidables austeníticos. ....	36
Figura 2.11 Esquema de los límites en el metal de soldadura que solidifica primariamente austenita (modo A y AF). ....	36
Figura 2.12 Microestructura de la zona de fusión tipo 304L. ....	38
Figura 2.13 Precipitación de Carburos.....	40

### CAPITULO 3

Figura 3.1 Sensibilización del acero inoxidable en una Zona Afectada por el Calor (ZAC).....	43
Figura 3.2 Corrosión intergranular en el borde de grano en ZAC del tipo 304.....	44
Figura 3.3 Curvas de tiempo-temperatura precipitación para diferentes contenidos de carbono .....	46
Figura 3.4 Corrosión por picadura.....	49
Figura 3.5 Corrosión Bajo tensión.....	50
Figura 3.6 Cámara salina. (Q-FOG-CCT-600, EPN, 2013) .....	55
Figura 3.7 Partes del equipo de cámara salina Q-FOG-CCT-600 .....	56
Figura 3.8 Marcador de golpe.....	59
Figura 3.9 Números de Ciclos de limpieza vs masa perdida. ....	60

### CAPITULO 4

Figura 4.1 Ubicación de los aceros tipos 304L y 316L en el diagrama de Schaeffler según cromo y níquel equivalente calculados en la tabla 4.3 para el material base.....	70
Figura 4.2 Posibles modos de solidificación para los aceros 304L y 316L .....	71
Figura 4.3 Diagrama WRC para las varillas consumibles ER 308L y ER316L.....	72
Figura 4.4 Horno de resistencias, marca Linberd .....	73
Figura 4.5 Soldadura de las placas.....	73
Figura 4.6 Equipo GTAW.....	74
Figura 4.7 Tamaño de probeta seleccionada para realizar las pruebas. ....	76
Figura 4.8 Dimensiones de probeta para Ensayo de Tensión. ....	78
Figura 4.9 Ensayo de Tracción.....	79
Figura 4.10 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación-AISI 304L.....	80
Figura 4.11 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación-AISI 304L.....	81
Figura 4.12 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación .....	82
Figura 4.13 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación- Probeta.....	83
Figura 4.14 Probeta luego de aplicar el ensayo de tensión. ....	84



Figura 4.15 Dimensiones de la Probeta para Ensayo de Doblado de Raíz y Doblado de Cara.....	85
Figura 4.16 Marcación de las probetas para doblado.....	85
Figura 4.17 Ensayo de Doblado.....	86
Figura 4.18 Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 304L con precalentamiento.....	86
Figura 4.19 Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 304L sin precalentamiento.....	86
Figura 4.20 Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 316L con precalentamiento.....	87
Figura 4.21 Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 316L sin precalentamiento.....	87
Figura 4.22 Macrográficas del cordón de soldadura. ....	89
Figura 4.23 Metal Base.....	90
Figura 4.24 Zona afectada por el calor.....	90
Figura 4.25 Zona de fusión.....	90
Figura 4.26 Metal base.....	91
Figura 4.27 Zona afectada por el calor.....	91
Figura 4.28 Zona de Fusión.....	91
Figura 4.29 Metal base.....	92
Figura 4.30 Zona afectada por el calor.....	92
Figura 4.31 Zona de fusión.....	92
Figura 4.32 Metal Base.....	93
Figura 4.33 Zona afectada por el calor.....	93
Figura 4.34 Zona de fusión.....	93
Figura 4.35 Metodología para el ensayo de niebla salina.....	95
Figura 4.36 Marcación de las probetas.....	96
Figura 4.37 Balanza DENVER INSTRUMENT COMPANY AA-200.....	96
Figura 4.38 Colocación de las probetas.....	97
Figura 4.39 Mapeo de placas.....	97
Figura 4.40 Preparación de la mezcla (Solución corrosiva).....	98
Figura 4.41 Cloruro de sodio.....	99
Figura 4.42 Probetas luego de salir de la cámara salina. ....	100

Figura 4.43 Pérdida de Masa vs Ciclo de Exposición .....	102
Figura 4.44 Pérdida de Masa vs Ciclo de Exposición .....	102
Figura 4.45 Solución Hidróxido de sodio y polvo de zinc.....	103
Figura 4.46 Limpieza Química.....	104
Figura 4.47 Lavado y secado de las probetas luego de la limpieza química. ....	104
Figura 4.48 Masa Perdida vs Ciclo de Exposición.....	106
Figura 4.49 Masa Perdida vs Ciclo de Exposición AISI 316L .....	107
Figura 4.50 Longitud de la probeta.....	108
Figura 4.51 Velocidad de Corrosión.....	110
Figura 4.52 Velocidad de Corrosión.....	110
Figura 4.53 Velocidad de Corrosión.....	111
Figura 4.54 Velocidad de Corrosión.....	112

## **CAPITULO 5**

Figura 5.1 Doblado de cara AISI 304L con precalentamiento.....	115
Figura 5.2 Doblado de cara AISI 316L sin precalentamiento.....	115
Figura 5.3 Zona afectada por el calor 100X .....	117
Figura 5.4 Microestructura del material base a) AISI 304L y b) AISI 316L expuesto a 1000 horas con precalentamiento por 500X.....	122
Figura 5.5 Microestructura del material base a) AISI 304L y b) AISI 316L expuesto a 1000 horas con precalentamiento por 500X .....	122

## **LISTA DE ANEXOS**

### **ANEXO I**

WPS Calificación De Soldadura

### **ANEXO II**

Norma ASTM G1-2003

### **ANEXO III**

Informe de ensayo de tracción y Doblado

### **ANEXO IV**

Tipos y números de ensayos a realizar

### **ANEXO V**

Structural welding code-stainless steel –General Provisions

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico es desarrollado con la finalidad de analizar los problemas de corrosión ocasionados en el proceso de soldadura de aceros inoxidable, siendo estos de tipo AISI 304L y 316L de matriz austenítica que presenta una gran resistencia a ambientes corrosivos.

El proyecto de titulación inicia con una descripción general del acero inoxidable, sus principales ventajas, las especificaciones del acero, su clasificación, las propiedades de los aceros inoxidables 304L y 316L utilizados en el presente proyecto, sus aleaciones y sus aplicaciones, para culminar con este capítulo los tratamientos térmicos realizados a los aceros inoxidables.

El segundo capítulo detalla la soldadura de los aceros inoxidables, se detalla a continuación la soldadura para el grupo de los aceros utilizados, los diagramas de composición de estos aceros y los fenómenos a considerar en la soldadura de los aceros inoxidables.

El tercer capítulo trata exclusivamente de la resistencia de los aceros inoxidables, fenómenos de corrosión, tipos de corrosión que existen en los aceros inoxidables, su clasificación y métodos de evaluación de la corrosión, ensayo de niebla salina.

El cuarto capítulo presenta detalladamente el proceso experimental, el proceso de soldadura utilizado, material de aporte, ensayos de calificación del WPS, análisis macrográfico y microestructural de las juntas soldadas y el ensayo de corrosión salina punto esencial del estudio para este proyecto de titulación para luego terminar con el cálculo de la velocidad de corrosión clave de este proyecto.

El quinto capítulo presenta el análisis de resultados que comprende los ensayos realizados. El último capítulo, finaliza con las conclusiones y recomendaciones que se generan durante la realización del estudio.

## PRESENTACIÓN

El proyecto elaborado está enfocado en el análisis de los problemas de corrosión en la soldadura de los aceros inoxidable AISI 304L y AISI 316L. Para ello se elige el proceso de soldadura GTAW que nos permite soldar a bajos espesores y por sobre todo es un proceso con alto grado de eficiencia que genera uniones con excelente calidad ayudando así en la construcción de muchas aplicaciones.

Con la inserción del cambio en la transformación de la matriz productiva especialmente en el sector metalmecánico, la industria Ecuatoriana va desarrollando nuevos productos útiles para el consumo interno, esto conlleva a la aplicación masiva de los aceros inoxidable y más aún cuando se trata de aceros que tienen una excelente propiedad, la resistencia a la corrosión. Al utilizar estos aceros de manera amplia por sus propiedades también trae consigo la aparición de varios tipos de corrosión a los que son especialmente susceptibles éstos si no se tiene control en los parámetros utilizados.

Para poder evidenciar el debilitamiento de la resistencia a la corrosión y sus factores, en los aceros AISI 304L y AISI 316L, se eligió el método de evaluación de corrosión en laboratorio, el ensayo de niebla salina utilizando el método de pérdida de masa, este ensayo simula la corrosión sometida a los dos tipos de aceros con condiciones diferentes, sin y con precalentamiento. El fenómeno de corrosión es uno de los aspectos que mayores problemas causa en la industria, por ello se realiza este proyecto con el fin de obtener resultados próximos a la realidad.

Finalmente, una vez elaborado el ensayo de niebla salina se determina la velocidad de corrosión que pueden sufrir estos tipos de aceros.

## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES ESPECIFICACIONES Y APLICACIONES**

#### **1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACERO INOXIDABLE**

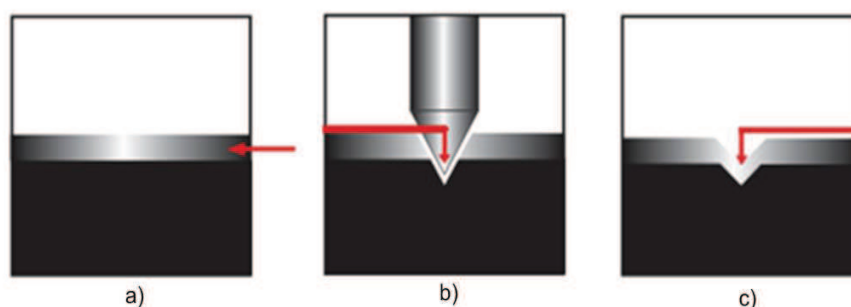
Los aceros Inoxidables son aleaciones esencialmente compuestos por Hierro (Fe), Carbono (C) y Cromo (Cr), siendo el hierro el elemento fundamental de los aceros inoxidables, lo que se destaca de estos aceros es su capacidad de resistencia contra los agentes corrosivos, como lo son el agua de mar, la atmósfera o el medio ambiente y las soluciones salinas, etc.

Su principal ventaja de aplicación se debe a que el Cromo posee una gran afinidad por el oxígeno que reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro, sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, ocasionando que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas.

##### **1.1.1 PASIVIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

La principal característica es su alta resistencia a la corrosión, esta resistencia es debido a la formación espontánea de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero, película extremadamente fina, invisible, densa y estable, denominada capa pasiva siendo además una capa protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, cuando sufren daños por abrasión, corte, etc.

En la figura 1.1 se muestra la restauración de la capa cuando esta es removida por diferentes medios.



**Figura 1.1** a) El acero inoxidable forma una capa de óxido de cromo, b) Cuando es rayado, esta película protectora es removida y c) La capa protectora es restaurada.<sup>1</sup>

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables está controlada por la naturaleza de su película pasiva y las propiedades de ésta dependen de su composición en la aleación, el medio corrosivo, tratamiento superficial y la temperatura. Para aumentar la resistencia a la corrosión o para requerimientos de fabricación específicos, el Cr es el elemento que formará esta película protectora con adiciones aproximadamente al 12%, esta adición hace que el acero expuesto a la atmósfera reduzca de manera significativa la velocidad de corrosión.

Otra de las características de la película pasiva es que si se rompe por agentes químicos o mecánicos es capaz de regenerarse espontáneamente, siempre y cuando existan condiciones suficientemente oxidantes. El mantenimiento de la pasividad consume especies oxidantes en la superficie del material y por lo tanto, requiere un continuo aporte del agente oxidante, puesto que los aceros muestran una fuerte tendencia a pasivarse, el contenido de oxígeno del aire así como la mayoría de las soluciones aireadas, es suficiente para la creación y mantenimiento de la pasivación.

## 1.2 APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES

En la actualidad, las aplicaciones de este tipo de aleación bajo el diseño en el campo de la ingeniería es uno de los procesos más importantes para el desarrollo de la Industria ya que son muy resistentes a la corrosión, poseen excelentes

<sup>1</sup> IBARRA M., NUÑEZ E., HUERTA J., (2010), "Manual de Aceros Inoxidables", Chile; pág. 25.

propiedades mecánicas, son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente.

Los aceros inoxidable son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos, contribuyendo de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidable son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, instrumentos quirúrgicos, monedas, ollas, sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina.



**Figura 1.2** Tanques de almacenamiento de acero inoxidable<sup>2</sup>.

### **1.3 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES.**

- Los aceros inoxidable de baja aleación, resisten a la corrosión en condiciones atmosféricas; los aceros inoxidable de altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.

---

<sup>2</sup> <http://metaza.com.co/productos-y-servicios/acero-inoxidable>



- Las temperaturas de proceso típicas oscilan entre 300 °C y 550 °C (con un máximo de 650 °C).
- Los aceros inoxidable resisten presiones de trabajo previstas típicas de hasta 123 bar y diferencias entre la presión de entrada y salida de 40 bar.
- Pueden ser cortados, soldados, forjados y mecanizados con resultados satisfactorios.
- Presentan facilidad de limpieza, lo que hace la primera opción en hospitales, cocinas, e instalaciones alimenticias y farmacéuticas.

#### 1.4 ESPECIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Entre las normalizaciones más utilizadas se encuentran las de AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero; American Iron and Steel Institute) y las de UNS. Las AISI por la gran aplicación que tiene en el mercado están compuestas por las series de 200 y 300 para austenita y 400 para martensita.

En la tabla 1.1 se indica la designación para cada tipo de aceros inoxidable, en el caso de los austeníticos su designación “L” por su sigla en inglés (Low carbon), que significa que están formados con bajo porcentaje de carbono.

**Tabla 1.1** Designación y tipos de los Aceros Inoxidables.<sup>3</sup>

CLASE	CLASIFICACIÓN AISI	MODELOS
<b>Austeníticos</b>	Serie 200-300	202,205,309,309S, 304, 316, 304L, 316L
<b>Martensíticos</b>	Serie 400	410, 420, 431
<b>Ferríticos</b>	Serie 400	409, 430, 434
<b>Dúplex</b>	Se usa nombre comercial	329, 2205
<b>Endurecidos por Precipitación</b>	Se usa nombre comercial	17-4 PH, 15-5 PH 17-7PH, 15-7 PH

#### 1.5 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES

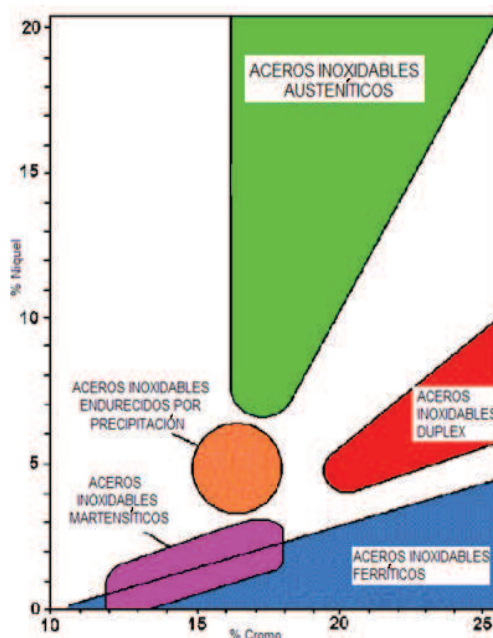
La resistencia a la corrosión y las excelentes propiedades mecánicas que presentan los aceros inoxidable hacen aún más importante su aplicación.

<sup>3</sup>Colomber., R; Desmond R; (1972) “Aceros Inoxidables-Aceros Refractarios”, España; pág.41.

Los aceros inoxidable se clasifican en cinco grupos importantes según su microestructura:

1. Martensíticos
2. Ferríticos
3. Austeníticos
4. Duplex (austenita más ferrita)
5. Endurecidos por precipitación (PH).

En la figura 1.3 se muestra la clasificación de los aceros inoxidable especificando el porcentaje de níquel y cromo.



**Figura 1.3** Representación gráfica de la clasificación de los aceros inoxidable en función del contenido de Cr y Ni. <sup>4</sup>

### 1.5.1 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Los aceros inoxidable martensíticos son esencialmente aleaciones de hierro, cromo y carbono. El contenido de cromo se encuentra en un porcentaje de 11%-18% con pequeñas cantidades de otros elementos de aleación como el níquel, en porcentajes no superiores al 2.5%. El contenido de carbono está en una cantidad que puede variar entre un mínimo de 0,08% hasta un máximo de un 1,2%.

<sup>4</sup> IBARRA M., NUÑEZ E., HUERTA J., (2010), "Manual de Aceros Inoxidable", Chile; pág. 25.

La martensita es una fase rica en carbono, frágil y extraordinariamente dura, además tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico.

Los aceros inoxidable martensíticos son susceptibles de aumentar sus características mecánicas de resistencia y dureza mediante un tratamiento térmico de temple.

Entre las aplicaciones más importantes se encuentran: aletas para turbinas, fundiciones resistentes a la corrosión, cuchillería, piezas de válvulas, instrumentos quirúrgicos, cubiertos, etc.

### **1.5.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS**

Los aceros inoxidable ferríticos son los más simples ya que contiene solamente hierro y cromo, el contenido de cromo puede variar de 10.5% a 30%. El contenido de carbono en estos aceros es mucho menor que en los martensíticos con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica.

Los aceros inoxidable ferríticos también son magnéticos, tiene una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas. El acero inoxidable tipo AISI 430 es el más representativo de este grupo ya que contiene de 16% a 18% de cromo y un máximo de 0.12% de carbono.

Los aceros inoxidable ferríticos pueden ser utilizados en: tubos de escape de automóviles, tanques de radiadores, adornos decorativos, partes de hornos, boquillas y cámaras de combustión.

### **1.5.3 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX**

Aceros inoxidable dúplex, también conocidos como acero inoxidable austenítico-ferrítico.

La alta resistencia a la corrosión y las excelentes propiedades mecánicas de los aceros inoxidable dúplex se debe a su composición química y microestructura balanceada ("duplex") de fracciones aproximadamente equivalentes de volúmenes de ferrita y austenita. Debido a su alto contenido de cromo, nitrógeno

y molibdeno, los aceros dúplex ofrecen una buena resistencia a corrosión local y uniforme.

Las principales aplicaciones de los aceros inoxidable dúplex son: tuberías de intercambiadores térmicos de petróleo, plataformas marinas y en la industria de procesamientos químicos.

#### **1.5.4 ACEROS INOXIDABLES POR PRECIPITACIÓN**

Los aceros inoxidables por precipitación PH (Precipitation Hardening) son aleaciones de hierro, carbono, cromo y níquel, que se caracterizan por la resistencia obtenida a partir de un tratamiento térmico de envejecimiento.

Contienen cantidades suficientes de Cr y Ni que confieren las propiedades tanto de austeníticos como de los martensíticos.

Estos aceros tienen buena resistencia a la corrosión, además tienen buena ductilidad y tenacidad, pueden alcanzar valores superiores que los obtenidos por los aceros inoxidables martensíticos (aprox. 1480 MPa), debido al contenido de cromo (Cr) mayor que los aceros martensíticos, la resistencia a la corrosión resulta también ser superior.

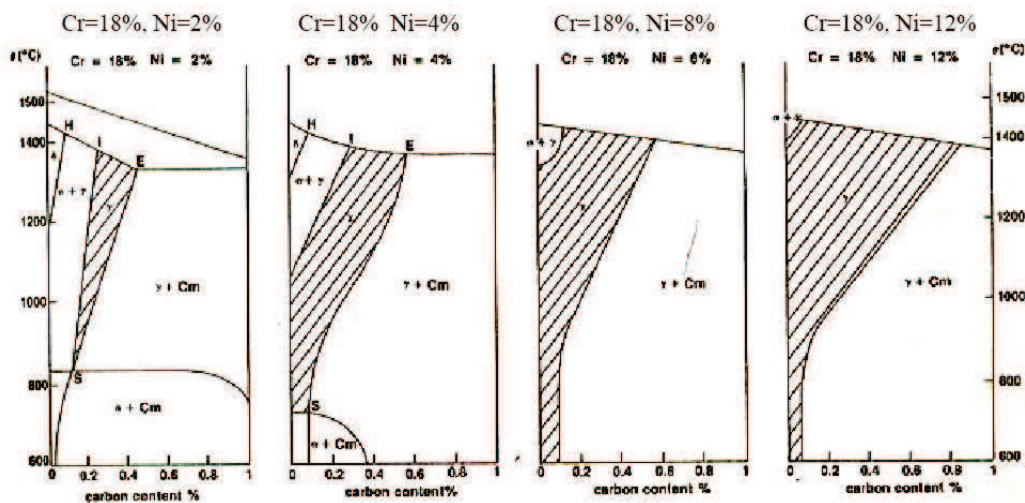
#### **1.5.5 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS**

Los aceros austeníticos son aleaciones de cromo- níquel (serie AISI 300), que contienen como composición básica de 8%-12% de níquel, con 18 % de cromo, siendo está la más extensa y comúnmente utilizada con éxito a nivel comercial. También estos tipos de aceros contienen una de aleación cromo-níquel – manganeso de serie AISI 200. El níquel actúa como estabilizador dentro de la composición de estos aceros, entre ellos se destaca además la presencia de manganeso y nitrógeno los cuales son necesarios para bajar la temperatura del intervalo  $\gamma$  y evitar la transformación alotrópica  $\gamma - \alpha$ .<sup>5</sup> En la figura 1.4 se muestra

---

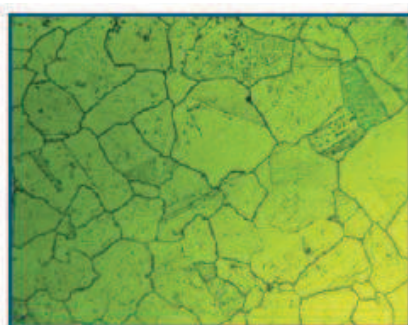
<sup>5</sup> ASKELAND D., (1998), "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", International Thomson Editors.

a influencia del níquel en la fase gamma de un acero con 18% de Cromo.



**Figura 1.4** Influencia del níquel en la fase gamma de un acero con 18% Cr<sup>6</sup>.

Los aceros inoxidable austeníticos, tienen considerablemente mejor resistencia a la corrosión que los aceros martensíticos y ferríticos, y se caracterizan por su excelente resistencia mecánica y resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas. Estos aceros se denominan así por tener una microestructura monofásica formada por grano equiaxiales de austenita como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5** Microestructura de la Austenita<sup>7</sup>

Las principales características de los inoxidable austeníticos en general, se deben a su estructura FCC, que le transfiere una gran ductilidad, conformabilidad, tenacidad y excelente resistencia al impacto.

<sup>6</sup> [http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS\\_INOXIDABLES.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf)

<sup>7</sup> INDURA, 2010, "Manual de los Aceros Inoxidables", pág. 16.

Los principales aleantes de este grupo de aceros inoxidable se presentan a continuación:

**Tabla 1.2** Características de Aceros Inoxidables Austeníticos Serie 300<sup>8</sup>

<b>TIPO AISI</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>APLICACIONES MÁS COMUNES</b>
<b>302</b> <b>(18% Cr, 8%Ni)</b>	Aleación Básica	
<b>303</b> <b>(18%Cr, 9%Ni, 0,15%S)</b>	Agregado de S para mejorar maquinabilidad.	Conectores, cerraduras, tuercas y tornillos, partes maquinadas, partes para bombas.
<b>304</b> <b>(18%Cr, 8%Ni)</b>	Menos % C (0,08%) que el 302 para mejorar resistencia a la corrosión intergranular.	Equipo químico de procesos, manejo de alimentos y equipos para hospitales.
<b>304L</b> <b>(18%Cr, 8% Ni)</b>	Menos de 0,03% C para reducir los riegos de corrosión intergranular.	Reducción de carbono para evitar la corrosión intergranular en la soldadura.
<b>309/309S</b> <b>(23% Cr, 13%Ni)</b>	Más Cr y Ni para aumentar la resistencia a la formación de escamas a altas temperatura. 309 0,2% C y 309S 0,08%C.	Calentadores de aire, equipos para tratamientos térmicos de aceros.
<b>316</b> <b>(17%Cr, 12%Ni, 3%Mo)</b>	Agregado de Mo, mejora la resistencia a la tracción a altas temperatura 0,08%C.	Equipos para el procesamiento de alimentos, farmacéuticos, fotográficos, textil.
<b>316L</b> <b>(17%Cr, 12%Ni, 3%Mo)</b>	Reducción del % de C para evitar la corrosión intergranular durante la soldadura 0,03%C.	Intercambiadores de calor, prótesis temporarias.
<b>330</b> <b>(21%Cr, 36%Ni)</b>	Más Ni para aumentar la resistencia al choque térmico y carburación.	Hornos de recocido, partes para turbinas de gas e intercambiadores de calor.
<b>347</b> <b>(18%Cr, 10%Ni)</b>	Estabilizado con Nb y Ta para evitar los carburos de Cr.	Tanques soldados para el almacenamiento de sustancias químicas orgánicas.

<sup>8</sup> [http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/16\\_TT\\_aceros\\_inoxidables\\_v2.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/16_TT_aceros_inoxidables_v2.pdf).

**Tabla 1.3** Descripción de los Aceros Inoxidables Austeníticos Serie 200<sup>9</sup>

TIPO AISI	DESCRIPCIÓN
201 (6%Mn, 0.25%N además 4.5%Ni, 17%Cr, 0.15%C)	Se reemplaza parcialmente el Ni por N y Mn.
202 (8%Mn y 0.25%N, además 5%Ni, 0.15%C, 18%Cr.)	
205 (15%Mn y 0.35%N, además 1.5%Ni, 0.2%C, 17%Cr)	

Los aceros inoxidables austeníticos son generalmente más costosos que los grados martensíticos y ferríticos, debido al alto contenido de aleantes, pero ofrecen grandes ventajas como la fácil conformación y la soldabilidad.

#### 1.5.5.1 Característica general del acero inoxidable austenítico.

A continuación se presenta las características más esenciales del acero inoxidables austeníticos.

<sup>9</sup>[http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/16-\\_TT\\_aceros\\_inoxidables\\_v2.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/16-_TT_aceros_inoxidables_v2.pdf).

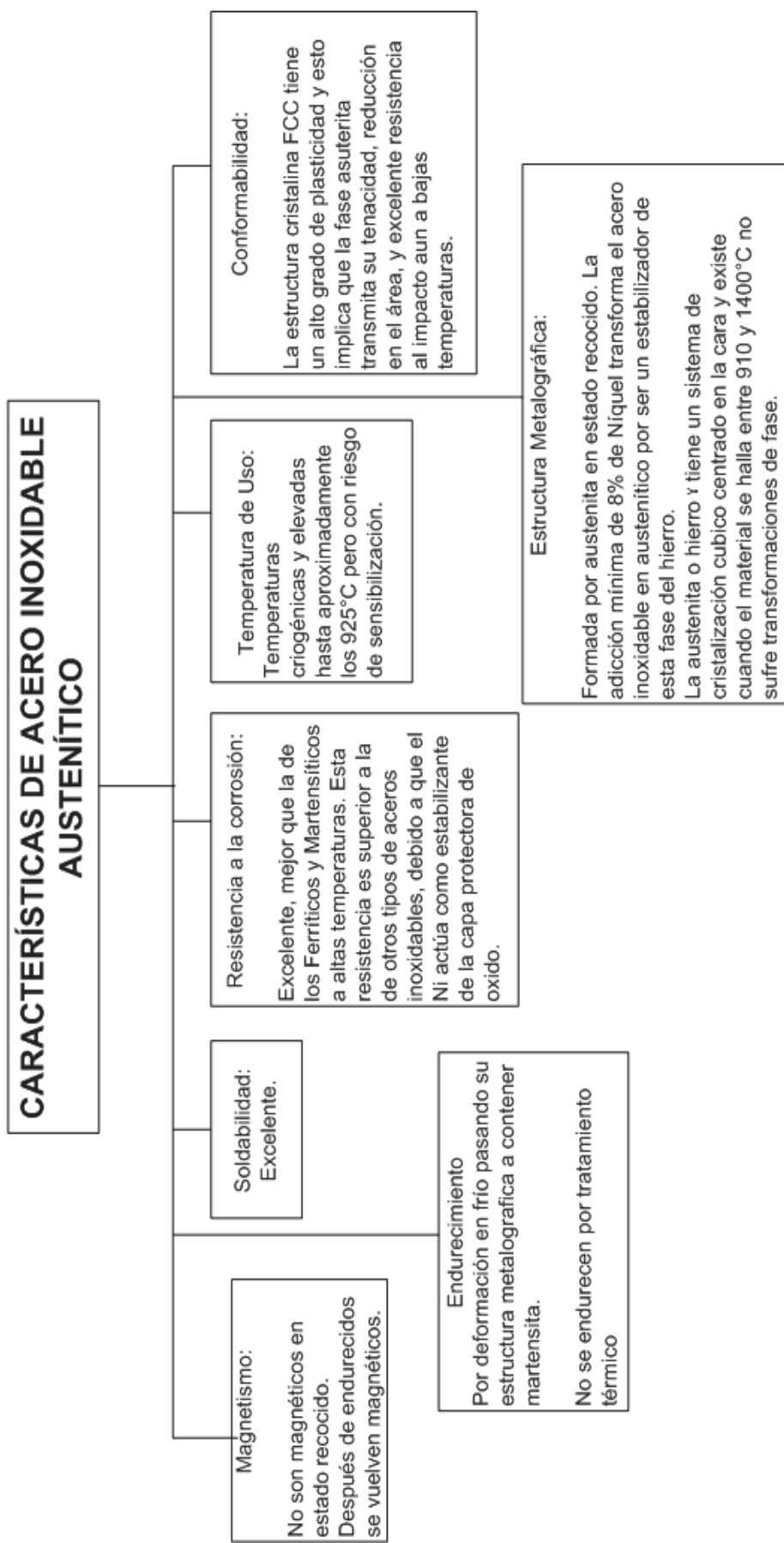


Figura 1.6 Características del acero inoxidable austenítico



## 1.6 CARACTERÍSTICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304L Y AISI 316L.

### 1.6.1 ACERO INOXIDABLE AISI 304L

Forma parte de los aceros inoxidable austeníticos. Este acero es aleado con Cr y Ni y bajo contenido de C que presenta una buena resistencia a la corrosión. En la condición de suministro resiste a la corrosión intergranular en el rango de hasta 300°C y 350°C para la calidad 304L. No se requiere un tratamiento posterior al proceso de soldadura; tiene propiedades para embutido profundo, no es templable ni magnético.

Puede ser fácilmente trabajado en frío como doblado, cilindrado, embutido profundo, etc. Sin embargo, el alto grado de endurecimiento que alcanza por trabajo en frío, comparado con aceros de baja aleación, hacen requerir de mayores esfuerzos para su proceso de conformado.

**Tabla 1.4** Composición química 304L<sup>10</sup>

Grado		Porcentaje						
		C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
304L	Max.	0.03	18-20.1	8-12.0	2	1	0.045	0.03

**Tabla 1.5** Propiedades del acero 304L<sup>11</sup>

Propiedades Mecánicas					
Grado	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)	Elongación (% en 50mm)	Dureza Brinell Max	Propiedades para trabajo en frío
AISI 304L	485	170	40	201	Muy Buena

#### 1.6.1.1 Aplicaciones

Entre las aplicaciones de este tipo de aceros se encuentran: equipos para la industria química y petroquímica, así como también equipos para la industria

<sup>10</sup> (ASTM A240, 2000, pg.3)

<sup>11</sup> (ASTM A240, 2000, pg.7)

alimenticia y farmacéutica. De igual manera se destacan en campos como el de la construcción civil, e incluso hasta en campos más simples, como es la realización de vajillas y utensilios domésticos.



a) Electrodomésticos      b) Tanques de Almacenamiento  
**Figura 1.7** Algunas Aplicaciones del acero AISI 304L<sup>12,13</sup>

#### 1.6.1.2 Ventajas del acero AISI 304L

Entre las principales ventajas se tiene:

- Alta resistencia a la corrosión
- Excelente formalidad
- Facilidad de fabricación
- Facilidad de limpieza
- Buena soldabilidad
- Amplio rango de propiedades mecánica en condiciones de recocido y trabajado en frío
- Buena apariencia

#### 1.6.2 ACERO INOXIDABLE AISI 316L

El acero AISI 316L corresponde a un acero inoxidable cromo-níquel-molibdeno con bajos contenidos de carbono para minimizar la precipitación de carburos de cromo. La adición de molibdeno a esta aleación incrementa la resistencia a la corrosión general y mejora la resistencia a la corrosión por picaduras.

<sup>12</sup> <http://www.co.all.biz/aceros-inoxidables-austenticos-g9450#show0>

<sup>13</sup> <http://myv-mixing.com.ar/productos-y-equipamiento/tanques-y-reactores/>

Los bajos contenidos de carbono presentes en el acero 316L previenen la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano y por consiguiente, la corrosión intergranular. Este tipo de acero inoxidable austenítico presenta muy buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas hasta 930°C. Estos aceros no pueden ser endurecidos mediante tratamientos térmicos (TT).

**Tabla 1.6** Composición química del acero 316L<sup>14</sup>

Grado		Porcentaje (%)							
		C	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	P	S
316L	Max.	0.03	16.5-18.5	2-2.5	10.0-13.0	1	2	0.045	0.03

**Tabla 1.7** Propiedades del Acero AISI 316L<sup>15</sup>

Propiedades Mecánicas a 20°C					
Grado	Resistencia a la Tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)	Elongación (% en 50mm)	Dureza Brinell Max	Propiedades para trabajo en frío
AISI 316L	481	200	40	160-190	Muy Buena

### 1.6.2.1 Aplicaciones

Este tipo de acero inoxidable es utilizado mucho en equipos de procesadores de alimentos, implantes médicos, equipos para refinerías de petróleo, procesadores de medicamentos, aplicaciones marinas, así como también utensilios de cocina y aplicaciones en electrodomésticos, intercambiadores de calor y contenedores para transportación de químicos. También puede ser fácilmente formado por los métodos más comunes, como: embutido, troquelado, doblado, etc. Su combinación de baja resistencia a la fluencia y elevado porcentaje de alargamiento son factores importantes en la optimización de las operaciones de embutido.

<sup>14</sup> (ASTM A240, 2000, pg.4)

<sup>15</sup> (ASTM A240, 2000, pg.7)



a) Bridas



b) Válvula mariposa

**Figura 1.8** Algunas aplicaciones del acero inoxidable AISI 316L<sup>16,17</sup>

### 1.6.2.2 Ventajas del acero AISI 316L

Entre las principales ventajas se tiene:

- Superior a aleaciones austeníticas 301 y 304
- Excelente resistencia a la corrosión
- Muy buena soldabilidad
- Buena resistencia a la corrosión por picaduras y hendiduras
- Buena formabilidad
- Facilidad de limpieza
- Buena resistencia a temperaturas elevadas

## 1.7 DESCRIPCIÓN DE LOS ALEANTES DEL ACERO INOXIDABLE<sup>18</sup>

Los elementos de aleación de los aceros inoxidables tienen un efecto específico, proporcionar excelentes propiedades mecánicas, así como de resistencia a la corrosión. Para que estos aceros obtengan estas características es necesario adicionar otros elementos, que dependan del tipo y la cantidad de elementos aleante que permiten formar un amplio conjunto de materiales, los cuales son importantes mencionarlos.

<sup>16</sup> <http://montajesurbanos.com/aceroinoxidable.html>

<sup>17</sup> <http://image.made-in-china.com/2f0j00HvITWVdyfeGM/Stainless-Steel-Sanitary-Welded-Butterfly-Valve.jpg>

<sup>18</sup> Sáenz, J., 1994, págs. 22-27.

A continuación se detallan algunas de las principales características, tanto mecánicas como de comportamiento ante medios agresivos, que proporcionan los distintos elementos aleantes presentes en los aceros inoxidable.

### **1.7.1 CROMO (Cr)**

El cromo es el elemento aleante más importante de los aceros inoxidable.

Las características más importantes que este elemento puede conferir a la aleación, son la autoprotección debido a que forma una capa uniforme y delgada de óxido de cromo el cual protege al resto de material de cualquier daño, la resistencia a la corrosión, aumento del límite elástico, tenacidad, resistencia a la fatiga y mejora sensiblemente la resistencia a elevadas temperaturas.

Este se emplea en cantidades diversas desde 0.3% a 30% y se aplica en aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidable. Formador de carburos proporciona a los aceros características de inoxidable y refractarios, además se utiliza para revestimientos decorativos.

### **1.7.2 NÍQUEL (Ni)**

Es un estabilizador de la fase austenítica. Este elemento aumenta la ductilidad y la tenacidad. Disminuye la corrosión sobretodo en ambientes ácidos.

El Níquel aumenta la capacidad de temple en los aceros al disminuir la velocidad crítica de enfriamiento. A mayores contenidos de Ni en el acero muestra mayor facilidad a formar martensita. Influye para que los aceros resistan temperaturas elevadas y a la corrosión.

### **1.7.3 CARBONO (C)**

El contenido de carbono favorece a la disminución de precipitados de carburos en la zona afectada por el calor (ZAC) durante el proceso de soldadura. Es un estabilizador fuerte de la austenita, aumenta la resistencia mecánica y reduce la resistencia a la corrosión intergranular. Este elemento se encuentra siempre presente en los aceros inoxidable en mayor o menor porcentaje, en lo aceros inoxidable austeníticos se mantiene a niveles bajos.

#### **1.7.4 MOLIBDENO (Mo)**

El molibdeno mejora la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al desgaste de los aceros, además aumenta la pasividad y resistencia química de los aceros inoxidable. Incrementa la resistencia a la corrosión especialmente en aplicaciones donde el material está en contacto con sustancias ácidas o de naturaleza salina.

El molibdeno aumenta la resistencia a la corrosión por picadura y hendidura. Favorece la resistencia mecánica en caliente de los aceros austeníticos.

#### **1.7.5 MANGANESO (Mn)**

El manganeso es usado generalmente en los aceros inoxidable con el objetivo de mejorar la ductilidad en caliente. Actúa también como desoxidante y evita, que en solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material. El manganeso aumenta la solubilidad del nitrógeno y es usado para obtener elevados contenidos de nitrógeno en aceros austeníticos.

Es un fuerte formador de óxidos y sulfuros (MnO y MnS). Se añade para mejorar la desoxidación y prevenir formación de inclusiones de sulfuros que causan rotura en caliente.

#### **1.7.6 SILICIO (Si)**

Aumenta la resistencia a la oxidación, a altas temperaturas y en soluciones fuertemente oxidantes a bajas temperaturas. Promueve la fase ferrítica. Aumenta la resistencia en caliente, reduce la capacidad de temple al aire y en concentraciones entre un 4% a 5% en peso, incrementa la resistencia a la corrosión.

#### **1.7.7 OTROS**

Los aleantes que se encuentran en pequeñas cantidades en estos tipos de aceros inoxidable austeníticos son el azufre y el fósforo cuyas características son muy bajas relacionadas con las principales, el azufre se añade para mejorar la mecanización y el fósforo para aumentar la resistencias a la tensión y la maquinabilidad.

## **1.8 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

Los tratamientos térmicos de los aceros inoxidable son procesos que sirven para producir cambios en las condiciones físicas, propiedades mecánicas y esfuerzos residuales, dándoles características especiales para que de esta manera exista un aumento de dureza y resistencia mecánica así como mayor plasticidad o maquinabilidad para facilitar su conformación o para su aplicación final.

Mediante los tratamientos térmicos se desea recuperar la máxima resistencia a la corrosión cuando esta propiedad ha sido perjudicialmente afectada por la fabricación previa o calentamientos.

En general a los aceros inoxidable se les puede aplicar el tratamiento térmico de recocido, este tratamiento térmico se aplica para eliminar todo vestigio de acritud, disolver los carburos de cromo y obtener una matriz austenítica homogénea. La temperatura a la cual se realiza el recocido será definida a continuación según el tipo de acero, esta temperatura se encuentra por los 1050°C, seguido al calentamiento hasta dicha temperatura se debe enfriar rápidamente en agua o aire según condiciones de la pieza a tratar. Este enfriamiento rápido es para evitar que la pieza permanezca en el rango de temperatura, en el cual los carburos suelen precipitar el tiempo de calentamiento el cual varía entre 5 y 60 minutos según las dimensiones de la pieza.

### **1.8.1 TRATAMIENTO TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS**

En estos aceros el contenido de carbono es lo suficientemente bajo para reducir la precipitación de carburos intergranulares. Las características limitadas de sensibilización de estos aceros lo hacen especial para la soldadura.

#### **1.8.1.1 Tratamientos térmicos en juntas soldadas.**

Las temperaturas altas en los precalentamientos disminuyen la tasa de enfriamiento, lo que tiene poco efecto sobre la transformación ferrita austenita, y que esta transformación ocurre a temperaturas elevadas, con lo que temperaturas altas de precalentamiento no se influencia en la formación de martensita.

La temperatura de precalentamiento debe ser menor que el rango de sensibilización para evitar la precipitación de carburos.

Los problemas de fisuración en cordones de soldadura se producen en estructuras martensíticas, este inconveniente puede revertirse con precalentamiento de la soldadura a 200°C, el precalentamiento a esta temperatura se puede aplicar a la soldadura de aceros inoxidable austeníticos para mejorar la calidad del proceso de soldadura.

### **1.8.1.2 Tratamientos térmicos de Post soldadura<sup>19</sup>**

La mayoría de las juntas soldadas de aceros inoxidable austeníticos no requieren tratamiento térmico de post soldadura. Sin embargo, el tratamiento térmico de post soldadura deberá ser seleccionado si la intención de aplicarlo es para aliviar tensiones o modificar la microestructura.

Los problemas de corrosión asociados con las soldaduras de los aceros inoxidable austeníticos suelen localizarse en la zona afectada por el calor. Si el ambiente de servicio es conocido por atacar las zonas sensibilizadas que contienen carburos intergranulares o si se requiere la máxima resistencia a la corrosión, un tratamiento térmico de solución post soldadura a temperaturas de recocido o normalizado debe usarse para disolver carburos.

La soldadura debe ser enfriada rápidamente y uniformemente, al menos durante el rango aproximado a temperaturas entre los 900 hasta los 430 °C, para mantener el carbono en solución (evitar formación de carburos de cromo).

El enfriamiento en agua o en chorro de agua es necesario para secciones gruesas, mientras que enfriamientos en aire es utilizado para secciones delgadas, el enfriamiento en agua puede generar tensiones residuales.

### **1.8.1.3 Resultados obtenidos por los tratamientos térmicos.**

Los aceros inoxidable austeníticos han sido en muchas ocasiones tratados térmicamente para aliviar esfuerzos, las temperaturas normalmente usadas para acero al carbono es 540 hasta 650 °C.

---

<sup>19</sup>ALMEIDA-VILLENA; (2009); "Soldadura fuerte del acero inoxidable austenítico"; EPN; pg.33-34.



Aunque a estas temperaturas virtualmente todos los esfuerzos residuales son aliviados en aceros al carbono, solo el 30% al 40% de los esfuerzos residuales son aliviados en estos aceros inoxidable austeníticos. Debido que el tratamiento no provee del adecuado alivio de esfuerzos, los aceros inoxidable aliviados a estas temperaturas son algunas veces susceptibles de corrosión bajo tracción.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE**

#### **2.1 SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

Los aceros inoxidable debido a sus buenas características de soldabilidad, pueden ser soldados por procesos como: GTAW, SMAW, MIG, GMAW, entre otros, en los cuales se debe tener en cuenta los parámetros como son: amperaje, voltaje, posición de soldadura, etc. La soldabilidad de estos aceros depende principalmente de la composición química que presentan.

La soldadura de los aceros inoxidable ferríticos generalmente es mejor que la de los martensíticos pero más difícil que los austeníticos, debido a que poseen un menor contenido de carbono.

Los aceros martensíticos pueden ser soldados en diferentes estados. En la soldadura de estos aceros se puede producir tensiones y por consiguiente grietas, si no se adoptan las precauciones convenientes.

En los austeníticos el mayor inconveniente que se presenta en la soldadura es la precipitación de carburos que pueden producirse en las zonas cercanas al cordón de soldadura, quedando sensibilizados a la corrosión intergranular.

#### **2.2 TIPOS DE SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

A pesar de presentar una buena soldabilidad y ser compatibles con una amplia gama de procesos de soldadura, están expuestos a problemas como precipitación de carburos, sensibilización a la corrosión, si no existe un buen control en el procedimiento y los parámetros de soldadura.

Aunque la serie 300 de los aceros inoxidable austeníticos se sueldan con más facilidad por su bajo contenido de carbono, existen diversos factores que deben considerarse para obtener soldaduras satisfactorias.

Los principales métodos de soldadura para los aceros inoxidable tal como especifica el código AISI /AWS D1.6, son:

- Soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido (SMAW).
- Soldadura por arco sumergido (SAW).
- Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo tubular (FCAW).
- Soldadura con electrodo de tungsteno bajo la protección de gas (GTAW).

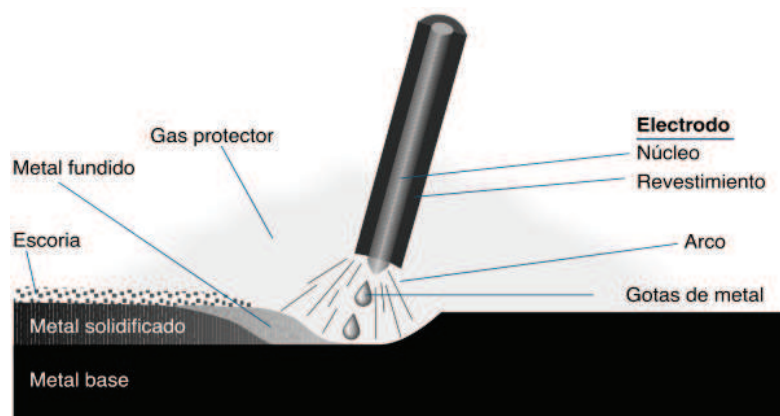
Siendo el proceso de soldadura GTAW que tiene mayor ventaja para el desempeño en trabajos con acero inoxidable.

### 2.2.1 SOLDADURA ELÉCTRICA CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW).

El proceso de soldadura con electrodo revestido es uno de los más utilizados por su facilidad, y su gran versatilidad en el proceso de unión de metales.

Este proceso utiliza principalmente para aleaciones ferrosas para unir estructuras de acero, en construcción naval y en general en trabajos de fabricación metálica.

A pesar de ser un proceso relativamente lento, debido a los cambios del electrodo y a tener que eliminar la escoria, aún sigue siendo una de las técnicas más flexibles y se utiliza con ventaja en zonas de difícil acceso.

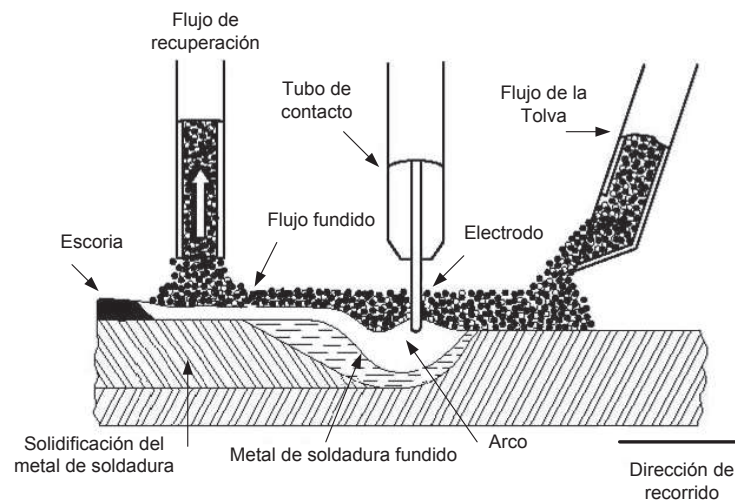


**Figura 2.1** Soldadura eléctrica con electrodo revestido (SMAW)<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> <http://soldadura.org/soldadura-2/soldadura-basica/soldadura-electrodo-revestido-mma-o-smaw/>

### 2.2.2 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW)

Es un proceso de soldadura por arco sumergido que usa un arco entre el electrodo y el charco de soldadura. El arco y el metal fundido se encuentran protegidos por una capa de fundente granular sobre el área de soldadura, en la cual no se aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar granúlos metálicos como se observa en la figura 2.2. La soldadura por arco sumergido es un proceso de producción versátil capaz de soldar con corriente hasta 2000 amperes de CA y CC.<sup>21</sup>



**Figura 2.2** Proceso de soldadura de arco sumergido<sup>22</sup>

El arco sumergido, principalmente se utiliza en instalaciones de soldadura que están totalmente automatizadas, aunque también puede ser utilizado para realizar soldaduras manuales.

Para aumentar la productividad es posible introducir técnicas utilizando varios electrodos. Dada su alta tasa de aportación, el procedimiento es apropiado para unir juntas rectas con buena preparación en posición horizontal.

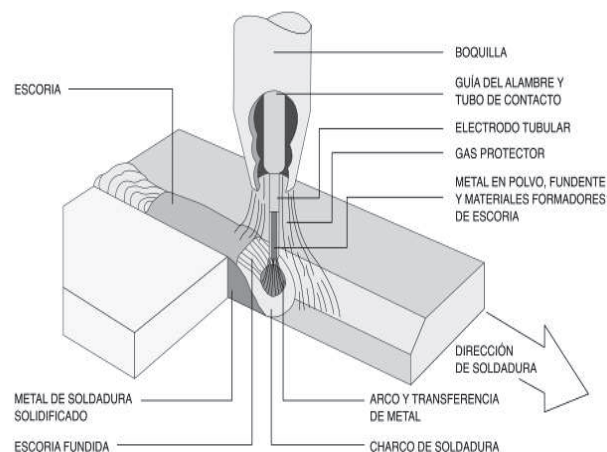
<sup>21</sup> <http://marcogutierrezsaw.blogspot.com/>

<sup>22</sup> HORWITZ, H.; (1976); "Soldadura Aplicaciones y Práctica; Alfaomega"; México; pág.110.

### 2.2.3 SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO BAJO PROTECCIÓN DE GAS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA DE ELECTRODO TUBULAR (FCAW).

La soldadura por arco con núcleo de fundente es un proceso de soldadura por arco que aprovecha el arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y el metal base. Este proceso emplea un fundente que va al interior del alambre conocido como tubular, sin embargo de igual forma puede ir con o sin ayuda de una protección externa gaseosa.

Este proceso se emplea para construir recipientes a presión, barcos, estructuras y líneas de tubería; para propósitos generales de fabricación, unir metales base diferentes, aplicar recubrimientos duros e inoxidable y para soldadura de puntos por arco<sup>23</sup>.



**Figura 2.3** Soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo tubular (FCAW).<sup>24</sup>

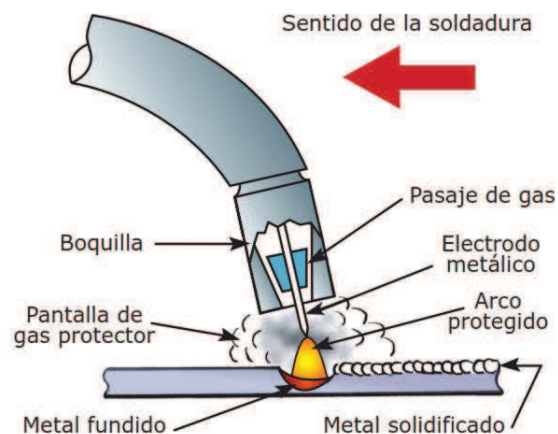
### 2.2.4 SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO BAJO PROTECCIÓN DE GAS CON ALIMENTACIÓN CONTINUA DE ELECTRODO SÓLIDO (GMAW).

Es un proceso de soldadura por arco que se establece entre un electrodo metálico continuo de aporte y el charco de soldadura de metal base. La protección se obtiene por completo de un gas suministrado externamente y no se aplica a presión. Este proceso también es conocido como MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas). En GMAW se emplea un alambre continuo, sólido y desnudo, que tiene las

<sup>23</sup> <http://es.scribd.com/doc/50005935/Libro-Inspector-de-Soldadura-AWS>

<sup>24</sup> <http://www.studyblue.com/notes/n/fcaw/deck/944200>

funciones de servir como electrodo y como metal de aporte, y al no haber revestimiento como en el caso del proceso SMAW ni fundente adicionado externamente como el proceso SAW, no se forma una capa de escoria, sino una película vítrea ligera. El metal depositado y los aleantes son suministrados completamente por el metal de aporte y al no haber agentes limpiadores ni fundentes, se requiere cuidados y limpieza adecuados para obtener soldaduras libres de poros y otras discontinuidades.<sup>25</sup>



**Figura 2.4** Soldadura Eléctrica Por Arco Bajo Protección De Gas Con Alimentación Continua De Electrodo Sólido (GMAW).<sup>26</sup>

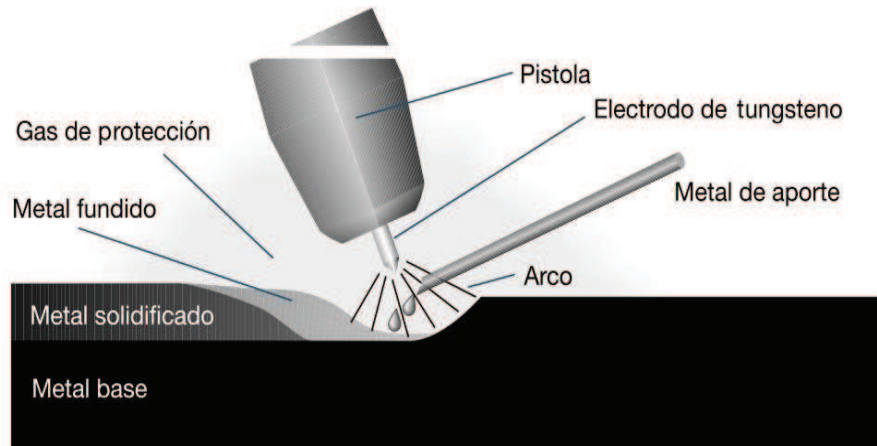
### 2.2.5 SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO CON PROTECCIÓN GASEOSA (GTAW).

La soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW) o también llamada TIG (Tungsten Inert Gas), es un proceso de soldadura que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura.

El arco, el electrodo y el área que rodea al baño de fusión es protegida de la atmósfera por un gas inerte y la adición de un metal de aporte (opcional) se realiza mediante la fusión de una varilla de aporte desde un lado del baño de fusión.

<sup>25</sup> <http://es.scribd.com/doc/50005935/Libro-Inspector-de-Soldadura-AWS>

<sup>26</sup> <http://es.scribd.com/doc/11520143/Manual-de-Soldadura-Elctrica-Mig-y-Tig>



**Figura 2.5** Soldadura por arco de tungsteno con protección gaseosa GTAW<sup>27</sup>.

### 2.2.5.1 Aplicaciones del proceso GTAW

El proceso GTAW se ha vuelto una herramienta indispensable en muchas industrias en virtud de la alta calidad de las soldaduras producidas y del bajo costo del equipo. Algunos de los componentes del proceso GTAW son: el equipo, los consumibles empleados, los procedimientos, las variables, sus aplicaciones y consideraciones de seguridad.

Los gases utilizados en el proceso GTAW son el Argón, Helio y la combinación de ambos, los cuales deben tener una alta pureza (normalmente de 99,9%). La función de estos es proteger la soldadura. El más usado es el argón ya que proporciona mejor protección y menor grado de presión, tienen influencia en la estabilidad, las características y comportamiento del arco, y por consiguiente en el resultado de la soldadura.

### 2.2.5.2 Material de aporte

El metal de aportación debe ser de la misma composición que el metal base tal que reúna las propiedades físicas y químicas adecuadas para realizar una buena soldadura. Los diámetros de las varilla de metal dependen del espesor de metal base y de la corriente para soldar. La alimentación del metal de aporte puede ser manual o automática.

<sup>27</sup> INDURA; (2010); "Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura"; Chile; pág. 29.

### **2.2.5.3 Descripción de proceso**

El proceso de soldadura, mostrado en la figura 2.5 utiliza un electrodo de tungsteno o una aleación de tungsteno no consumible, se alimenta de gas protector cuyo objetivo es desplazar el aire, para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera, el electrodo, el arco y el área que rodea al baño de fusión, están protegidos de la atmósfera por este gas inerte.

El arco eléctrico se origina por el paso de corriente a través del gas protector ionizado, el calor generado por el arco funde el metal base. Una vez establecido el arco y el baño de soldadura el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa metal de aporte se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

### **2.2.5.4 Características del proceso**

- Excelente calidad de la soldadura en casi todos los metales y aleaciones empleados por la industria.
- Prácticamente no se requiere ninguna limpieza posterior
- No hay metal de aporte que atraviese el arco, de modo que no se producen salpicaduras
- La soldadura es posible en todas las posiciones
- No se produce escoria que podría quedarse atrapada en la soldadura

### **2.2.5.5 Ventajas**

- Produce soldaduras de muy buena calidad.
- No produce escoria
- Permite un control de las variables de soldadura.
- Puede soldar en todas las posiciones.
- No produce salpicaduras
- el proceso puede ser automatizado, controlando mecánicamente la pistola y/o el metal de aporte.



### **2.2.5.6 Limitaciones del proceso GTAW**

- Las tasas de aportación son más bajas que las que pueden alcanzarse con procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.
- Es difícil proteger debidamente la zona de soldadura en lugares donde hay corriente de aire.
- Para secciones de más de 10mm (3/8pulg) de espesor, resulta menos económica que los procesos de soldadura por arco con electrodo consumible

### **2.2.5.7 Equipo del proceso GTAW consta de:**

- Fuente de poder, generador de corriente continua (DC) y/o alterna (AC). Los comandos de control propios del proceso GTAW se encuentran en un cabezal que puede estar incorporado o no a la fuente.
- Cilindro de gas de protección, se utiliza gases inertes como el argón y el helio o la combinación de ambos.
- La fuente se conecta a la torcha, a través de una manguera-cable, que lleva hasta la misma corriente eléctrica, el gas protector.
- El circuito se cierra a través del cable de masa, que conecta la fuente a la pieza a soldar.
- La fuente de energía es similar a la del proceso SMAW, pero debido a las características del proceso GTAW, deberá proporcionar una mayor precisión en el ajuste de la corriente eléctrica y permitir soldar con bajos valores de esta.

### **2.2.5.8 Electroodos**

Los electrodos de tungsteno son ideales para su uso como electrodo no consumible, son buenos y son resistentes a la oxidación (bajo condiciones normales). La función del electrodo de tungsteno específicamente es servir como una de las terminales eléctricas del arco que proporciona el calor necesario para soldar.

#### *2.2.5.8.1 Clasificación de los electrodos*

Los electrodos de tungsteno no consumibles se clasifican de acuerdo a su composición química. La Norma ANSI/AWS A5.12, establece los requisitos que deben cumplir los mismos.

Los electrodos no consumibles para el proceso GTAW se presentan a continuación.

- Tungsteno puro (EWP)
- Tungsteno con 1% de torio (EWTh-1)
- Tungsteno con 2% de torio (EWTh-2)
- Tungsteno con 0.25% de zirconio (EWZr)
- Tungsteno con 2% de cerio (EWC2-2)
- Tungsteno con 1% de lantano (EWLa-1)
- Aleaciones no especificadas o designadas (EWG)

Los diferentes tipos de electrodos mencionados se identifican por un código de color, el extremo de cada electrodo se marca con el color apropiado.

En la tabla 2.1 muestra la composición química y el sistema de clasificación por código de color que es ampliamente utilizado.

**Tabla 2.1** Código de color y elementos de aleación<sup>28</sup>

CLASIFICACIÓN AWS	COLOR	ELEMENTO ALEANTE	ÓXIDO ALEANTE	% EN PESO
EWP	Verde	--	---	-----
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO <sub>2</sub>	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO <sub>2</sub>	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ZrO <sub>2</sub>	2
EWZr-1	Marrón	Zirconio		0.25-0.50
EWG	Gris	No especificado	----	-----

Donde:

E: Electrodo

W: Tungsteno (Wolframio)

P: Denota el tungsteno puro sin elemento de aleación

G: Aleación que no se han establecido

La última letra o últimas letras se refieren a la aleación u óxido que se ha añadido al tungsteno.

<sup>28</sup> JEFFUS, Larry; (2005); "Manual de Soldadura GTAW"; España; pág. 25.

## **2.2.6 PRECALENTAMIENTO DE LA SOLDADURA**

El precalentamiento se realiza al metal base a temperatura relativamente baja antes de comenzar la soldadura, ya que este proceso reduce la velocidad de enfriamiento brusco en la zona soldada. El precalentamiento reduce la diferencia de temperaturas entre la zona soldada y el resto de la pieza. Como consecuencia, la evacuación de calor es más lenta y disminuye la tendencia a la formación de martensita en la zona de soldadura. Con el precalentamiento hay menos posibilidad de que se desarrollen zonas duras en las inmediaciones del cordón.

### **2.2.6.1 Precalentamiento en aceros inoxidable**

En el caso de los aceros inoxidable austeníticos (Serie 300), en general no se obtienen beneficios con el precalentamiento de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la corrosión intergranular, como consecuencia de la precipitación de carburos de Cromo en borde de grano. Además el precalentamiento aumenta el riesgo de fisuración en caliente y la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico.

## **2.3 SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS**

A continuación se considera únicamente la soldadura de los aceros austeníticos, para la serie de los 300 ya que este tipo de acero inoxidable es utilizado en este proyecto de titulación.

Estos aceros y todos los de su grupo pueden ser soldados con la mayoría de procesos de soldadura cumpliendo con los debidos parámetros.

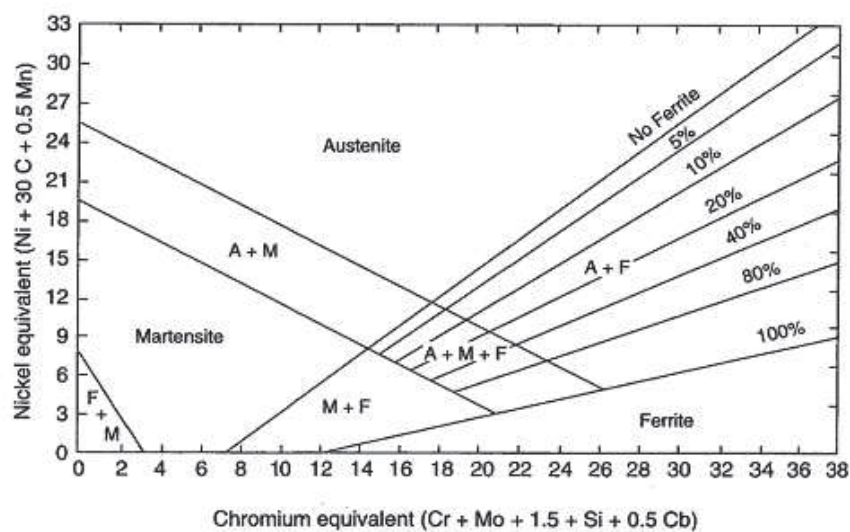
La soldadura en estos aceros puede producir modificaciones metalúrgicas que puede aumentar la susceptibilidad al ataque de la corrosión.

Estos tipos de aceros presentan un coeficiente de dilatación térmica que es aproximadamente mayor en un 50% y conductividad térmica menor que los aceros al carbono.

### 2.3.1 DIAGRAMAS DE CONSTITUCIÓN.

Los diagramas de constitución pueden predecir la microestructura que se presentan en la soldadura de los aceros inoxidable. Algunos de estos diagramas se basan en las composiciones químicas.

Anton Schaeffler correlacionando los conceptos de la química y microestructura, elaboró un diagrama en 1948, pero un año más tarde desarrolla la última versión que es el resultado de muchos ensayos en juntas soldadas.



**Figura 2.6** Diagrama de Schaeffler de 1949<sup>29</sup>

El diagrama permite incrementar la capacidad de predecir cuantitativamente la microestructura del metal soldado, especialmente en la región de dos fases austenita y ferrita delta. La fórmula de Schaeffler para el níquel y cromo equivalente está dada por el porcentaje en peso de los elementos de aleación, se muestran a continuación:

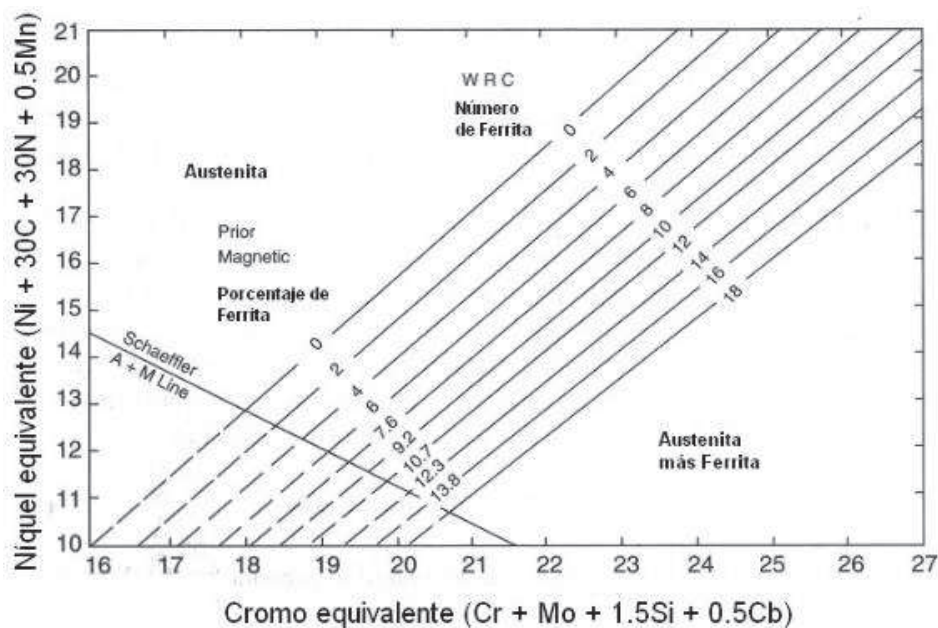
$$Ni_{eq} = Ni + 0,5 Mn + 30C \quad (2.1)$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1,8 Mn + 2,5Si + 2C \quad (2.2)$$

<sup>29</sup> (Lippol, J-Kotecki, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; pág. 216.

En 1973 DeLong y Pettit desarrollaron un diagrama mejorado el cual se muestra en la figura 2.7, donde se mejora la habilidad para predecir la ferrita delta e introducen la escala de “números de ferrita” (FN).

Este diagrama se enfoca en la zona donde se encuentran los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300, con el fin de definir con mayor precisión la cantidad de ferrita en la soldadura de los aceros inoxidable.

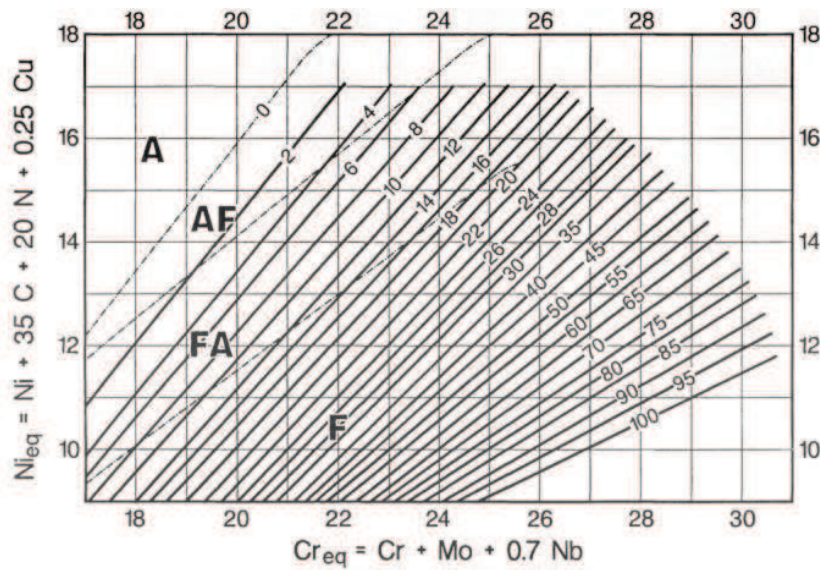


**Figura 2.7** Diagrama de De Long de 1973 con número de Ferrita<sup>30</sup>.

Generalmente los aceros austeníticos presentan una fase en particular (solo austenita) después del rolado y recocido. Pero en el caso de metales de aporte austeníticos, se necesita de un 3-8% de ferrita delta, para reducir la fisuración en caliente.

Siewert, en 1988, propuso un nuevo diagrama en la soldadura de los aceros inoxidable que contiene hasta un valor de 100 FN (número de ferrita), abarcando el rango completo de los aceros inoxidable austeníticos y aceros dúplex, y por lo tanto es el más confiable y preciso en la predicción. Actualmente se utiliza el diagrama WRC-1992, ilustrado en la figura 2.8.

<sup>30</sup> (Lippol, J-Kotecki, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; pág. 34.



**Figura 2.8** Diagrama WRC-92<sup>31</sup>

Este diagrama provee información sobre los límites de los distintos modos de solidificación (A, AF, FA, F).

Las fórmulas para calcular el cromo y níquel equivalente en el diagrama WRC-92 son las siguientes:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7Nb \quad (2.3)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (2.4)$$

## 2.3.2 METALURGIA DE LA SOLDADURA

La microestructura en la zona de fusión de los aceros inoxidable austeníticos es dependiendo de dos factores, el comportamiento de la solidificación y las transformaciones subsecuentes en estado sólido. Todos los aceros inoxidable solidifican sea en ferrita o austenita como fase primaria. Los aceros inoxidable austeníticos pueden solidificar como ferrita primaria o austenita primaria, dependiendo de la composición específica.

### 2.3.2.1 Evolución de la microestructura en la zona de fusión.

La microsegregación es un fenómeno que no puede evitarse durante la soldadura. Este fenómeno provoca cambios en las fases resultantes de la solidificación,

<sup>31</sup> [http://www.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1992\\_05\\_s171.pdf](http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1992_05_s171.pdf).

además de alterar sus composiciones. La microsegregación de los principales elementos (Cr, Ni) en los aceros inoxidable soldados, se han investigado, teniendo en cuenta los diferentes modos de solidificación se puede comentar que, en los aceros con modo de solidificación austenítico, las regiones interdendríticas están ligeramente enriquecidas en cromo y níquel.

Los 4 tipos solidificación y transformaciones en estado sólido posible para la soldadura de aceros inoxidable austeníticos se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Tipos de solidificación y transformaciones en estado sólido<sup>32</sup>

TIPO DE SOLIDIFICACIÓN	REACCIÓN	MICROESTRUCTURA
<b>A</b>	$L \rightarrow L+A \rightarrow A$	Completamente austenítica, estructura solidificada bien definida.
<b>AF</b>	$L \rightarrow L+A \rightarrow L+A+(A+F)_{eut} \rightarrow A+F_{eut}$	Islotes de Ferrita y bordes dendríticos
<b>FA</b>	$L \rightarrow L+F \rightarrow L+F+(A+F)_{per/eut} \rightarrow F+A$	Ferrita esquelética y ferrita alargada resulta de la transformación ferrita austenita
<b>F</b>	$L \rightarrow L+F \rightarrow F \rightarrow F+A$	Ferrita acicular o matriz ferrítica con granos de austenita en los límites de grano y con placas de Widmanstätten.

Estos modos de solidificación son controlados por la fase de proceso y por las transformaciones en el estado sólido, que están asociados a la composición de la aleación expresada por la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ .

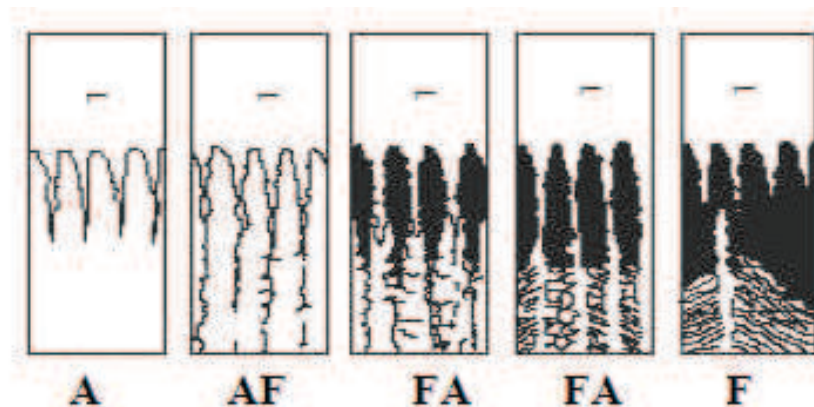
Los modos de solidificación A y AF son asociados con la solidificación de la austenita primaria, razón por la cual la austenita es la primera fase que se forma durante la solidificación. Los modos de solidificación FA y F solidifican en ferrita delta como fase primaria. Las solidificaciones y las consiguientes modificaciones microestructurales ocurren en los estados FA y F, debido a la inestabilidad de la ferrita a bajas temperaturas.

<sup>32</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 153.



Cuando los modos Ferrita-Austenita y Ferrita toman lugar, el núcleo dendrítico está significativamente enriquecido en cromo y carente de níquel. Los núcleos de ferrita en las zonas ricas en cromo y carentes de níquel se presentan como una fase fuera de equilibrio. La segregación del cromo a ferrita y del níquel a austenita juega un rol principal en estabilizar la ferrita en la subsiguiente transformación en estado sólido (posterior a la solidificación). La austenita crece dentro de la fase ferrita delta, provocando una disminución de la fracción en volumen de ferrita. A temperatura ambiente la estructura será austenítica con un pequeño volumen de ferrita delta.

El esquema de los modos de solidificación se ilustra en la figura 2.9



**Figura 2.9** Representación esquemática de los modos de solidificación en los aceros austeníticos<sup>33</sup>.

En los aceros austeníticos la cantidad de ferrita retenida puede variar desde pequeños porcentaje a valores tan altos como 15-20%. Esto se debe por dos factores: primero al modelo de segregación del cromo y níquel posterior a la solidificación y segundo, a las rápidas tasas de enfriamiento durante la soldadura.

La cantidad de ferrita de los aceros inoxidable es controlable con la composición del material de aporte y la velocidad de enfriamiento.<sup>34</sup>

En la figura 2.10 se observa los diferentes tipos de solidificación en los aceros inoxidable austeníticos.

<sup>33</sup> SHANKAR, V.; (2003); "Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel"; USA; pág. 362.

<sup>34</sup> <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox2.pdf>



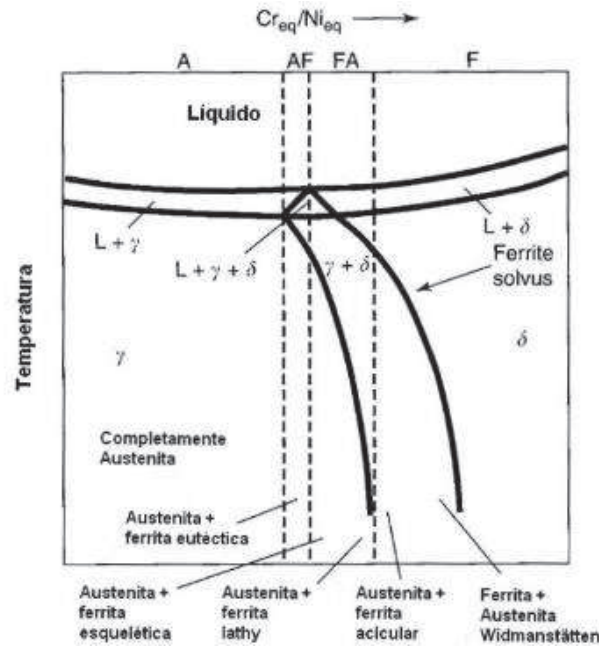


Figura 2.10 Tipos de solidificación en los aceros inoxidables austeníticos<sup>35</sup>.

### 2.3.2.2 Inter caras en el metal de soldadura de fase austenítica<sup>36</sup>.

Los límites son especialmente evidentes en metales de soldadura que solidifican con el tipo A o AF. En la figura 2.11 se muestra los diferentes tipos de límites.

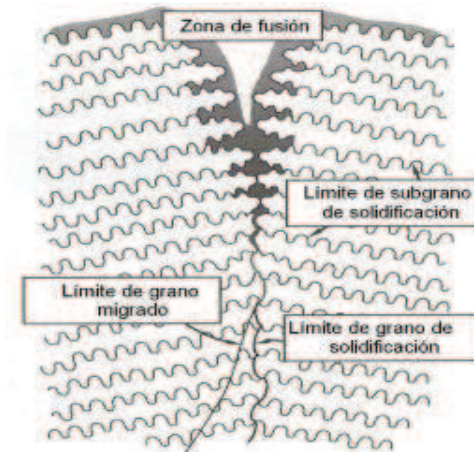


Figura 2.11 Esquema de los límites en el metal de soldadura que solidifica principalmente austenita (modo A y AF)<sup>37</sup>.

<sup>35</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 153.

<sup>36</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 162.

<sup>37</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 162.

### 2.3.2.3 Límites de solidificación de subgrano (SSGB)<sup>38</sup>

La solidificación de los subgranos representa la más fina estructura que pueda verse en microscopio óptico. Estos subgranos se presentan normalmente como células o dendritas. Estos límites son cristalográficamente caracterizados como límites de bajo ángulo.

### 2.3.2.4 Límites de solidificación de granos (SGB)<sup>39</sup>

Estos límites suelen ser llamados como límites de grano de alto ángulo. Los SGB también exhiben un componente composicional resultante de la redistribución de soluto durante la solidificación, estos límites suelen tener altas concentraciones de soluto e impurezas. Estas composiciones pueden llevar a la formación de películas de líquido de bajo punto de fusión a lo largo de los límites de solidificación de granos al final de la solidificación, lo que puede provocar la fisuración por la solidificación de la soldadura.

### 2.3.2.5 Límites de grano migrados (MGB)<sup>40</sup>

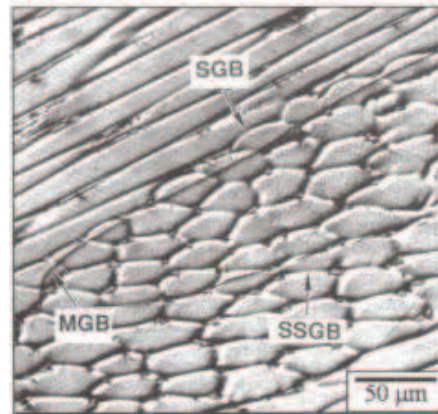
Los límites de solidificación de granos se forman al final de la solidificación tienen ambos componentes, un composicional y un cristalográfico. El componente composicional del límite de solidificación del grano puede migrar en algunas ocasiones. Este nuevo límite es llamado límite de grano migrado y lleva consigo la desorientación de alto ángulo.

En las estructuras completamente austeníticas prevalecen los límites de granos migrados. Cuando el proceso de solidificación fue por el método AF, se forma ferrita en los SSGB y en los SGB. Esta ferrita es efectiva en retener el componente cristalográfico de los SBG, por lo que previene que este migre de los SGB. En este caso, un MGB no se formará debido a que el límite cristalográfico de alto grado no podrá migrar.

La figura 2.12 muestra un ejemplo de estas intercaras de la microestructura de la zona de fusión en una soldadura de pase único en acero tipo 304L.

---

<sup>38, 40, 41</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 163.



**Figura 2.12** Microestructura de la zona de fusión tipo 304L<sup>41</sup>.

### 2.3.2.6 Zona afectada por el calor

La zona afectada por el calor (ZAC) en los aceros austeníticos depende de la composición y la microestructura del metal base. El material puede verse afectado durante el procedimiento de soldadura, esta zona se calienta y se enfría, en algunos casos puede volverse más frágil y agrietarse, en otros puede perder dureza.

Estos cambios pueden aportar positivamente en ciertos casos, mientras que en otros pueden deteriorar el material afectando a las propiedades iniciales del material.

Las siguientes reacciones metalúrgicas pueden ocurrir en la ZAC de las aleaciones austeníticas.

La zona afectada por el calor presenta un considerable crecimiento de grano siendo evidente que los granos más grandes, se encuentran cercanos a la zona de fusión del material base.

El control de las propiedades de la zona afectada por el calor puede ser realizado con la aplicación de tratamientos térmicos después de la soldadura, en otros se lo puede lograr con un cambio en la variables de soldadura.

<sup>41</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 164.

El tamaño de la zona afectada por el calor depende de una serie de factores tales como:

- Proceso de soldadura.
- Potencia efectiva.
- Espesor del material.
- Velocidad de enfriamiento.
- Entre otros.

#### *2.3.2.6.1 Crecimiento del grano*

El crecimiento de grano es usualmente restringido ya que la mayoría de los aceros inoxidable son soldados en su condición recocida o laminada en caliente, a menos que el calor introducido sea extremadamente alto. Cuando son trabajados en frío estos aceros recrystalizarán y posteriormente se dará crecimiento de grano los cuales suavizarán el material en la ZAC.

#### *2.3.2.6.2 Formación de ferrita*

La formación de ferrita se da a mayores relaciones de  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ . La formación de ferrita en la zona afectada por el calor restringirá el crecimiento de grano y también minimiza la susceptibilidad del ZAC. La transformación de la austenita a ferrita es relativamente lenta y el ciclo térmico en el ZAC es normalmente rápido por lo que el grado de formación de ferrita es bajo.

## **2.4 FENÓMENOS A CONSIDERAR EN LA SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES.<sup>42</sup>**

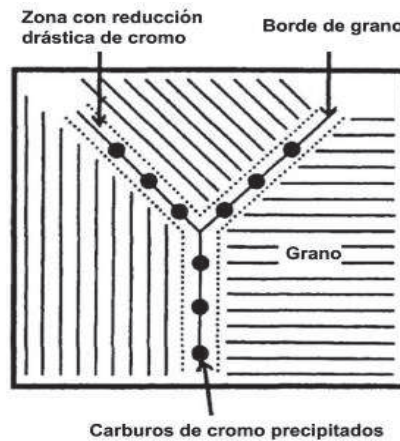
### **2.4.1 PRECIPITACIÓN DE CARBUROS**

Se produce en las zonas del metal base adyacente al cordón de soldadura. Cuando a los aceros inoxidable se les somete a una temperatura entre (450°C y 900°C) durante un tiempo suficiente, o cuando se les enfría lentamente en dicho intervalo de temperatura se origina en ellos una precipitación, fundamentalmente de carburos de hierro y cromo. Esta precipitación es más intensa en el intervalo de 600°C a 850°C. Generalmente estos carburos precipitan en los límites de grano,

---

<sup>42</sup> INDURA S.A.; (2010); "Sistemas y Materiales de Soldadura"; Chile; pág. 37.

disminuyendo la cohesión de los mismos, y por consiguiente su resistencia a la corrosión. El proceso de formación de precipitación de carburos se muestra en la figura 2.13.



**Figura 2.13** Precipitación de Carburos<sup>43</sup>.

Se dice entonces que la aleación está sensibilizada a la corrosión (se ha formado una red de carburos de cromo en los límites de grano). Luego en ciertos medios corrosivos, se puede producir un ataque intergranular de la aleación, cuya intensidad dependerá de la temperatura a la cual ha estado expuesta, del tiempo transcurrido, de la composición química y del tratamiento previo al cual ha sido sometida. La tendencia a la precipitación de carburos variará entonces con el tiempo de exposición a la temperatura crítica y con la composición de la aleación, especialmente la cantidad de carbono.

#### 2.4.2 FISURACIÓN EN CALIENTE

El agrietamiento en caliente corresponde a la formación de fisuras distribuidas en el material soldado durante la etapa de enfriamiento, cuando este aún se encuentra a alta temperatura (1000°C). Dichas fisuras frecuentemente no alcanzan la superficie, pero quedan en evidencia cuando se realiza un ensayo de doblado.

El origen de este fenómeno se atribuye a la fractura de película intergranular de bajo punto de fusión (1100°C a 1200°C) cuando esta queda atrapada en un acero austenítico que se enfría desde su temperatura de fusión (1420°C-1450°C). El menor punto de fusión de dicha película origina que esta quede atrapada en forma

<sup>43</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 202.

líquida en la estructura ya sólida y solidifique posteriormente generando tensiones de tracción en dicho proceso cuando hay restricciones a la contracción.

La presencia de impurezas de bajo punto de fusión como fósforo, azufre y silicio favorecen la ocurrencia de dicho fenómeno.

### **2.4.3 FORMACIÓN DE LA FASE SIGMA.**

La fase sigma es un componente inter metálico de hierro y cromo, su composición es alrededor de un 45%Cr-55%Fe. Una de las razones de la fase sigma en los aceros inoxidable es la presencia de ferrita. Si se les mantiene durante un largo periodo a temperaturas comprendidas entre los 550 y 900 °C, la ferrita se transforma en la Fase Sigma. La aparición de la fase sigma es perjudicial ya que disminuye la ductilidad, aumenta los riesgos de fisuración y disminuye la resistencia a la corrosión.

### **2.4.4 FISURACIÓN INDUCIDA POR HIDRÓGENO**

Los aceros inoxidable austeníticos no son susceptibles a la fisuración inducida por hidrógeno, (HC) debido a la alta plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras. Solo cuando están deformados plásticamente en frío o se unen con aceros ferríticos en juntas soldadas disímiles, pueden presentarse HIC. Al contrario, en los aceros inoxidable ferríticos, el hidrógeno reduce considerablemente la ductilidad de su estructura pudiendo originar un tipo de fractura frágil.

## CAPÍTULO 3

### CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

#### 3.1 CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable se caracterizan normalmente por su excelente resistencia a la corrosión. La soldadura puede reducir esa resistencia en ambientes totalmente agresivos. La presencia de cromo dentro de la composición del acero inoxidable está en la capacidad de soportar ambientes agresivos. La corrosión aumenta a elevadas temperaturas y se produce una pérdida del material en el tiempo.

Los tipos de corrosión más peligrosos para los aceros inoxidable son, en general, los de tipo localizado o selectivo, que, a pesar de llevar en solución sólo pequeñas cantidades de material, pueden poner fuera de servicio instalaciones enteras, provocando grietas, orificios, fisuras, etc.

##### 3.1.1 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN<sup>44</sup>

Los aceros inoxidable en general presentan varios tipos de corrosión, se hace énfasis en los aceros austeníticos ya que en este trabajo se trata con aceros de este grupo.

Aunque los aceros inoxidable austeníticos sean seleccionados debido a su alta resistencia a la corrosión, se deben tomar algunas precauciones en estas aleaciones. El acero austenítico se suelda sin temor que puedan sufrir corrosión y a temperatura ambiente puede considerarse inoxidable indefinida. Pero a elevadas temperaturas las tasas de corrosión aumentan y se produce pérdida de material en el tiempo.

A más de la corrosión general, los aceros inoxidable austeníticos sufren otros procesos de corrosión como corrosión intergranular: picaduras, corrosión bajo tensión, galvánica y microbiológica.

---

<sup>44</sup> LIPPOLD, J.; KOTECKI, D; (2005); "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; USA; pág. 208.

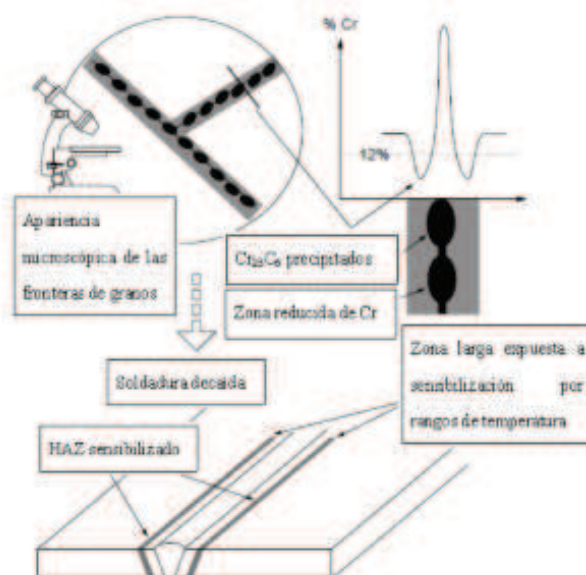
## 3.2 TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

### 3.2.1 CORROSION INTERGRANULAR

La corrosión intergranular es un ataque de corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación y son susceptibles los aceros austeníticos y ferríticos.

En el rango de temperaturas entre los 550 a 800°C se produce precipitación de carburos de cromo  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  en los límites de grano, lo que produce que estos aceros se sensibilicen, ya que se reduce la cantidad de cromo dentro del grano en la zona adyacente al límite de grano, debido a la difusión del cromo para formar el carburo de cromo, esta zona es susceptible a la corrosión.

Este problema se manifiesta a menudo en las zonas afectadas por el calor de la soldadura, donde el ciclo térmico de la soldadura produce una estructura sensible. A continuación se muestra un ejemplo de este problema, figura 3.1.

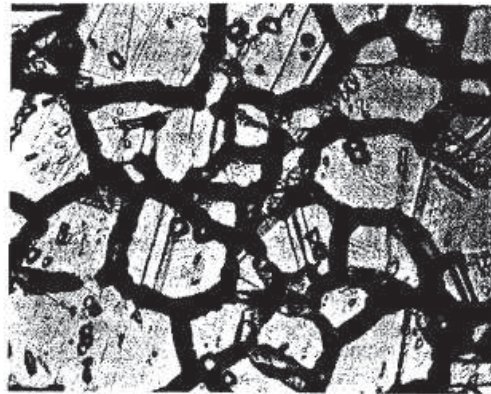


**Figura 3.1** Sensibilización del acero inoxidable en una Zona Afectada por el Calor (ZAC)<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> <http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v12n2/art07.pdf>



En el momento que la junta sea sometida a sus condiciones de servicio con atmósferas corrosivas, la zona con bajo contenido de cromo sufrirá corrosión, y si es el caso el proceso de corrosión es bastante severo incluso puede provocar que los granos sean desprendidos. La cantidad de carburos con respecto a la posición en el grano se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2** Corrosión intergranular en el borde de grano en ZAC del tipo 304 <sup>46</sup>

Los carburos de cromo formados en los límites de los cristales de austenita, empobrecen la zona adyacente de este elemento (cromo) quedando de esta forma expuesto a la corrosión, disminuyendo por lo tanto su resistencia a la corrosión.

### 3.2.1.1 Mecanismo de corrosión intergranular

La corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos ha sido de los temas más extensamente estudiados en la metalurgia de estos materiales.

El mecanismo de precipitación de estos carburos está constituido por un proceso de nucleación y crecimiento, típico de toda transformación que se produce por difusión.

El límite de solubilidad del carbono a 800°C está cerca del 0.03% en masa y se incrementa hasta 0.5% a 1100°C. Por tanto los tratamientos de solubilización entre 1050 y 1150 ° C favorecen la disolución en C en la austenita, mientras que un rápido enfriamiento desde este intervalo de temperatura ambiente dará como resultado una solución sólida de austenita sobresaturada en C, sin embargo enfriamientos

---

<sup>46</sup> <http://www.emagister.com/curso-replicas-metalograficas-2/donde-no-utilizar-esta-tecnica>

lentos o calentamientos entre 550°C y 800°C favorecen la segregación del C de la solución, originando la precipitación ricos en Cr.

### **3.2.1.2 Sensibilización a la corrosión intergranular en los aceros inoxidables austeníticos.**

#### *3.2.1.2.1 Límites de grano.*

Conocida como la zona intergranular o intercrystalina de transición con una particularidad estructura que contiene una amplia gama de átomos diferentes, combinada con la estructura típica cristalina, de una sustancia amorfa y la de un cierto tipo de superestructura. Representa una transición desde una distribución regular de átomos en la red hasta una distribución con muy distintas orientaciones, por lo que se la denomina “región de elevado desorden”. Esta estructura de transición es producto de fuertes deformaciones que disminuyen gradualmente hacia el interior del grano, por lo que las zonas de límite de grano son zonas con una elevada energía interfacial lo que favorece la segregación de elementos o la precipitación de fases metálicas o compuestos intermetálicos.

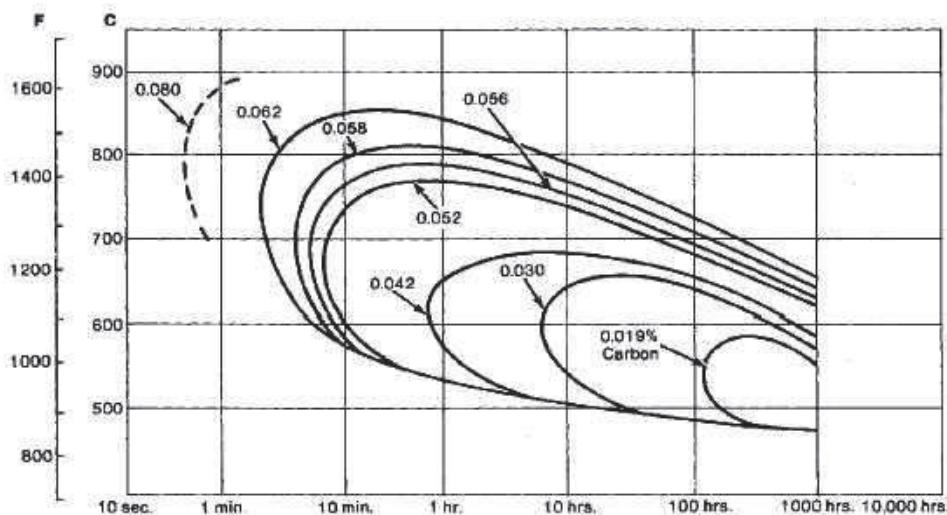
#### *3.2.1.2.2 Sensibilización a la corrosión intergranular*

La sensibilización se describe como el empobrecimiento en Cr, que sufren los aceros inoxidables cuando permanecen en un intervalo de temperatura medio, entre 723-1223°C, y se enfrían lentamente, produciéndose precipitación de carburos, pérdida de aleantes y segregación de impurezas en el límite de grano, creándose diferencias químicas y físicas entre este y el metal base, originando un empobrecimiento en Cr en el límite de grano, impidiendo de esta manera que se produzca el proceso de pasivación. El material que presenta este comportamiento se encuentra susceptible al ataque localizado de tipo intergranular al ser expuesto posteriormente a un medio que induce este tipo de corrosión. El grado de corrosión dependerá de la temperatura de sensibilización y del tiempo de mantenimiento a la misma, de la composición del acero y del medio corrosivo por lo que el material sensibilizado no siempre sufre ataque intergranular.

### 3.2.1.3 Factores que influyen en la corrosión intergranular

Para evidenciar los factores que afectan en la corrosión intergranular es indispensable no solo conocer la composición del material, sino también el estado del material (deformado en frío, en caliente, tratamientos térmicos, etc.) en síntesis es necesario conocer su historia metalúrgica.

Una característica importante de un acero austenítico inoxidable, es la susceptibilidad a un importante cambio microestructural, si se expone en el rango de temperaturas entre 550 – 850°C. La cinética de precipitación de los carburos depende de una serie de factores, los cuales se observan en la figura 3.3.



**Figura 3.3** Curvas de tiempo-temperatura precipitación para diferentes contenidos de carbono <sup>47</sup>

La temperatura y el tiempo de exposición es un factor, el otro es el contenido de carbono presente en el material. La Figura 3.3, ilustra las curvas de inicio de sensibilización tiempo-temperatura para un acero 304, con distintos contenidos de carbono. Las curvas para otros aceros austeníticos son similares. Se dice que una aleación está sensibilizada cuando a una temperatura y tiempo determinado, para un contenido de carbono, se encuentra a la derecha de la curva de porcentaje de carbono. Por ejemplo, se aprecia que la aleación con 0,062 %C podría sensibilizarse en un tiempo pequeño de 2 a 3 minutos a 700 °C.

<sup>47</sup> [http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1027/3/Capitulo\\_2.pdf](http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1027/3/Capitulo_2.pdf)

Además, para contenidos de carbono de 0,062%, 0,058%, 0,056%, 0,052%, estas aleaciones podrían quedar sensibilizadas antes de los diez minutos, para una temperatura entre los 600-800°C. Por otro lado, el tipo 304 con 0,03% de carbono podría mantenerse entre 595-650°C por 8 horas antes de sensibilizarse, asimismo con un contenido de 0,02%C, la aleación quedaría sensibilizada después de 100 horas, entre los 500-600°C. Esta es una de las razones por las que se prefieren los grados bajos en carbono como el 304L o 316L, debido a que la zona afectada por el calor no permanece el tiempo suficiente para sensibilizarse, asimismo estos aceros tienen una mayor resistencia a la corrosión intergranular.

Por lo tanto, es importante conocer el tiempo de mantenimiento mínimo en la zona de sensibilización a partir del cual el acero se sensibiliza, sobre todo en ensambles soldados destinados a emplearse en medios corrosivos húmedos.

#### *3.2.1.3.1 Influencia de la concentración de carbono*

El carbono C es el factor más significativo y determinante de la susceptibilidad a la corrosión intergranular en la mayor parte de los medios industriales. La precipitación de carburos se produce como consecuencia de la sobresaturación de carbono en aceros que excede a el límite de soldabilidad, por lo que la tendencia a formar carburos esta siempre favorecida. Esta formación precipita en el material en el siguiente orden: intercara entre la ferrita y la austenita, límite de grano austeníticos, maclas no coherentes, maclas coherentes para finalmente formarse en el interior de los granos.

Los carburos de Cr precipitan principalmente a partir de uno de los lados del grano. La principal consecuencia práctica de la precipitación del carburo mencionado es la degradación de la resistencia a la corrosión intergranular. El tiempo y la temperatura son dos variables críticas en la determinación de la susceptibilidad a la corrosión intergranular de un acero inoxidable.

#### *3.2.1.3.2 Influencia de la concentración de nitrógeno.*

El N puede disolverse a altas temperaturas y precipitar a bajas temperaturas como nitruro de ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ), de forma similar al C y también con efectos similares.

El N tiene un mayor coeficiente de difusión que el C, por lo que difunde más rápidamente hacia el límite de grano formándose nitruros, lo que retrasa la formación del carburo.

#### *3.2.1.3.3 Influencia del tamaño de grano.*

La sensibilización aumenta con el tamaño de grano, debido a que se tiene una mayor densidad de carburos de Cr por unidad de superficie de límite de grano, por lo que la tendencia a la corrosión intergranular es función del tamaño de grano con un menor tiempo de recocido que conduzca a obtener aceros con un tamaño de grano fino se elimina la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

#### *3.2.1.3.4 Influencia de la deformación en frío.*

Los aceros inoxidable austeníticos son a menudo parcial o totalmente transformados a martensita durante la deformación en frío. Si la composición de la martensita no difiere de la austenita, este cambio no afecta sustancialmente en la respuesta a la corrosión general, pero influye en el estado activo y obviamente en la corrosión intergranular. La influencia de la deformación en el comportamiento de los materiales frente a los fenómenos de corrosión, se diferencia dependiendo si la deformación se realiza antes o después del tratamiento térmico de sensibilización.

#### *3.2.1.3.5 Influencia del temple.*

Un temple a temperaturas menores de 273°K después de la sensibilización produce un aumento en la velocidad de corrosión intergranular, mientras que un sobreenfriamiento antes de la sensibilización produce el efecto contrario debido a que en un material previamente enfriado, la precipitación de los carburos se produce en una zona más amplia, por la formación de martensita.

#### **3.2.1.4 Protección contra la corrosión intergranular**

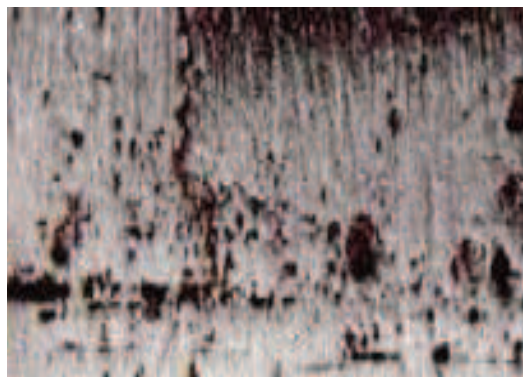
La corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos puede controlarse mediante los siguientes métodos:

- Utilizando un tratamiento térmico mediante una solución de alta temperatura después de la soldadura.

- Mediante el calentamiento de la unión soldada en un intervalo de 500 a 800 °C seguido del templado con agua, los carburos de cromo pueden redisolverse y volver a la solución sólida.
- Agregar un elemento que se combine con el carbón en el acero de manera que no puedan formarse los carburos de cromo. En las aleaciones tipo 347 y 321 se utilizan, respectivamente, pequeñas cantidades de colombio y titanio. Estos elementos tienen mayor afinidad para el carbón que para el cromo. Se dice que las aleaciones con trazas de Ti o Cb están en la condición estabilizada.
- Disminuir el contenido de carbón a casi 0.013% en peso o menos de modo que no puedan precipitarse cantidades importantes de carburos de cromo. El acero inoxidable tipo 304L, por ejemplo, tiene su carbono en un nivel tan bajo como el señalado.

### 3.2.2 CORROSIÓN POR PICADURA

Este tipo de corrosión se caracteriza por la formación de agujeros en el metal. Estos agujeros pueden ser pequeños y difíciles de detectar visualmente debido a la corrosión general. La corrosión por picadura suele producirse en materiales de elevada resistencia a la corrosión y ocurre cuando se rompe la capa pasiva y cuando existe un ataque localizado.



**Figura 3.4** Corrosión por picadura.<sup>48</sup>

La relación entre el área de la zona catódica (capa pasiva) y el área de la zona anódica (picadura) es muy alta, creando condiciones de flujo de corriente anódica

<sup>48</sup> [http://www.indura.cl/\\_file/file\\_1774\\_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf](http://www.indura.cl/_file/file_1774_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf)

de elevada densidad y aumentando las velocidades de disolución de la aleación en el interior de la picadura. Por ello la corrosión por picadura se considera una de las formas de corrosión más destructiva ya que en casos extremos puede causar la perforación del material durante su uso.

### 3.2.3 CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

La corrosión bajo tensión es otro tipo de corrosión y se reconoce por la presencia de fracturas de la estructura metálica. En la superficie del metal se producen fisuras muy pequeñas de forma ramificada tal como se observa en la figura 3.5. La cantidad de ramificaciones tiene directa relación con la concentración del medio corrosivo y el nivel de tensiones del metal.



**Figura 3.5** Corrosión Bajo tensión.<sup>49</sup>

Cuando en los aceros quedan tensiones residuales o se crean éstas por efecto de esfuerzos exteriores, tales como esfuerzos de tracción, deformaciones en frío, soldaduras, y estos se someten a un ambiente corrosivo, especialmente clorados, pueden producirse pequeñas fisuras, dando origen a la corrosión por tensiones.

### 3.2.4 CORROSIÓN POR FATIGA<sup>50</sup>

Los esfuerzos aplicados o tensiones residuales combinados con agentes ligeramente corrosivos sobre cualquier metal o aleación pueden agrietar o quebrar al mismo debido a la corrosión por fatiga. Las soluciones de cloruro son muy perjudiciales al provocar el agrietamiento de los aceros inoxidables.

<sup>49</sup> [http://www.indura.cl/\\_file/file\\_1774\\_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf](http://www.indura.cl/_file/file_1774_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf)

<sup>50</sup> <http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>



El mecanismo causante de la corrosión por fatiga es principalmente transgranular y puede ir acompañado de ataques de picado. Es más fácil que el agrietamiento se produzca en soluciones calientes que en las frías.

Tensiones fuertes y débiles en el mismo elemento producen una condición que fácilmente puede conducir a la corrosión por fatiga en presencia de cloruros.

### **3.2.5 CORROSION GALVÁNICA<sup>51</sup>**

La corrosión galvánica (acción localizada) puede darse por la unión de dos metales disimiles sumergidos en una solución que actúa como electrolito. La corriente fluye desde el metal anódico al catódico (más noble) a través del electrolito, lo que provoca la corrosión del menos noble. Este tipo de corrosión es relevante cuando la unión se produce entre aceros inoxidables con aceros al carbono o de baja aleación.

### **3.2.6 CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA<sup>52</sup>**

La corrosión microbiológica ocurre en medios acuosos donde las bacterias aeróbicas atacan al material, lo cual provoca que presente picaduras u hoyos. La presencia de residuos biológicos y productos corrosivos presentes en agua fresca o de mar causan dichas picaduras.

Los aceros inoxidables austeníticos son particularmente susceptibles a este tipo de corrosión si existe la presencia de las dos fases austenítica y ferrita (dúplex) en la microestructura.

## **3.3 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN.**

A los aceros inoxidables se les realiza diferentes estudios y análisis para determinar sus características y propiedades para establecer si son apropiados o no para una determinada aplicación específica.

La resistencia a la corrosión es una de las propiedades más importantes de estos aceros, es por ello que se debe realizar una evaluación exhaustiva a esta propiedad ya que en el campo práctico se pueden presentar daños de menor o mayor

---

<sup>51</sup> <http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>.

<sup>52</sup> LIPPOLD, J. y OTECKI, D. 2005, pg. 208.



magnitud causados por acciones químicas bajo condiciones frecuentes incontrolables.

Para explicar las causas de los daños, son apropiados los ensayos de corrosión bajo condiciones conocidas y reproducibles, con una elección bien determinada e intencionalmente limitada de los factores del proceso de corrosión.

### **3.3.1 ENSAYOS DE CORROSIÓN<sup>53</sup>**

En el campo práctico del uso de los materiales se presentan daños de menor o mayor importancia causados por acciones químicas, bajo condiciones frecuentemente incontrolables, de diferente naturaleza y gran cantidad de aspectos.

El tiempo empleado desde que se introduce las probetas o alguna pieza hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal o del recubrimiento sometido a dicho ataque.

En general los ensayos de corrosión pueden ser de planta o campo y en laboratorio

#### **3.3.1.1 Ensayos de planta o campo**

Los ensayos de planta o campo se diseñaron para aquellas piezas que están sometidos directamente a las condiciones de ataque que se encuentran naturalmente en la práctica, los ensayos de planta o campo son:

- Ensayos en la atmósfera.
- Ensayos en el agua o en el mar.
- Ensayos en el suelo.

#### **3.3.1.2 Pruebas en laboratorio.**

Las pruebas de corrosión en laboratorio se realizan para entender el comportamiento de los metales y aleaciones en diferentes ambientes corrosivos a través de la simulación de ataque regulable y logrado artificialmente. Dentro de las pruebas en laboratorio se realizan los siguientes ensayos de:

---

<sup>53</sup> CORDOVA, CALVO, JARAMILLO; (2007); "Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión." pág. 30-35.

- Ensayo de niebla
- Ensayo de inmersión alterna
- Ensayo de inmersión continua
- Métodos electroquímico

Las pruebas en laboratorio se basan en la pérdida de masa de los materiales relacionando el daño causado por la corrosión en los materiales. Las pruebas de inmersión total en este tipo de evaluación emplea el método de pérdida de masa, el cual consiste en exponer piezas en ambientes corrosivos, para determinar la masa perdida del material después de las pruebas. Este método se considera el método más rápido y satisfactorio para hacer selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación.

En los ensayos de corrosión es necesario que los resultados se relacionen con el comportamiento o desempeño en condiciones de servicio. Para lograrlo se han desarrollado durante muchos años una gran variedad de procedimientos para estudiar el comportamiento de los materiales frente a la corrosión, siendo uno de los más difundidos el de niebla salina.

### **3.3.2 LA NORMA ASTM B 117.**

La norma a más de establecer los parámetros de diseño del equipo de cámara salina, ha sido generalmente aceptada como el método estándar para el ensayo de corrosión y es todavía extensamente empleado para probar acabados con pintura y otros tipos de recubrimientos protectores, etc. Es importante mencionar que la norma especifica algunos materiales cuyos resultados obtenidos por este método no son adecuados.

#### **3.3.2.1 Resumen de la norma ASTM B 117 “Salt Spray Test”.**

En la norma ASTM B 117 se describen las partes, procedimientos y condiciones requeridos para crear y mantener un ambiente de niebla salina, y asemeja ambientes con determinadas características.

Esta norma no especifica el tipo de espécimen de prueba o periodos de exposición a ser usados para un producto determinado, ni la interpretación que se le daría a los resultados.

A continuación se presenta los parámetros más importantes que detalla la norma y que se debe tener en cuenta para la utilización del equipo:

- El equipo requerido para la exposición de la niebla salina consiste en una cámara salina, un suministro de aire comprimido apropiadamente acondicionado, uno o varios inyectores que atomizan la solución salina, apoyos para los especímenes de prueba, elementos calefactores para la cámara y medio necesarios para el control de la temperatura.
- No se permite que el condensado forzado en la superficie de la tapa de la cámara caiga sobre los especímenes de prueba.
- Toda el agua usada en la práctica deberá cumplir con la norma ASTM D1193.
- Los especímenes serán colocados o apoyados entre 15° y 30°, paralela al flujo de la niebla en la cámara.
- Los especímenes no deben estar en contacto uno con otros.
- Cada espécimen debe colocarse de manera que permita la libre circulación de la niebla sobre todos los demás especímenes
- La solución salina de un espécimen no deben gotear sobre los demás especímenes.
- La temperatura en la zona de exposición de la cámara de niebla salina debe mantenerse en 35°C.
- Se deben colocar al menos dos colectores de niebla salina dentro de la zona de exposición, estos deben estar en la proximidad de los especímenes de prueba, el uno cercano a cualquier inyector y el otro más apartado de los inyectores.
- La cámara de niebla salina debe estar sellada durante la prueba para que no se afecten otros equipos y muebles con la niebla.
- El flujo de aire debe permanecer constante durante toda la prueba, a excepción de interrupciones cortas causadas por la colocación de una nueva solución.

### **3.3.3 ENSAYO DE NIEBLA SALINA**

El objetivo de este ensayo de corrosión acelerada es duplicar en el laboratorio el comportamiento frente a la corrosión en campo de un producto. La información que provee este ensayo es de vital importancia ya que ayuda al desarrollo de nuevos productos.

Para que un ensayo de corrosión acelerada sea útil, un requerimiento principal es que los resultados se relacionen con el comportamiento o desempeño en condiciones de servicio.

El tiempo transcurrido desde que se introduce la pieza hasta el ataque de la corrosión, proporciona una medida de capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque.

### 3.3.4 CÁMARA DE NIEBLA SALINA

Las cámaras de niebla salina están diseñadas para realizar la simulación de los efectos de la corrosión que presentan los metales a la intemperie. A través de la atomización de una solución salina característica, a condiciones controladas de temperatura, presión y flujo de esta solución, conllevando a que el metal a experimente una corrosión acelerada.

El método estándar para el ensayo de corrosión esta dada por la norma ASTM B 117, de ahí las consideraciones para la utilización de este equipo. En la figura 3.6 se muestra la cámara salina utilizada en el este proyecto.



**Figura 3.6** Cámara salina. (Q-FOG-CCT-600, EPN, 2013)<sup>54</sup>

Esta cámara permite que el aire comprimido y la solución almacenada en el reservorio, sean enviados simultáneamente hacia la boquilla del pulverizador. La bomba permite el transporte de la solución hacia el pulverizador, el aire comprimido pasa previamente por la torre de burbujeo, satura el aire comprimido para luego

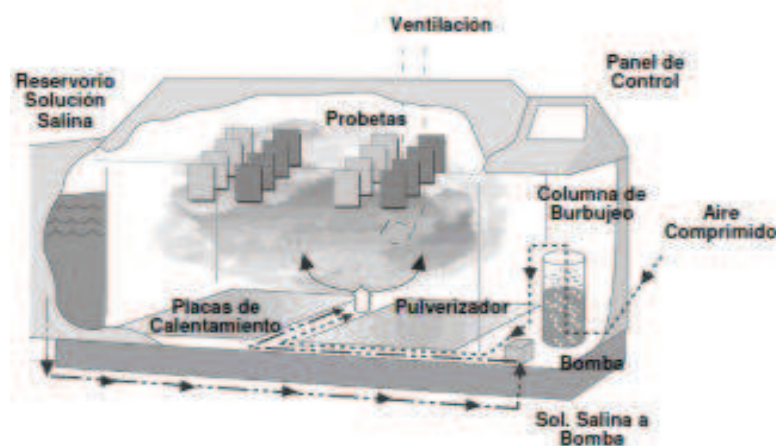
---

<sup>54</sup> Q-LAB CORPORATION, 2006.

ser enviado hacia el pulverizador. En el pulverizador se unen las dos corrientes indicadas para formar una fina llovizna conocida como niebla salina.

La temperatura de la cámara se mantiene a la temperatura programada por medio de las placas de calentamiento.

El proceso que cumple el equipo de niebla salina se observa en la siguiente figura.



**Figura 3.7** Partes del equipo de cámara salina Q-FOG-CCT-600<sup>55</sup>

#### 3.3.4.1 Características principales del equipo de niebla salina

El esquema básico de la cámara salina se representa en la figura 3.7 y a continuación se describe los componentes comúnmente encontrados.

#### 3.3.4.2 Panel de control

Esta es la sección más importante del equipo ya que en esta se selecciona todas las operaciones como instrucciones, ajustes, controles y sistema de seguridad, que son controlados por un microprocesador digital y se muestra sobre el panel la información de las variables configuraciones.

Dentro de las variables que se pueden manejar en los instrumentos de control pueden ser:

- Humedad
- Ph
- Temperatura
- Presión

<sup>55</sup> Q-LAB CORPORATION, 2006.

- Caudal
- Nivel de solución salina
- Tiempo

#### **3.3.4.3 Tanque de solución**

Su función es contener la solución con que se genera la niebla y su capacidad de almacenamiento depende del tiempo máximo que durará el ensayo. La solución que se debe introducir en el tanque es la que se especifica en la norma ASTM B117 y esta debe durar para un trabajo mínimo de 24 horas.

#### **3.3.4.4 Torre de dispersión central**

La solución es filtrada en la base de la torre para evitar los sólidos contenidos y luego es llevada por un conducto a un pulverizador (spray) por un flujo de aire ajustable.

#### **3.3.4.5 Saturador (humidificador)**

El objetivo de este dispositivo es incrementar la humedad del aire comprimido a valores de hasta el 100% y subir la temperatura. Esto se logra haciendo pasar el aire limpio, previamente filtrado a través de un volumen de agua caliente (burbujeo) quitando humedad y calor a la misma.

#### **3.3.4.6 Atomizador o pulverizador**

En este atomizador la energía cinética conferida a un gas, en este caso aire se utiliza para la desintegración de la solución salina. La atomización se lleva a cabo alimentando el líquido junto con una corriente de aire a alta velocidad dentro de un espacio circular llamado cámara de mezclado. El flujo en dos fases que se forman cuando los dos fluidos involucrados en la atomización interactúan dentro de la cámara de mezclado y se conduce hacia el orificio de descarga, una porción del líquido se desintegra en pequeñas gotas dentro de la cámara de mezclado y se conduce hacia el orificio de descarga en forma de una delgada lámina de líquido, la cual se rompe en pequeñas partes que posteriormente forman gotas de varios tamaños creando la niebla.

#### **3.3.4.7 Soporte de probetas o portamuestras**

Los soportes de las probetas se encuentran ubicados en la parte inferior interna de la cámara. De tal forma que permita el contacto homogéneo con la niebla salina y que estén separados a una distancia prudente situados a un ángulo de 30 grados con respecto a la vertical, esto hace que las mismas estén separadas entre sí, como lo establece la norma ASTM B117.

### **3.3.5 PROCEDIMIENTOS A LAS PROBETAS ANTES DE SER INTRODUCIDAS EN LA CAMARA SALINA.**

Para continuar con el estudio a la que se refiere el presente proyecto de titulación es necesario, a más de utilizar la norma estándar que considera ciertos parámetros y especificaciones para la utilización del equipo de cámara salina, considerar también la norma internacional ASTM G1 (2011), ya que en esta especifica el procedimiento para la preparación, limpieza y evaluación de la prueba de corrosión para probetas.

#### **3.3.5.1 Duración de la prueba**

La duración deber ser establecida antes de iniciar la prueba y deberá estar influenciada por la naturaleza del mismo y su finalidad. De forma general, se recomienda que la duración de la prueba sea prolongada para obtener datos más reales que lo que se pudiera obtener en pruebas cortas.

#### **3.3.5.2 Número de probetas**

En alguno casos el número de probetas no se limita en este tipo de pruebas, solo dependerá del tamaño que posee cada elemento a ser evaluado.

#### **3.3.5.3 Preparación de la superficie de las probetas**

Cuando se realizan las pruebas de corrosión lo más aconsejable para este ensayo es que las probetas se asemejen a la de los materiales empleados en los procesos o servicios, sin embargo, debido a que existen diferentes condiciones en los metales empleados en ingeniería es grande, incluso dentro de un mismo tipo, no sería practico evaluar cada una de dichas condiciones.

El tamaño y la forma de estas probetas varían de acuerdo a la finalidad de la prueba, la naturaleza y el equipo que se utilice. Las probetas deben estar libres de rayaduras y sobretodo libre de impurezas causadas por la soldadura.

#### **3.3.5.4 Marcado de las probetas para la identificación.**

La manera más rápida y que no causa confusión al momento de introducir y retirarlos del ensayo, es marcar a las probetas con letras o números con un marcador de golpe, también es importante tener un historial de la posición relativa entre ellos.



**Figura 3.8** Marcador de golpe

#### **3.3.5.5 Mapeo**

El mapeo de las probetas es necesario ya que ayuda a identificar cuál de las probetas debe ser retirada, luego de cumplir con el intervalo previsto.

#### **3.3.6 PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA DE LAS PROBETAS DESPUÉS DE SER SACADAS DE LA CAMARA SALINA.**

Al culminar el ensayo de cámara salina las probetas se lavan ligeramente con agua pura corriente, con un cepillo de cerdas plásticas muy finas y con ligeros movimientos, se va retirando de la superficie de las mismas la sal depositada. A continuación se secan y se examina visualmente su aspecto minuciosamente.

La limpieza posterior a las pruebas es uno de los procedimientos de gran importancia en el desarrollo experimental de las pruebas de corrosión. El procedimiento de esta limpieza varía dependiendo el tipo de metal y el grado de adherencia de los productos de corrosión. A continuación se presenta los tipos existentes de limpieza que especifica en la norma ASTM G1.



- Limpieza mecánica
- Limpieza química
- Limpieza electrolítica.

Independientemente del tipo de tratamiento que se utilice en la limpieza es necesario determinar el efecto de pérdida en la superficie del metal. Para ello antes de la prueba de corrosión y después de la limpieza posterior a esta es necesario determinar la masa de las probetas con el fin de establecer la pérdida de masa.

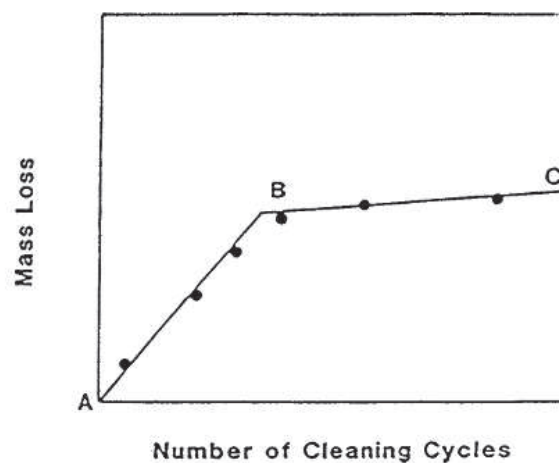
### 3.3.6.1 Limpieza mecánica

Esta limpieza remueve los productos de corrosión mediante procedimientos mecánicos. Entre dichos procedimientos se encuentra, el cepillado, desbaste, el choque mecánico y el ultrasonido. El método más empleado en este tipo de limpieza es cepillar la superficie de las probetas con abrasivo.

### 3.3.6.2 Limpieza química

La limpieza química conlleva la eliminación del material de la superficie de las probetas por disolución con algún agente químico destinado para el tipo de material, en la norma Internacional ASTM G1 se muestra las diferentes soluciones de limpieza químicas para los aceros inoxidables austeníticos.

El procedimiento de limpieza debe repetirse varias veces. La pérdida de masa debe determinarse después de cada limpieza pesando la muestra.



**Figura 3.9** Números de Ciclos de limpieza vs masa perdida<sup>56</sup>.

<sup>56</sup> ASTM G1; (2011); pág. 3

La pérdida de masa debe ser representada como una función del número de ciclos de limpieza como se muestra en la figura 3.9. Se obtienen dos líneas AB y BC, donde la línea de AB representa la pérdida de la corrosión de la probeta debido al proceso de limpieza química que se realice mientras que la línea BC corresponde a la pérdida de masa del material debido a la corrosión.

### 3.3.6.3 Limpieza electrolítica

Este tipo de limpieza consiste en formar con la probeta una celda de corrosión electrolítica, a determinadas condiciones de temperaturas e intensidad de corriente, y en presencia de inhibidores orgánicos dependiendo el tipo de material que se esté estudiando.

### 3.3.7 VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Teniendo en cuenta que la corrosión es un proceso de deterioro progresivo de los aceros expuestos a diferentes ambientes y como consecuencia de esto presenta una disminución paulatina de material, entonces podemos decir que la velocidad de corrosión presenta el grado de corrosión lo cual es proporcional a la pérdida de material, o dicho en otras palabras, a la pérdida de masa del mismo por unidad de tiempo.

Como paso final de la prueba de corrosión por niebla salina, es necesario calcular la velocidad de corrosión, a continuación se presenta un ejemplo cálculo de la misma con la ecuación.

$$\text{Velocidad de corrosión}(L) = ((K * W)) / ((A * T * D)) \quad (3.1)$$

Donde:

K= Constante cinética

T= tiempo de exposición en horas.

A= Área en cm<sup>2</sup>

W= Masa perdida en gramos

D= Densidad en g/cm<sup>3</sup>

La masa perdida por corrosión se calcula de la siguiente manera:

$$W = w_1 - w_2 \quad (3.2)$$

Dónde:

w1: Masa inicial

w2: Masa después de la exposición y la remoción los productos de corrosión.

Existe diferentes unidades que son usadas para expresar la velocidad de corrosión con valores apropiados de K (ver anexo 2).

El área del cordón de soldadura y la masa perdida son las variables considerables que permite evaluar la velocidad de corrosión.

### **3.4 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN<sup>57</sup>**

Fractura, desgaste y corrosión son los tres mecanismos promotores de defectos superficiales que justifica la agrupación de todos aquellos modos y procesos que tratan de modificar las superficies para proveerlas de aquellas características que permitan adecuarlas a las solicitaciones del servicio. Entre ellos se presentan los siguientes:

Modificación de la composición química superficial de deposición a alta temperatura, para mejorar la tenacidad y dureza del acero.

Recubrimientos de las piezas por deposición de metales en estado líquido: lo que da lugar a productos galvanizados, estañados, aluminados, etc., de singular importancia para la protección contra la corrosión.

Recubrimientos superficiales por deposición en baños electrolíticos.

Recubrimientos cerámicos y metálicos por proyección térmica a través de técnicas de aplicación eléctrica, con lo que se mejora tanto la resistencia a la corrosión como al desgaste.

---

<sup>57</sup> GALVAN V., SORIANO M, ESLON C. ;(2005); "Materiales Metálicos"; Valencia; pág. 67.

Recubrimientos orgánico como recocado como pinturas, destinados a mejorar la resistencia a la corrosión bien de las superficies de los materiales en general y también de otros recubrimientos ya mencionados.

#### **3.4.1 GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE**

Un modo para aprovechar la alta resistencia mecánica de materiales como el acero, en ambientes corrosivos, es su protección superficial con otros metales con comportamiento más resistentes a esos ambientes corrosivos. Uno de los métodos económicos y de gran aplicación industrial es la inmersión del acero en un baño líquido de un metal protector, el tiempo necesario para permitir el proceso de difusión y, por lo tanto, la adherencia de la capa de recubrimiento que queda después de su solidificación. Los metales o aleaciones de recubrimiento deben cumplir los requisitos siguientes; pasivación en el ambiente corrosivo y posibilidad para formar aleación con el acero mediante la difusión a las temperaturas del proceso.

#### **3.4.2 GALVANIZADO O CINCADO ELECTROLÍTICO**

Esta técnica consiste en depositar sobre la pieza una capa de zinc mediante corriente continua a partir de una solución salina que contiene zinc. El proceso se utiliza para proteger a piezas más pequeñas, cuando requieren un acabado más uniforme que proporciona el galvanizado.

#### **3.4.3 RECUBRIMIENTOS CON POLVO DE ZINC**

En esta clase de recubrimiento se emplea un polvo de zinc muy fino que se halla en suspensión de aglutinante orgánico o inorgánico. Las técnicas de aplicación de este tipo de revestimiento son similares a las empleadas para la aplicación de laca. Las capas de polvo de zinc presentan una conductividad limitada, ya que el zinc no se encuentra por toda la superficie en contacto con el material base y tampoco forma en las zonas limítrofes aleaciones de zinc-hierro.

#### **3.4.4 PROTECCIÓN ANTICORROSIVA CATÓDICA**

En la protección anticorrosiva catódica se impide la corrosión haciendo del metal a proteger un cátodo. Esto se consigue disponiendo un elemento de cortocircuito compuesto del material de la pieza a proteger y de una aleación metálica menos noble; estos dos materiales presentan una conexión conductora metálica. Al sumergir La protección anticorrosiva catódica se utiliza, por ejemplo, como protección exterior de la parte sumergida de barcos, pasarelas, muelles, rompeolas, estacas, puertas de esclusas, boyas y equipos submarinos para, por ejemplo, la extracción de petróleo y gas natural.

#### **3.4.5 RESVESTIMIENTO CON PINTURA**

Los recubrimientos de pintura tratan de impedir, o al menos de retardar el proceso corrosivo. Se trata de pinturas que contienen un elevado porcentaje de zinc metálico, se componen de aglutinantes o resinas, disolventes y pigmentos, además de otros compuestos que se incorporan en función de los efectos deseados. La pintura debe ser compatible con el metal, y requiere una preparación previa a la superficie para eliminar los óxidos e impurezas.

## **CAPÍTULO 4**

### **METODO EXPERIMENTAL**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL.**

El objetivo del proceso experimental es recopilar los pasos y procedimientos realizados para la elaboración del proyecto. Este capítulo inicia con la selección del proceso de soldadura, el material de aporte apto para la soldadura de los aceros AISI 304L y 316L. Posteriormente se procede a la calificación del proceso de soldadura el mismo que se evaluará con la norma ANSI/AWS D1.6, realizando los ensayos solicitados por la misma.

Una vez terminada la calificación del proceso de soldadura, se detallará el ensayo que es clave esencial del proyecto de titulación, el ensayo de niebla salina en el cual se describirá los pasos fundamentales para llegar a la culminación del mismo, la finalidad de este ensayo es obtener datos importantes como el registro de la masa antes y después del ensayo, la pérdida de masa y el área del cordón de soldadura se utilizan finalmente para calcular la velocidad de corrosión en la soldadura de cada una de las probetas.

##### **4.1.1 BASE DE PRECALIFICACIÓN DE METAL**

Este código cubre los requisitos de soldadura que son aplicables a las soldaduras de acero inoxidable. La característica más notable de D1.6 es el porcentaje de procedimientos de soldadura precalificados.

##### **4.1.2 SELECCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA**

A pesar de que el acero inoxidable puede ser soldado con la mayoría de procesos, el que presenta mejores características por su facilidad y su excelente presentación en la soldadura es el proceso GTAW (Soldadura con electrodo bajo la protección de gas), el cual se utilizará para la soldadura de las láminas de acero inoxidable AISI 304L y AISI 316L, en el presente proyecto de titulación.

### **4.1.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE**

Luego de seleccionar el proceso de soldadura es necesario describir los tipos de varillas necesarias para el proceso a utilizar, ya que estas dependen del tipo de material y del espesor.

#### **4.1.3.1 Varillas de aporte**

Las varilla de aporte de aporte deberán ser compatibles con el metal base y proporcionar depósitos resistentes al agrietamiento que sean iguales o mejores que el metal base en términos de resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y tenacidad. Por ello las varillas tomadas en cuenta son la ER 308L y ER 304L de la casa comercial INDURA cuyas características se detallan a continuación.

#### **Varilla ER308L**

**Casa Comercial:** INDURA

#### **Descripción.**

Varilla con bajo contenido de carbono para soldar acero inoxidable con proceso TIG. El bajo contenido de carbono en metal de aporte, disminuye la posibilidad de precipitación de carburos e incrementa la resistencia a la corrosión intergranular sin el uso de estabilizadores tales como columbio y titanio.

#### **Usos**

El alambre 308L es similar al 308, excepto por su contenido extra bajo en carbono (menor a 0.03%). Es utilizado para soldar aceros AISI tipos 304L y 308L que pueden ser utilizados en un amplio rango de condiciones corrosivas, sin necesidad de hacer tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.

#### **Aplicaciones Típicas**

- Aplicaciones típicas: aceros inoxidables 304, 304L, 308, 308L, 321, 347, 348.
- Equipos químicos y petroquímicos
- Equipos de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos
- Estanques que contengan productos químicos corrosivos.

**Posiciones de Soldadura:**

- Plano
- Vertical
- Horizontal
- Sobrecabeza

**Tipo de corriente:** CCEN

**Composición química de la varilla**

**Tabla 4.1** Composición química de la varilla ANSI/AWS ER 308L

<b>ELEMENTO</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>C</b>	0.02%
<b>Si</b>	0.038%
<b>S</b>	0.01%
<b>Ni</b>	9.80%
<b>Mn</b>	1.90%
<b>P</b>	0.02%
<b>Cr</b>	19.80%
<b>Mo</b>	0.19%

**Propiedades mecánicas**

- Resistencia a la tracción 570 MPa
- Elongación (L=4d) 44%
- Energía absorbida 90J a 0°C

**Varilla ER 316L**

**Casa Comercial:** INDURA

**Descripción**

Varilla de bajo contenido de carbono para proceso TIG. Formulada para cumplir con los requisitos de los aceros inoxidable que utilizan procesos de soldadura con gas inerte. El bajo porcentaje de carbono en el metal depositado reduce la posibilidad de precipitación de carburos incrementando la resistencia a la corrosión intergranular.



## Usos

Para aceros de tipo 316L, 316, 318 y aleaciones similares con contenido extra bajo de carbono. El contenido de 0.04% de carbono máximo en el metal depositado, evita la formación y precipitación de carburos. Brinda excelente protección contra la corrosión intergranular. Para aplicaciones resistentes a la corrosión cuando hay posibilidades de picadura (ataque por ácido). No es necesario tratamiento térmico posterior.

## Aplicaciones Típicas

- Soldadura de aceros inoxidables que contienen 16-21%Cr, 10-15%Ni, 0-3% Mo.
- Soldadura de aceros inoxidables 316, 316L, 317, 317L, 316Ti, 318.
- Industria alimenticia
- Turbinas

## Posiciones de Soldadura:

- Plana
- Horizontal
- Vertical
- Sobrecabeza

**Tipo de corriente:** CCEN

## Composición química

**Tabla 4.2** Composición química de la varilla ANSI/AWS ER 316L

ELEMENTO	PORCENTAJE
C	0.02%
Si	0.038%
S	0.008%
Ni	11.1%
Mn	1.69%
P	0.030%
Cr	18.1%
Mo	2.1%

## Propiedades mecánicas

- Resistencia a la tracción 570 MPa
- Elongación (L=4d) 44%
- Energía absorbida 90J a 0°C

### 4.1.4 APLICACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE COMPOSICIÓN

#### 4.1.4.1 Diagrama Schaeffler

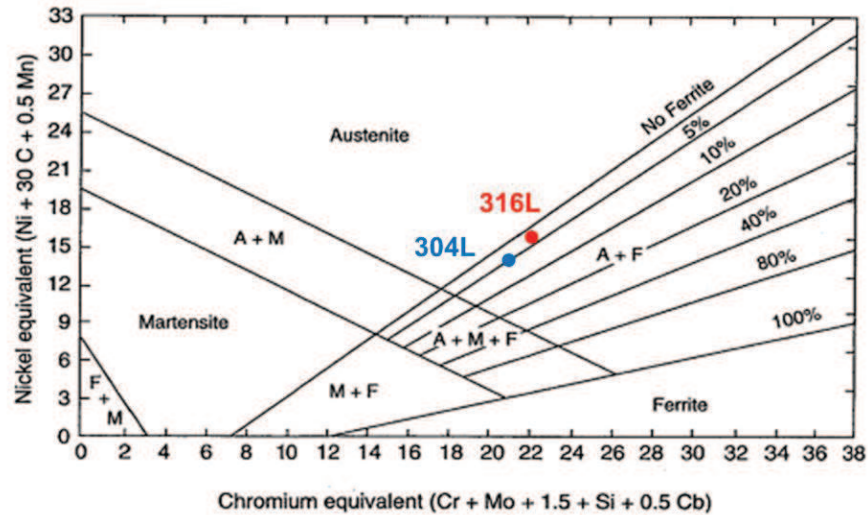
Según lo tratado anteriormente, el diagrama de Schaeffler permite predecir la solidificación del metal soldado en función a sus aleantes químicos, además del contenido de ferrita de acuerdo a su composición. Para representar los valores del material base en el diagrama es necesario calcular el Cromo y Níquel equivalente con las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente, los valores calculados se muestra en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama de Schaeffler.

		<b>304L</b>	<b>316L</b>
<b>Creq</b>	Max.	21,14	22,14
	Min.	19,14	19,14
<b>Nieq</b>	Max.	13,9	15,9
	Min.	9,9	11,9

##### 4.1.4.1.1 Diagrama de Schaeffler para el material base

En la figura 4.1 se observa que los aceros solidifican posiblemente en el modo AF, donde la austenita solidifica primero y la ferrita está presente en la microestructura como ferrita de tipo intercelular, la morfología de este tipo de solidificación se caracteriza por ser celular dendrítico. En este modo no se produce agrietamiento.



**Figura 4.1** Ubicación de los aceros tipos 304L y 316L en el diagrama de Schaeffler según cromo y níquel equivalente calculados en la tabla 4.3 para el material base.

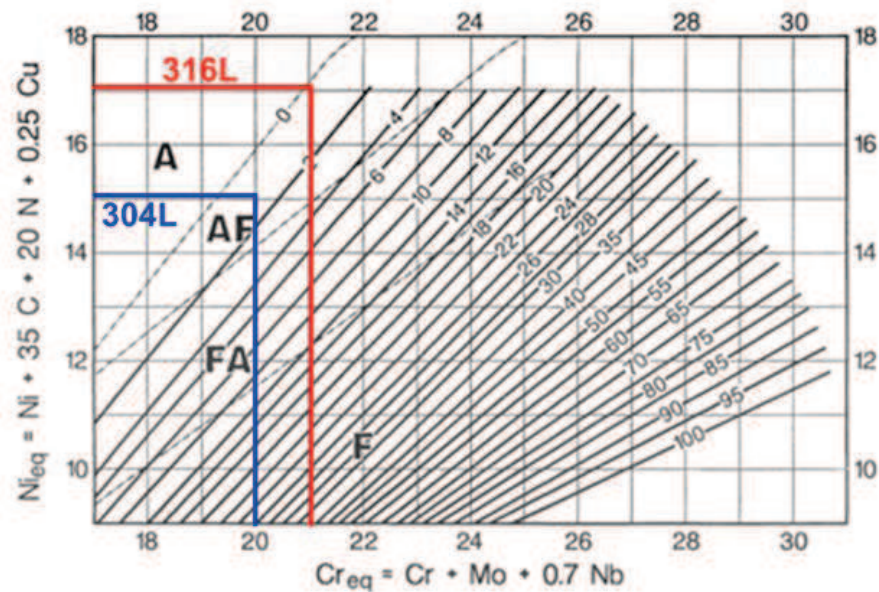
#### 4.1.4.2 Diagrama de WRC

Para el material base se procede a colocar los datos especificados en las tablas 1.5 (304L) y 1.7 (316L) para calcular el níquel y cromo equivalente, los valores obtenidos se colocan en el diagrama WRC tal como se muestra en la figura 4.2, donde se obtiene el número de ferrita y los tipos posibles de solidificación, para ello se calcula con las ecuaciones 2.3 y 2.4. Los valores de cromo y níquel se muestran en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama WRC.

		304L	316L
<b>Creq</b>	Max.	20	21
	Min.	18	18
<b>Nieq</b>	Max.	15,05	17,05
	Min.	9,05	11,05

#### 4.1.4.2.1 Diagrama WRC para el material base



**Figura 4.2** Posibles modos de solidificación para los aceros 304L y 316L

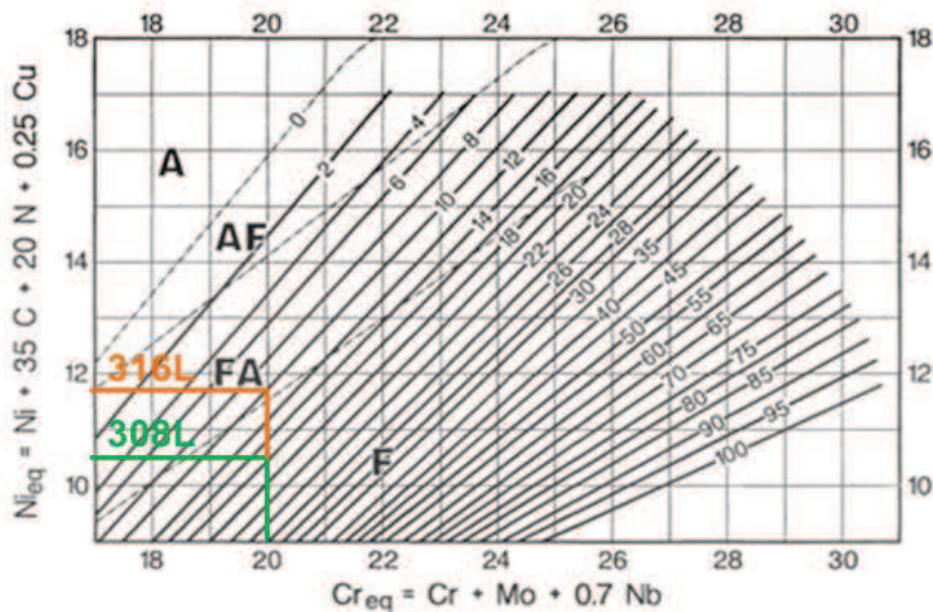
Se coloca los valores máximos y mínimos de los valores ya mencionados para los tipos de acero. Donde se observa que probablemente los tipos de solidificación son AF, FA y F, para los aceros utilizados AISI 304L y 316L.

#### 4.1.4.2.2 Material de aporte

**Tabla 4.5** Valores de Cromo y Níquel Equivalente Diagrama WRC.

	316L	308L
<b>Creq</b>	20,02	19,99
<b>Nieq</b>	11,8	10,5

En el diagrama WRC se procede a colocar los valores de  $Cr_{eq}$  y  $Ni_{eq}$  del material de aporte como se observa en la figura 4.3.



**Figura 4.3** Diagrama WRC para las varillas consumibles ER 308L y ER316L.

Las varillas utilizadas en el proceso de soldadura presentan un modo de solidificación F para la varilla 308L y FA para la varilla 316L.

#### 4.1.5 PREPARACIÓN DE LAS PLACAS.

Una vez cortadas las placas según lo especifica la norma AWS D1.6, se limpian las mismas y se preparan las juntas con una amoladora para que las caras se encuentren lo más paralelas posible. A continuación se procede a verificar las variables y parámetros en el WPS (ver ANEXO 1), antes de empezar la soldadura.

#### 4.1.6 PRECALENTAMIENTO DE LAS PLACAS

Como parte del estudio es necesario someter a un precalentamiento a las placas para observar sus diferentes comportamientos y analizar las propiedades de la juntas ante un ensayo de corrosión.

Una vez que las placas se encontraban listas, se introdujeron al horno las seleccionadas para su precalentamiento. El horno utilizado se muestra en la figura 4.4., el mismo que posee un sistema Scada para su control automático.



**Figura 4.4** Horno de resistencias, marca Linberd

Especificaciones del horno

- Marca: LINDERBERG
- Rango de Temperatura: 20-1200°C
- Dimensiones de la cámara de calentamiento: 320x320x420 mm
- Entrada: Voltaje 220V
- Potencia: 4400 W

Las placas fueron calentadas a una velocidad de 5°C por minuto hasta llegar a 650°C. Luego del precalentamiento realizada a las placas de procede a soldar.

#### **4.1.7 SOLDADURA DE LAS PLACAS.**

Una vez efectuada el precalentamiento de las placas se procede a colocar las placas en posición para la soldadura del material como se ve en la figura 4.5, en este proceso fue necesario colocar el equipo de soldadura muy cerca del horno para que no se produzca un enfriamiento brusco.



**Figura 4.5** Soldadura de las placas



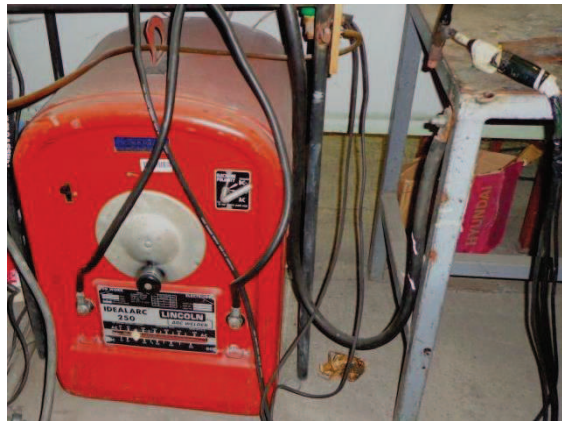
Una vez obtenida la soldadura se deja enfriar las placas a temperatura ambiente. Ya enfriadas se procedea a limpiar y cortar las placas ajustándose a los requerimientos y dimensiones especificadas en la norma utilizada.

Como menciona la norma, los requisitos para la calificación del WPS es necesario dividir las placas y realizar los ensayos de doblado de cara, doblado de raíz, tensión y la macrografía. Para el estudio que justifica el presente proyecto se seleccionan las probetas para cada condición establecida, con precalentamiento y sin precalentamiento.

#### 4.1.7.1 Equipo de soldadura.

La siguiente figura muestra el equipo para soldaduras GTAW, los cuales básicamente consta de:

- Unidad de alta frecuencia
- Pistola
- Fuente de poder
- Suministro de gas de protección
- Suministro agua de enfriamiento (opcional)



**Figura 4.6** Equipo GTAW.

#### 4.1.8 REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO AISI/AWS D1.6

Para la elaboración del presente trabajo es necesario el código internacional que establece los procedimientos y requisitos mínimos que debe cumplir la junta soldada.

A continuación en la tabla 4.6, se presenta los requisitos y ensayos que deben cumplir las probetas.

**Tabla 4.6** Tabla requerimientos de la norma AWS D1.6<sup>58</sup>

ESPESOR (T) [mm]	Rango de espesor calificado [mm]		MACROGRAFIA	ENSAYOS			
	Min	Max		TENSIÓN	DOBLADO LATERAL	DOBLADO DE CARA	DOBLADO DE RAIZ
2 a 10	2	2T	3	2	-	2	2
10 a 20	5	2T	3	2	4 (ver nota)	2 (ver nota)	2 (ver nota)
MAYORES A 20	5	SIN LÍMITE	3	2	4	-	-

**Nota:** Cuatro doblados laterales, o, dos doblados de raíz y dos doblados de cara

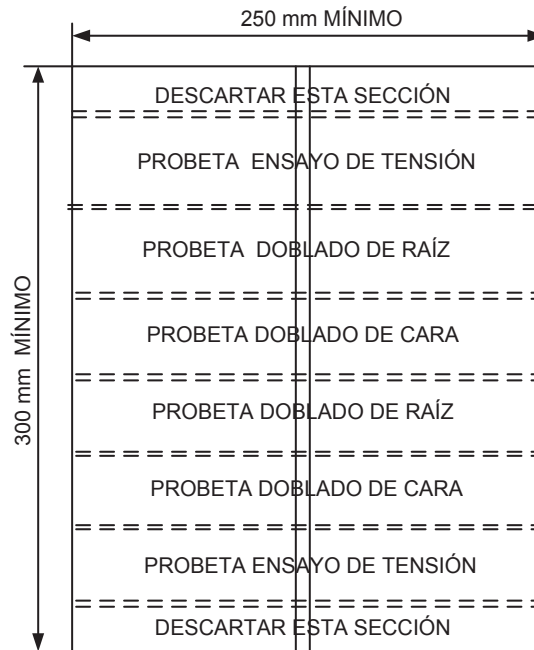
En la tabla anterior se identifica los ensayos a realizar para el espesor seleccionado en el presente proyecto.

##### 4.1.8.1 Tamaño de las probetas

Para la obtención de probetas, el cordón de soldadura debe tener una longitud específica que permite realizar la cantidad de ensayos necesarios, en la figura 4.7 se muestran las dimensiones que debe tener el espécimen de soldadura para poder realizar la calificación de manera correcta.

<sup>58</sup> ANSI/AWS D1.6:1999; "Structural Welding Code – Stainless Steel". pág. 74





**Figura 4.7** Tamaño de probeta seleccionada para realizar las pruebas<sup>59</sup>.

Para las condiciones expuestas anteriormente se debe cortar el número de probetas

#### 4.1.9 CRITERIO DE ACEPTACIÓN SEGÚN LA NORMA AWS D1.6

##### 4.1.9.1 Inspección visual

- La soldadura debe estar libre de fisuras
- Todos los cráteres deben ser llenados hasta la sección transversal completa de la soldadura.
- Las mordeduras no deben exceder de 1mm y el refuerzo del cordón no debe exceder los 3 mm.
- Para la penetración completa de la junta, sin placa de refuerzo, la raíz de la soldadura debe ser inspeccionada, y no deberá tener evidencia de fisuras, fusión incompleta o inadecuada penetración.
- El sobrespesor de la raíz (melt through) no debe exceder 3mm.

<sup>59</sup> ANSI/AWS D1.6:1999; "Structural Welding Code – Stainless Steel". Pág. 75.

#### **4.1.9.2 Doblado de Raíz /Doblado de Cara.**

En este ensayo la superficie convexa de las probetas dobladas deben ser examinadas visualmente en busca de discontinuidades en la superficie. Para su respectiva aceptación es necesario que cumpla con las siguientes características:

- 3mm medidos en cualquier dirección en la superficie.
- La suma de todas las discontinuidades sumadas entre 1mm y 3mm no deben exceder los 10mm en total.

#### **4.1.9.3 Ensayo de tensión**

Se utiliza para determinar la resistencia a la tracción de la soldadura. Antes de empezar con este ensayo se debe tomar las dimensiones de espesor y ancho de la sección reducida de la probeta.

Para su aceptación es necesario que cumpla con los siguientes criterios:

- La resistencia a la tracción no debe ser menor al límite inferior especificado en la tensión del material base.
- Cuando se utiliza un metal de aporte con una resistencia a la tracción menor que el material base, la resistencia a la tracción obtenido no debe ser menor que la especificada para el tipo de metal de aporte.

#### **4.1.9.4 Macrografías**

Las probetas de soldadura deben ser terminadas adecuadamente, para realizar este procedimiento, es necesario que la probeta sea desbastada utilizando lijas sobre el disco giratorio de la pulidora.

Esto se realiza para que se pueda determinar la extensión de la zona de fusión y cualquier discontinuidad.

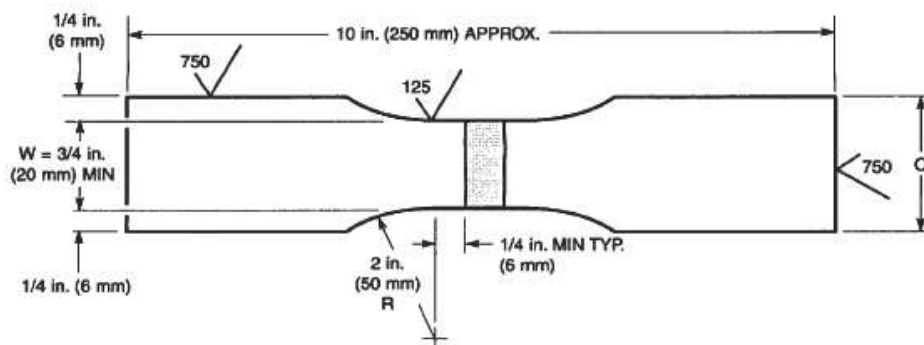
#### **4.1.9.5 Micrografías**

Las micrografías se realizan luego de que las probetas hayan experimentado el análisis macrográfico. La micrografía que se evalúa a las probetas para dar a conocer la microestructura obtenida en el cordón de soldadura, zona afectada por el calor y en la microestructura del metal base.

Las probetas son pulidas en la pulidora de paño en suspensión de agua con el fin de remover los defectos dejados por el desbaste, luego se realiza el ataque químico de la superficie soldada utilizando Marble. A continuación se coloca la probeta en el microscopio metalográfico, con un aumento de 100X y 500X para determinar la microestructura obtenida en el cordón y en el metal base.

#### 4.1.10 ENSAYO DE TENSIÓN

Para el ensayo de tracción según el requerimiento de la norma utilizada, a la probeta de debe realizar primero el rayado para luego proceder al corte como muestra la figura 4.8.



**Figura 4.8** Dimensiones de probeta para Ensayo de Tensión<sup>60</sup>.

Una vez verificadas las dimensiones de las probetas se procede a colocar en el equipo para realizar el ensayo de tensión.

Se realizó el ensayo a 8 probetas, tomando en cuenta que las mismas fueron soldadas a diferentes temperaturas, el número de probetas expuestas al ensayo de tensión y los resultados se enlistan a continuación:

<sup>60</sup> ANSI/AWS D1.6:1999; "Structural Welding Code – Stainless Steel"; pág. 84.

**Tabla 4.7** Números de Probetas para el ensayo de Tensión.

TEMPERATURA	MATERIAL	N° DE PLACAS ENSAYADAS
<b>CON PRECALENTAMIENTO</b>	AISI 304L	2
	AISIS 316L	2
<b>SIN PRECALENTAMIENTO</b>	AISI 304L	2
	AISIS 316L	2

**Figura 4.9** Ensayo de Tracción

En las siguientes figuras se muestra las curvas de esfuerzo vs. Porcentaje de deformación de las probetas ensayadas.

#### 4.1.10.1 Resultados del ensayo de tracción

##### 4.1.10.1.1 Probetas AISI 304L con Precalementamiento

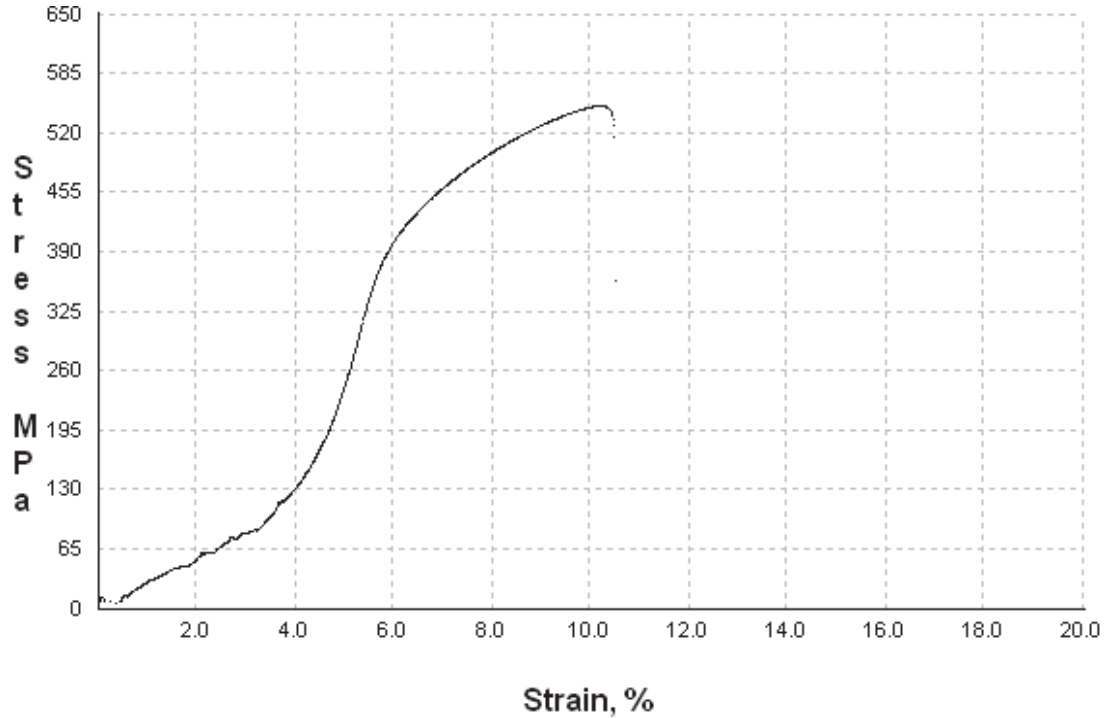
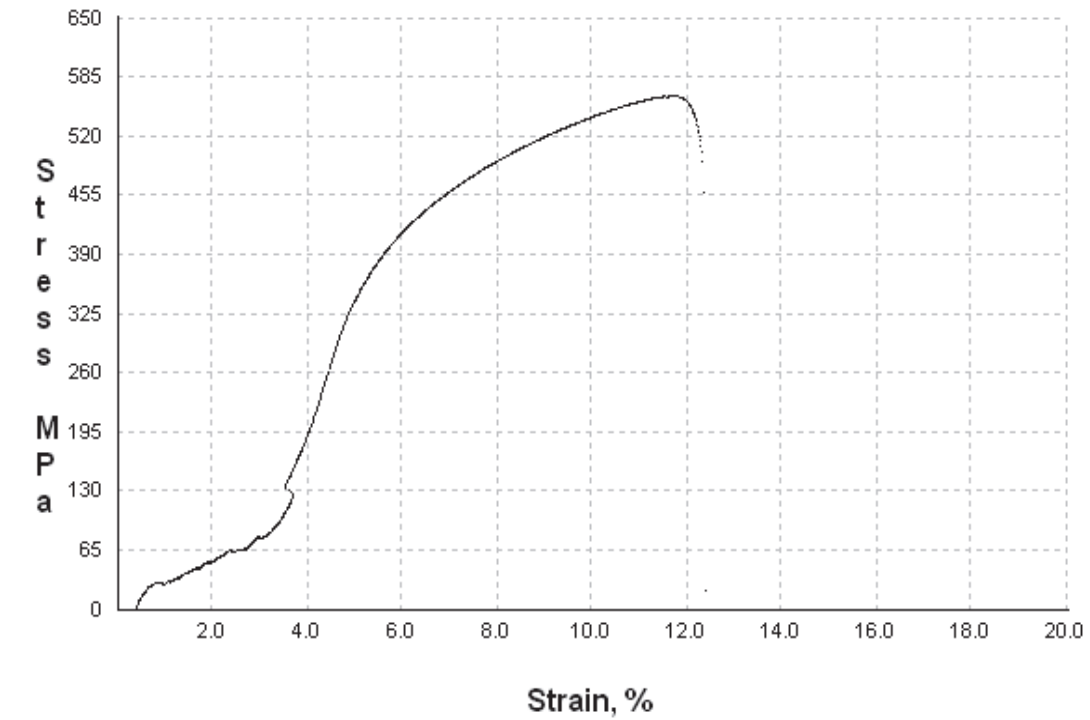


Figura 4.10 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación-AISI 304L

#### 4.1.10.1.2 Probeta AISI 304L sin Pre calentamiento

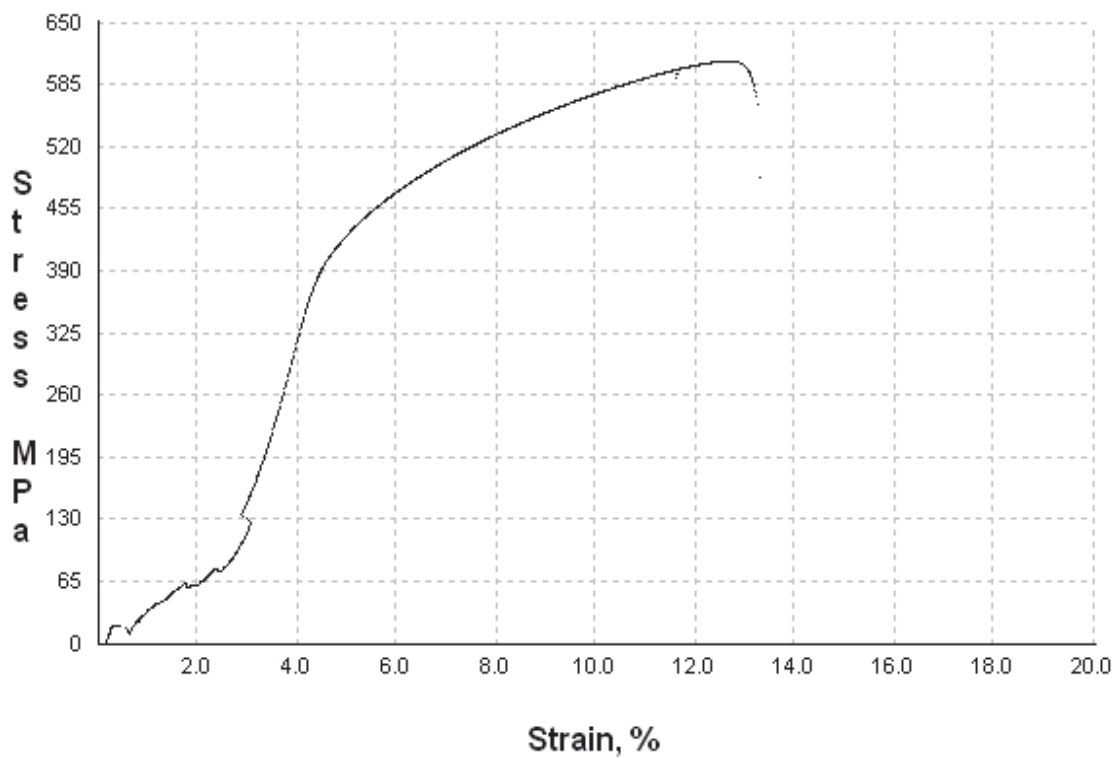
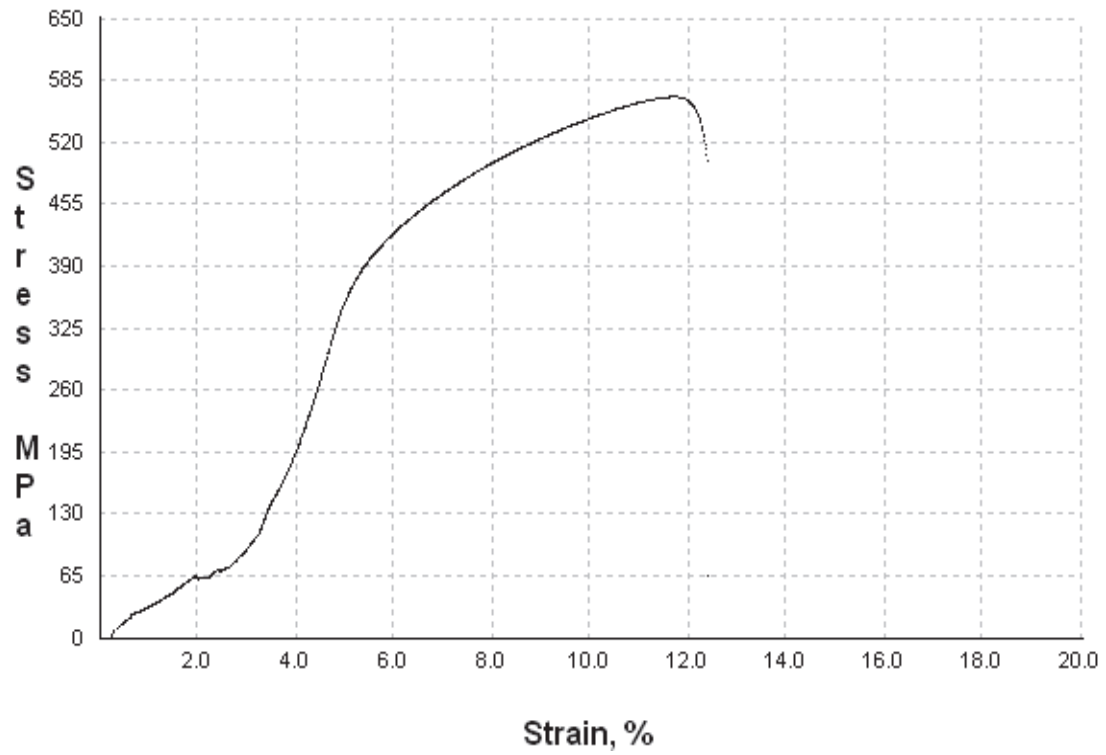
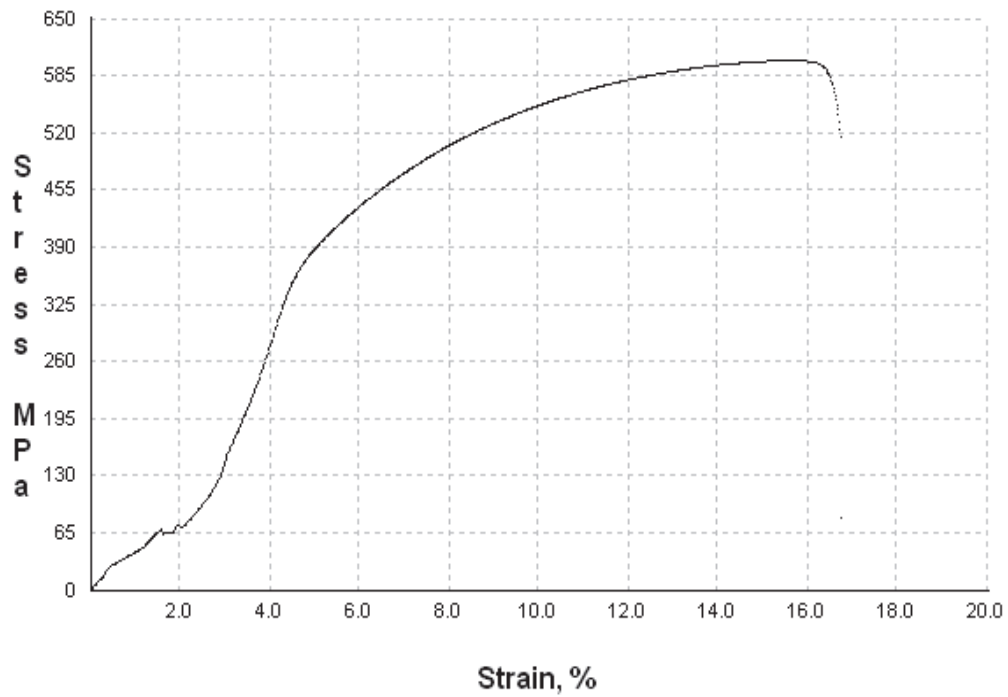
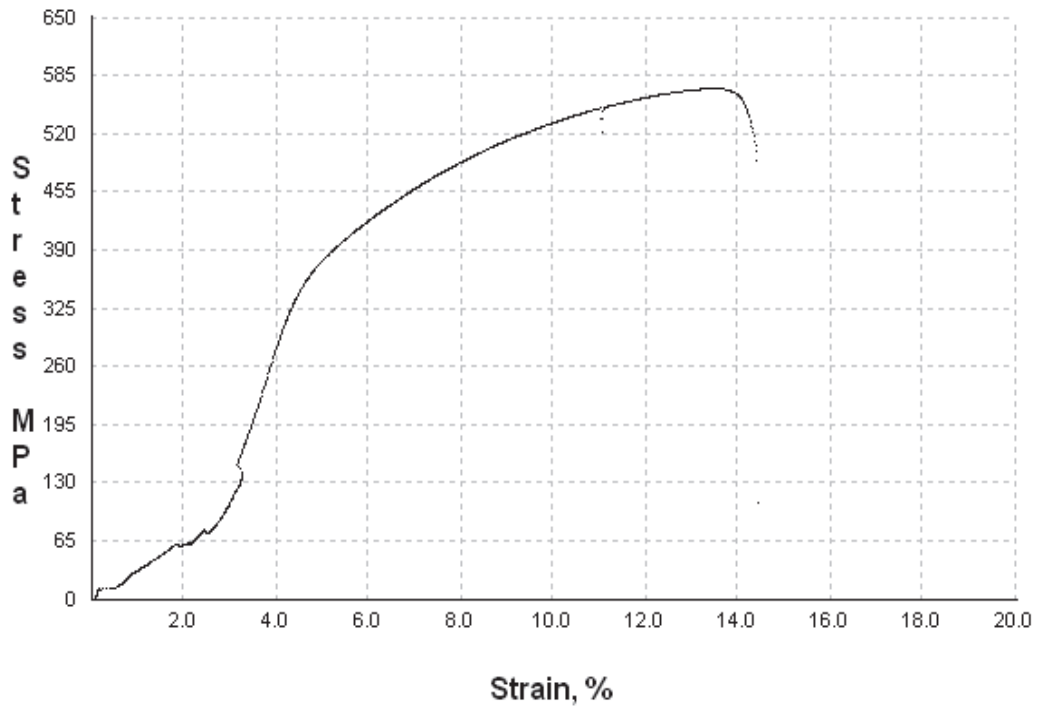


Figura 4.11 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación-AISI 304L.

#### 4.1.10.1.3 Probetas AISI 316L con Pre calentamiento



**Figura 4.12** Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación

#### 4.1.10.1.4 Probetas AISI 316L sin Pre calentamiento

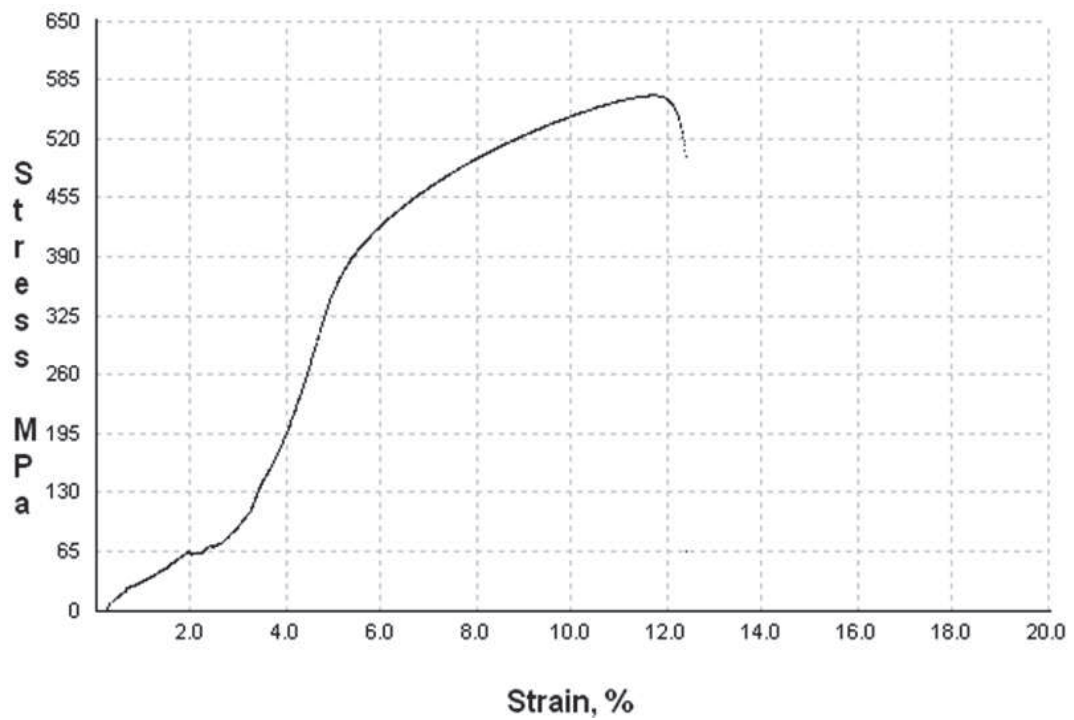
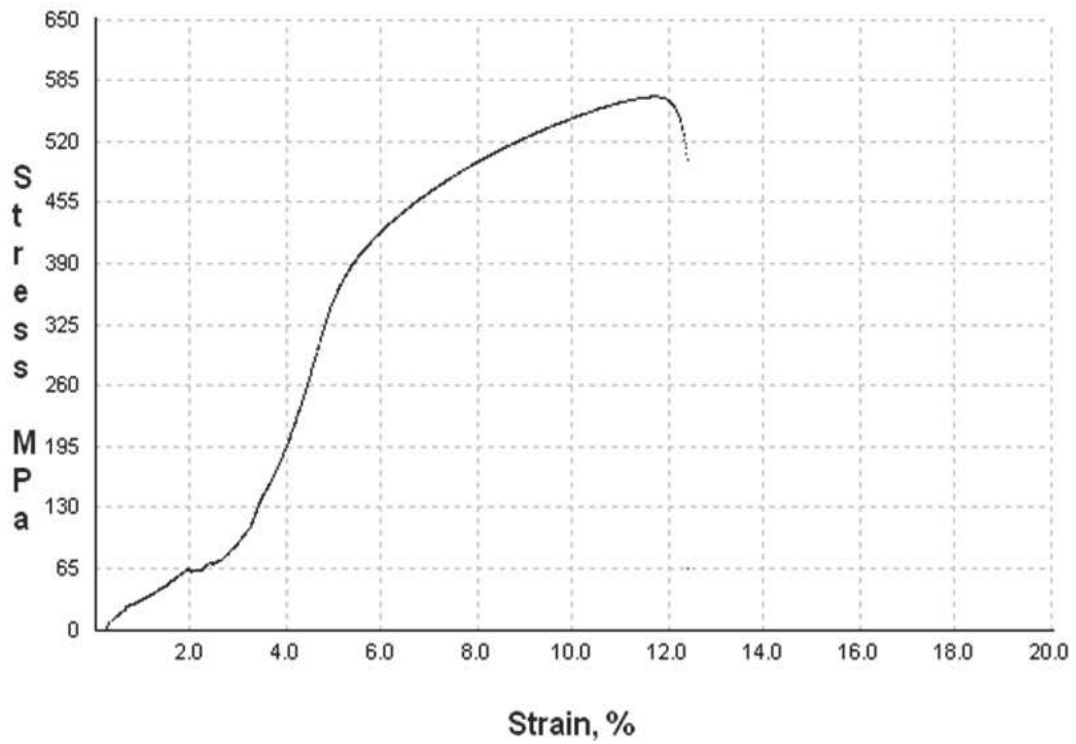


Figura 4.13 Curva de Esfuerzo Vs. Porcentaje de deformación- Probeta.



Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se muestran en la siguiente tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Resultados del Ensayo de Tracción de las probetas.

PROBETAS CON PRECALENTAMIENTO A MAS DE 300°C								
Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima		Resistencia a la Tracción		Observación	Calificación
			lbf	N	Ksi	Mpa		
304L-T1	18,54	2,81	6,42	28,558	79,7	548	FJS	Aprueba
304L-T2	18,49	3,00	7,20	32,027	81,8	577	FJS	Aprueba
PROBETAS SIN PRECALENTAMIENTO								
Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima		Resistencia a la Tracción		Observación	Calificación
			lbf	N	Ksi	Mpa		
304L-T1	18,92	3,00	7,760	34,52	88,4	608	FJS	Aprueba
304L-T2	19,27	3,02	7,420	33,006	82,3	567	FJS	Aprueba
PROBETAS CON PRECALENTAMIENTO A MAS DE 300°C								
Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima		Resistencia a la Tracción		Observación	Calificación
			lbf	N	Ksi	Mpa		
316L-T1	19,12	2,99	7,320	32,561	82,7	570	FJS	Aprueba
316L-T2	18,67	3,00	7,580	33,718	87,3	602	FJS	Aprueba
PROBETAS SIN PRECALENTAMIENTO								
Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima		Resistencia a la Tracción		Observación	Calificación
			lbf	N	Ksi	Mpa		
316L-T1	18,67	3,00	7,730	32,783	84,8	585	FJS	Aprueba
316L-T2	18,79	3,07	7,430	33,05	83,1	573	FJS	Aprueba

La falla del material se produce en la junta soldada, todas las probetas presentaron la misma condición, la cual se muestra en la figura 4.14.

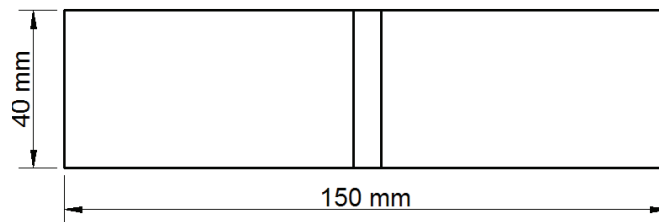


**Figura 4.14** Probeta luego de aplicar el ensayo de tensión.

La resistencia a la tracción no debe ser menor que la resistencia del material base, por lo tanto se encuentra dentro de los límites permisibles.

#### 4.1.11 ENSAYO DE DOBLADO

El ensayo de doblado se realiza para dar seguimiento y para justificar la utilización de la norma AWS D1.6 en el presente proyecto, además se utiliza para conocer el grado de rigidez y ductilidad. A las probetas se les prepara con la ayuda de la amoladora puliendo la zona de soldadura para posteriormente colocar en la maquina universal. A continuación se muestra en la figura 4.15 las dimensiones que se deben utilizar para realizar el ensayo de doblado.



**Figura 4.15** Dimensiones de la Probeta para Ensayo de Doblado de Raíz y Doblado de Cara<sup>61</sup>.

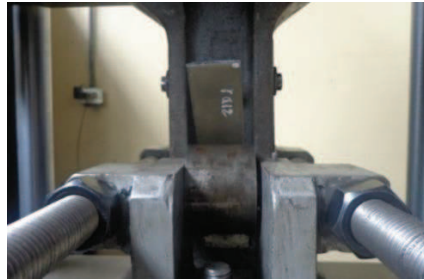
El número de probetas se muestra el número de las probetas que fueron sometidas a este ensayo, según lo que establece el código son 2 para doblado de raíz y dos para doblado de cara, para este trabajo en total se utilizaran en total de dieciséis probetas, se toma esta consideración ya que las placas fueron y para las diferentes condiciones de precalentamiento. La identificación de las probetas se realiza como se indica en la figura 4.16.



**Figura 4.16** Marcación de las probetas para doblado

<sup>61</sup> ANSI/AWS D1.6:1999; "Structural Welding Code – Stainless Steel", pág. 84.

Con la identificación de las probetas y antes de empezar el ensayo se pone a punto en la maquina universal del laboratorio, y se procede con el ensayo.

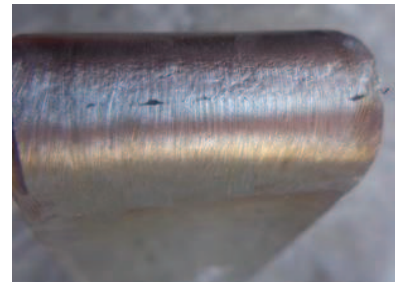


**Figura 4.17** Ensayo de Doblado

Las probetas correspondientes al material base AISI 304L con precalentamiento se presentan a continuación; en el doblado de cara la probeta se observa pequeñas fisuras en su superficie a un extremo del cordón de soldadura, en el doblado de raíz la probeta mantiene un buen aspecto y no presenta ningún tipo de discontinuidad.



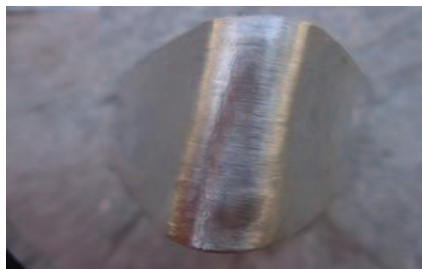
a) Doblado de cara



b) Doblado de raíz

**Figura 4.18** Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 304L con precalentamiento.

Las probetas del material base AISI 304L sin precalentamiento tanto del doblado de cara como el de raíz presentan una excelente apariencia sin ninguna discontinuidad, las mismas se presentan en la siguiente figura 4.19.



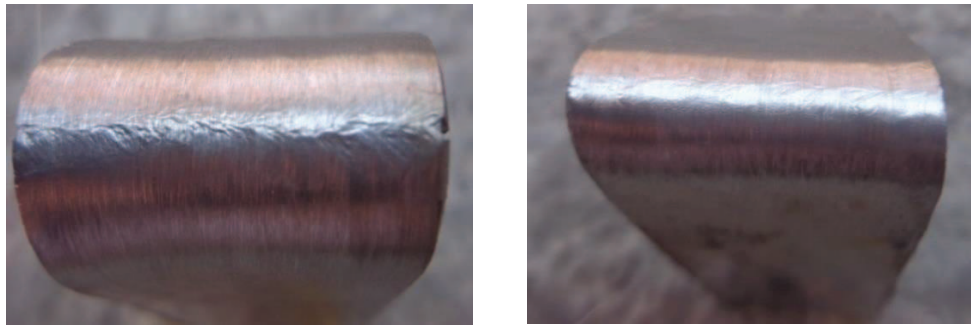
a) Doblado de cara



b) Doblado de raíz

**Figura 4.19** Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 304L sin precalentamiento.

Las probetas correspondientes al material base AISI 316L con precalentamiento, no se observa ninguna discontinuidad, presentando un buen aspecto.

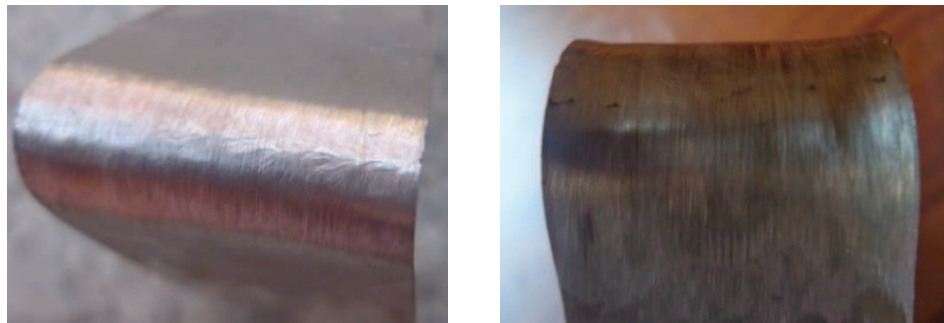


a) Doblado de cara

b) Doblado de raíz

**Figura 4.20** Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 316L con precalentamiento.

Las probetas del material base AISI316L sin precalentamiento, al doblado de cara presenta una dos pequeñas fisuras en la superficie a lo largo del cordón de soldadura, mientras que el doblado de raíz presenta una buena condición.



a) Doblado de cara

b) Doblado de raíz.

**Figura 4.21** Ensayo de Doblado a la probeta del material base AISI 316L sin precalentamiento.

En la tabla 4.9 se indica los resultados del ensayo de doblado de cara y de raíz aplicado a las probetas.

**Tabla 4.9** Resultados del ensayo de Doblado de Cara y Doblado de Raíz.

PROBETAS CON PRECALENTAMIENTO A MAS DE 300°C		
Identificación	Observación	Calificación
<b>304L-DC1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>304L-DC2</b>	Se observan discontinuidades de 1,8 mm y 2,1 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
<b>304L-DR1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>304L-DR2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
PROBETAS SIN PRECALENTAMIENTO		
Identificación	Observación	Calificación
<b>304L-DC1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>304L-DC2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>304L-DR1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>304L-DR2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
PROBETAS CON PRECALENTAMIENTO A MAS DE 300°C		
Identificación	Observación	Calificación
<b>316L-DC1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DC2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DR1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DR2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
PROBETAS SIN PRECALENTAMIENTO		
Identificación	Observación	Calificación
<b>316-DC1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DC2</b>	Se observan discontinuidades de 2,1 mm, 1,1 mm, 0,6 mm y 0,4 mm en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DR1</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
<b>316L-DR2</b>	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba

\*DC: Doblado de Cara;

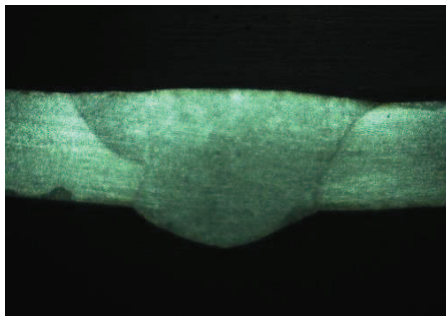
\*DR: Doblado de Raíz

FUENTE: Propia.

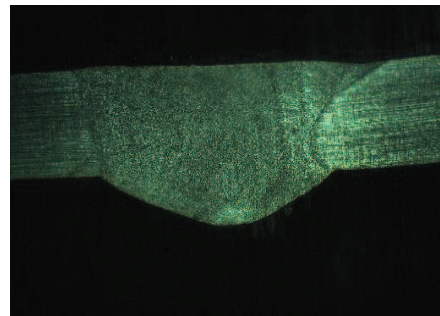
#### 4.1.12 MACROGRAFÍAS

Para continuidad con la calificación del WPS, es necesario realizar la macrografías las cuales ayudan a verificar si existe o no discontinuidades como porosidades, flujo deficiente de aporte del material de aporte, (falta de penetración), por ello se procede a la preparación de las probetas para este proceso.

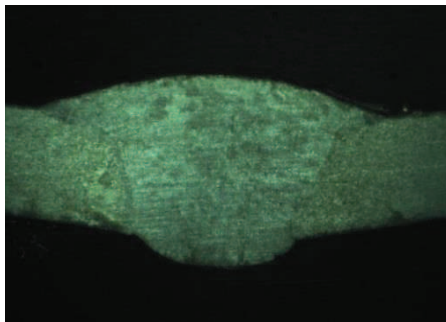
Las macrografías de las probetas de cada tipo revelan que existe penetración completa, las mismas que se muestran a continuación en la figura 4.22.



Macrografía AISI 304L con precalentamiento



Macrografía AISI 316L con precalentamiento



Macrografía AISI 304L sin precalentamiento.



Macrografía AISI 316L sin precalentamiento.

**Figura 4.22** Macrografías del cordón de soldadura.

En cada una de las macrografías una excelente penetración y sin presencia de discontinuidades.

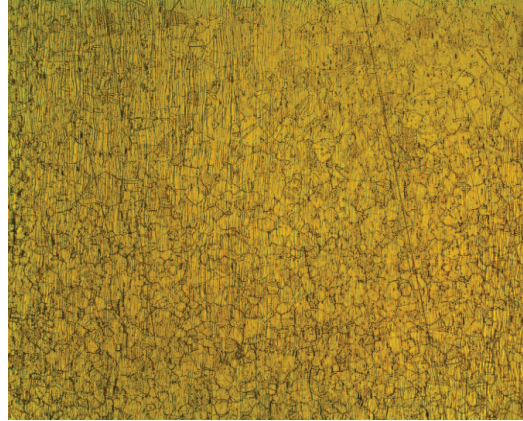


#### 4.1.13 MICROGRAFÍAS.

La micrografía determina las características estructurales y la calidad del proceso de soldadura, y se realizan luego que hayan pasado por el análisis micrográfico. Las gráficas de las diferentes muestras se observan en las siguientes tablas.

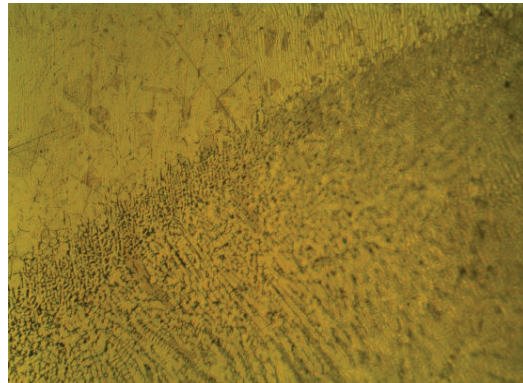
##### 4.1.13.1 Material AISI 304L con precalentamiento a 300°C.

Micrografía Metal Base con aumento 100X. Se observa una microestructura austenítica.



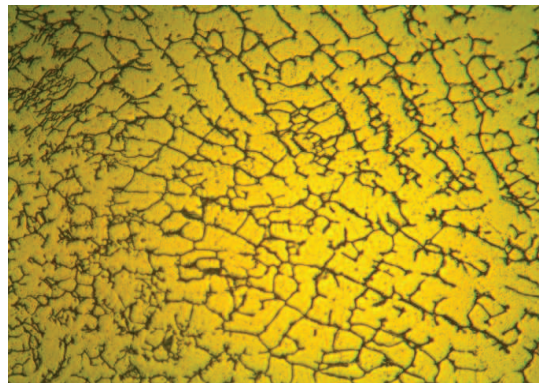
**Figura 4.23** Metal Base

Micrografía ZAC con aumento 100X, muestra granos columnares orientados hacia la fuente de calor.



**Figura 4.24** Zona afectada por el calor

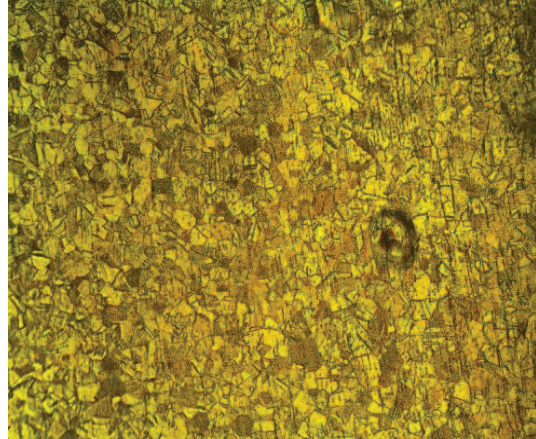
Micrografía Zona de Fusión con aumento 100X. Presenta una estructura dendrítica primaria y secundaria.



**Figura 4.25** Zona de fusión

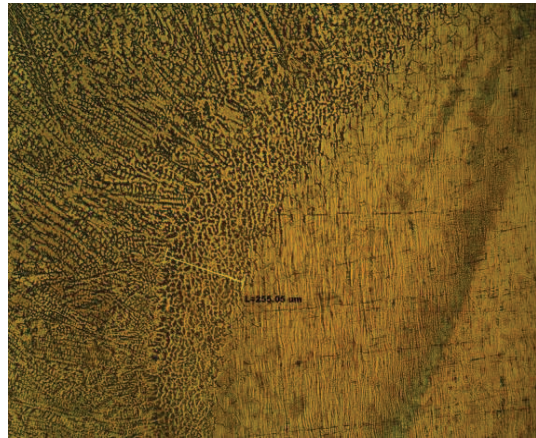
#### 4.1.13.2 Material AISI 304L sin precalentamiento

Micrografía Metal Base con aumento 100X. Presenta microestructura austenítica.



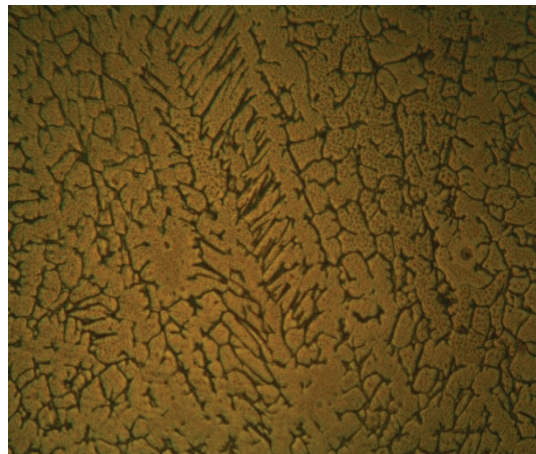
**Figura 4.26** Metal base

Micrografía ZAC con aumento 100X. Presenta microestructura columnar y precipitación de carburos.



**Figura 4.27** Zona afectada por el calor

Micrografía Zona de Fusión con aumento 100X, muestra dendritas.

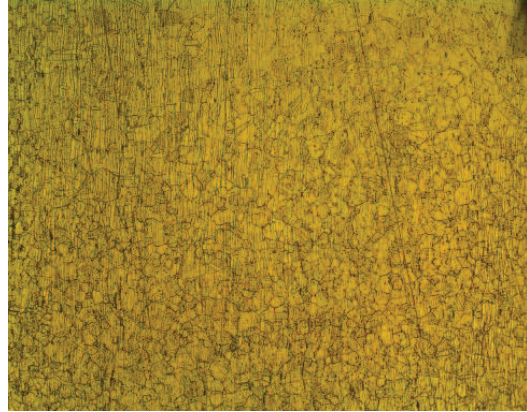


**Figura 4.28** Zona de Fusión



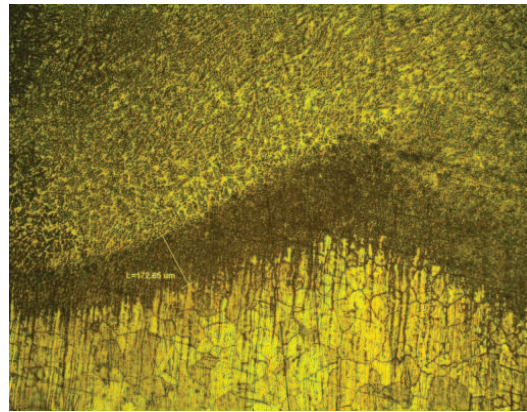
#### 4.1.13.3 Material AISI 316L con precalentamiento a 300°C.

Micrografía Metal Base con aumento 100X. Presenta su estructura totalmente austenítica.



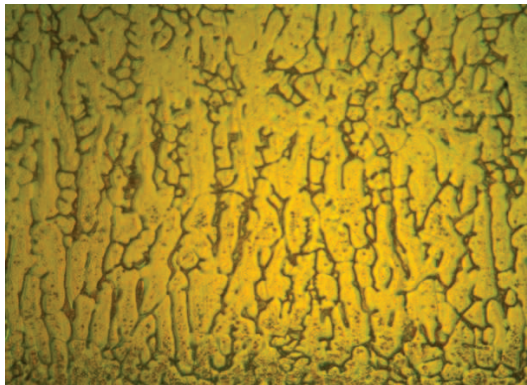
**Figura 4.29** Metal base

Micrografía ZAC con aumento 100X, se observa crecimiento epitaxial próximo a la zona de fusión y precipitados de carburos.



**Figura 4.30** Zona afectada por el calor

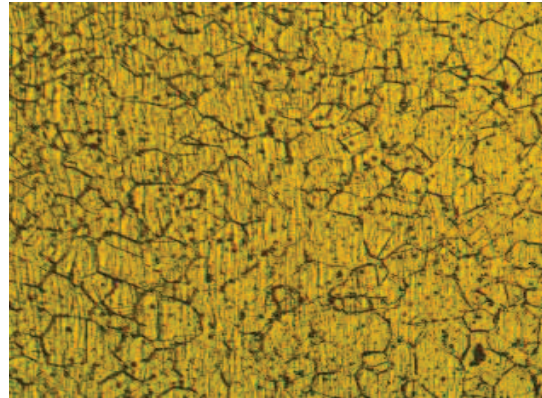
Micrografía Zona de Fusión con aumento 100X, muestra dendritas en primarias y secundarias.



**Figura 4.31** Zona de fusión

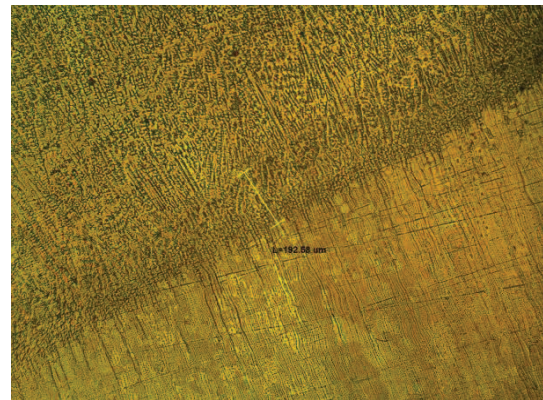
#### 4.1.13.4 Material AISI 316L sin precalentamiento.

Micrografía Metal Base con aumento 100X. Presenta precipitación de carburos.



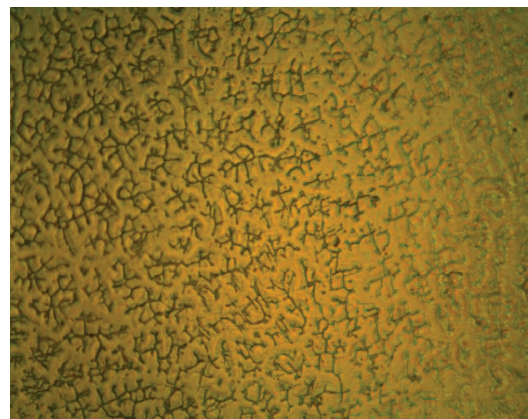
**Figura 4.32** Metal Base

Micrografía ZAC con aumento 100X, muestra crecimiento epitaxial con granos columnares y alargados.



**Figura 4.33** Zona afectada por el calor

Micrografía Zona de Fusión con aumento 500X. Existen dendritas en la zona de fusión.



**Figura 4.34** Zona de fusión

#### 4.1.14 ENSAYO DE NIEBLA SALINA

Este ensayo corresponde al estándar ASTM B117 (Standar Practice for Operating Salt Spray Fog), esencial para el presente proyecto de titulación, es por ello que se realizó los pasos de manera minuciosa para cada una las probetas las mismas que fueron introducidas en la cámara de niebla salina.

Para este trabajo, el Centro de Investigación Aplicada a Polímeros (CIAP) proporcionó la utilización del equipo de cámara salina, la cual utiliza un sistema de alimentación de agua purificada y aire comprimido.

En la tabla 4.10, se muestra las especificaciones del equipo usado.

**Tabla 4.10** Cámara Salina Q- FOG- CCT-600.

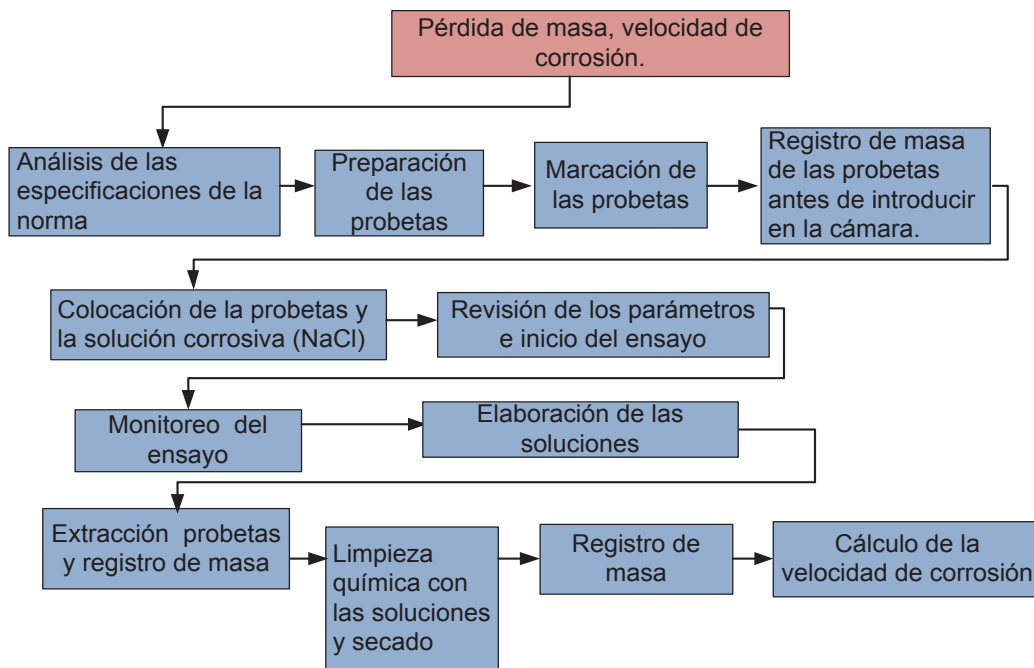
MARCA	Q-LAB
MODELO	Q-FOG CCT-600
CARACTERÍSTICAS	Cámara de Corrosión cíclica
	208V, 16A, 50/60H, monofásico
	4 Funciones
	Volumen de cámara 640l
	Volumen Reservorio 120L
	8 Portamuestras: 17 Probetas en c/u.
	Tamaño de las probetas máx. 100x300 mm.
DIMENSIONES EXTERNAS	(1051X1244X1821) mm. (Ancho, Alto, Largo)
FUNCIONES	Niebla Salina
	Secado Forzado
	Humedad 100%
	Dwell (sin acción)

##### 4.1.14.1 Descripción de la prueba.

Este método a seguir de la prueba de corrosión por cámara salina se realiza en base a la norma ASTM G1, la cual da a conocer los procedimientos para la preparación, limpieza y evaluación de la velocidad de corrosión en las probetas usadas en esta prueba en laboratorio.

En la figura 4.35 se muestra la metodología utilizada en el ensayo de corrosión, la cual se ha dividido en tres procesos importantes, antes, durante y después. Estos

procesos llegan a un fin, la determinación de la velocidad de corrosión por el método de pérdida de masa.



**Figura 4.35** Metodología para el ensayo de niebla salina

A continuación se desglosa los procesos realizados para determinar la pérdida de masa y por ende la velocidad de corrosión de los materiales utilizados.

#### 4.1.15 PROCEDIMIENTO Y PREPARACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS ANTES DE COMENZAR EL ENSAYO DE NIEBLA SALINA.

La cantidad de probetas que fueron introducidas por cada tipo de material y para cada condición fue de 10 probetas, sumando un total de 40 probetas. Es importante mencionar que la cantidad de probetas a introducir en la cámara salina no se encuentra especificada en la norma.

##### 4.1.15.1 Marcación de las probetas.

Luego de ser limpiadas las probetas de cualquier impureza que se presentó en el proceso de soldadura, se procede a marcarlas para que no exista confusión alguna al momento de sacar de la cámara de niebla salina. Es necesario utilizar el marcador de golpe para señalar con números según las condiciones ya mencionadas. El marcado de las probetas se muestra en la figura 4.36.





**Figura 4.36** Marcación de las probetas.

#### 4.1.15.2 Registro de cada probeta antes de introducir en la cámara salina

Una vez realizada la marcación a las probetas se procede a pesar las probetas, para lo cual fue necesario utilizar la balanza (DENVER INSTRUMENT COMPANY AA-200) mostrada en la figura 4.37.



**Figura 4.37** Balanza DENVER INSTRUMENT COMPANY AA-200.

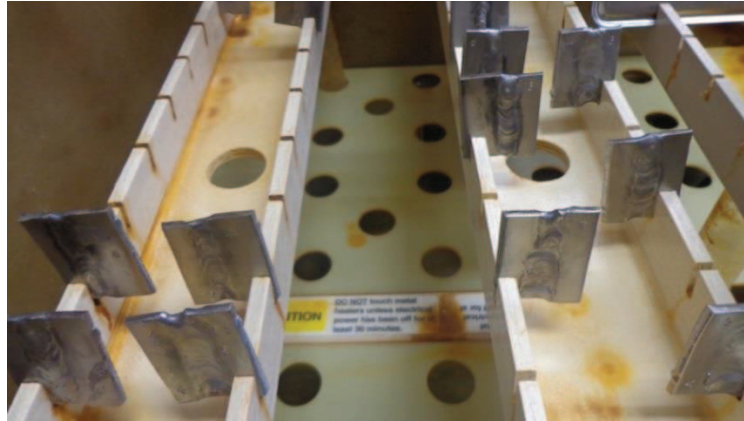
La masa de las probetas queda registrada antes de insertar en la cámara salina. En la tabla 4.11 se muestra los valores de masa de cada probeta.

**Tabla 4.11** Masa en Gr. de las probetas.

PROBETAS	MASA DE LAS PROBETAS EN GRAMOS (gr).			
	CON		SIN	
	PRECALENTAMIENTO	PRECALENTAMIENTO	PRECALENTAMIENTO	PRECALENTAMIENTO
	304L	316L	304L	316L
1	27,75	28,24	28,45	30,46
2	30,06	32,13	29,35	29,75
3	29,10	28,98	28,15	30,24
4	28,89	31,52	29,28	29,71
5	31,50	31,30	30,81	31,11
6	29,38	28,05	29,27	33,22
7	28,49	30,74	29,78	27,42
8	30,74	31,92	33,23	27,78
9	30,95	32,43	30,97	31,36
0	29,68	27,84	28,67	29,64

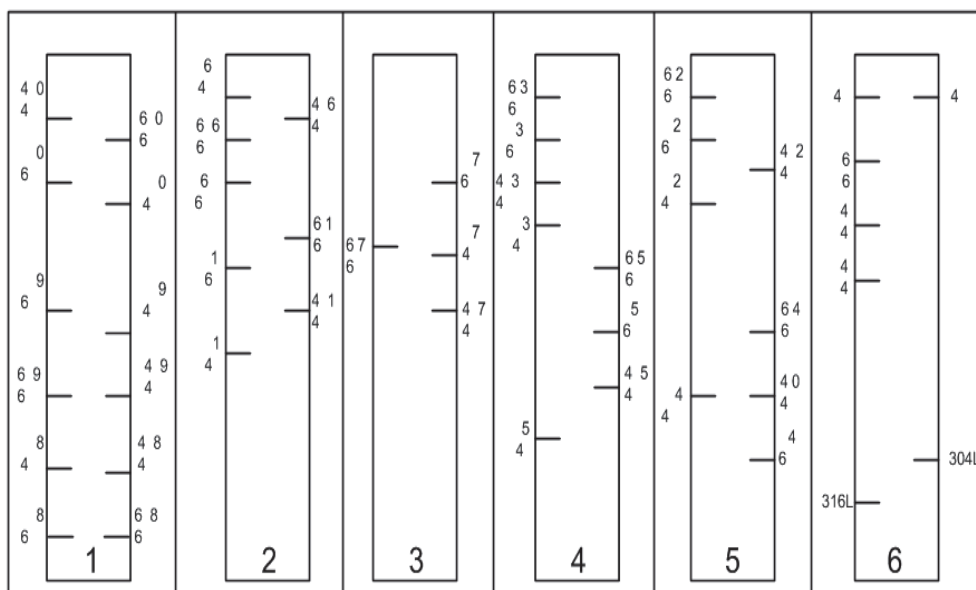
#### 4.1.15.3 Colocación de las probetas dentro de la cámara salina

Siguiendo con los pasos para la realización del ensayo de corrosión, se procede a colocar las probetas en el portaprobetas, teniendo en cuenta la posición en que se colocan las probetas para ello es necesario elaborar el mapeo. En la figura 4.38 se muestra la ubicación de las probetas dentro de la cámara salina.



**Figura 4.38** Colocación de las probetas.

El mapeo realizado para este ensayo muestra la posición relativa en la que se encuentran las probetas dentro de la cámara salina. Este mapeo se elaboró para que en lo posterior no exista confusión y puedan ser retiradas rápidamente, este mapeo se realizó exactamente con su respectiva marcación como se observa en la figura 4.39.



**Figura 4.39** Mapeo de las probetas

#### 4.1.15.4 Encendido de la cámara y colocación de la solución salina.

Antes de introducir los parámetros del equipo de cámara salina es necesario leer el instructivo de montaje de equipos y realizar el montaje del equipo.

En el panel de control se procede a colocar los parámetros para el ensayo, tomando en cuenta que el parámetro importante es el tiempo. El tiempo de exposición planificado fue de 1000 horas (42 días aproximadamente).

A continuación se muestran los parámetros introducidos en la cámara salina.

**Tabla 4.12** Parámetros del Equipo Cámara Salina.

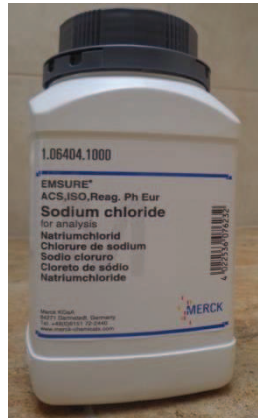
Cámara Salina	Q-FOG			
Modelo	CCT-600			
Tiempo de Exposición	1000 horas			
Solución	5% de NaCl ( ASTM B117)			
Función	Temperatura °C	Tiempo (Horas)	Flujo de Deposición (mL/h)	Presión Spray (Psi)
Niebla salina	35	1	1-2	10-25

Una vez ya introducido los parámetros para el ensayo con los que va a funcionar la cámara salina, es necesario llenar el tanque reservorio con la solución corrosiva que genera la corrosión. Esta solución corrosiva es preparada, disolviendo cloruro de sodio (NaCl), en agua destilada. El procedimiento de disolución se muestra en la figura 4.40.



**Figura 4.40** Preparación de la mezcla (Solución corrosiva).

La solución salina que establece la norma ASTM B 117, es el cloruro de sodio (NaCl) para laboratorio con una pureza de 99.5%. Se utilizó aproximadamente 13 Kg para todo el tiempo de exposición. La solución salina debe cumplir con los límites máximos permitidos de impurezas que establece la norma. El cloruro de sodio utilizado se muestra en la figura 4.41, el cual se vacía en un recipiente y se procede a la mezcla como muestra la figura anterior 4.40.



**Figura 4.41** Cloruro de sodio

Como último paso en el panel de instrumentos se procede a colocar todos los parámetros aplicables al ensayo de cámara salina, donde se especificó el tiempo del ensayo, la temperatura y la presión según como especifica la norma ASTM B117, y se pulsa correr.

Durante el ensayo se revisa todas las condiciones para prever algún imperfecto, también se abre el tanque de reservorio para introducir la solución salina en caso de faltar.

#### **4.1.16 PROCEDIMIENTO LUEGO DE LA EXPOSICIÓN A LA NIEBLA SALINA.**

Cuando las placas cumplieron el intervalo establecido de 100 horas, fueron retiradas de la cámara salina presentando el aspecto mostrado en la figura 4.42, esta probetas pertenecen a cada tipo de material utilizado, con la condición de con y sin precalentamiento.



- AISI 304L



Sin precalentamiento



con precalentamiento

- AISI 316L



Sin precalentamiento



Con precalentamiento

**Figura 4.42** Probetas luego de salir de la cámara salina.

Las probetas fueron pesadas con los productos de corrosión, es decir tal como salieron de la cámara salina, los valores registrados de masa para cada probeta se muestran a continuación en la tabla 4.13.

**Tabla 4.13** Masa de las probetas luego de salir de la cámara salina.

HORAS	MASA EN gr LUEGO DE LA CÁMARA SALINA			
	CON PRECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
100	27,74	28,24	28,44	30,46
200	30,05	32,13	29,35	29,75
300	29,09	28,98	28,14	30,24
400	28,88	31,52	29,28	29,71
500	31,49	31,29	30,81	31,1
600	29,36	28,05	29,26	33,22
700	28,47	30,73	29,78	27,41
800	30,72	31,91	33,22	27,77
900	30,93	32,42	30,97	31,35
1000	29,66	27,83	28,67	29,64

Luego de terminado el ensayo se procede a apagar la cámara, a desmontar las portaprobetas y a retirar los residuos de solución salina.

#### 4.1.16.1 Pérdida de masa vs tiempo de exposición sin limpieza química.

El ciclo que cumplió cada probeta fue de 100 horas, obteniéndose de esta manera la curva pérdida de masa. Esta curva se elabora registrando la masa de las probetas antes de introducir en la cámara y luego de salir de ella. En la tabla 4.14 se presenta los valores de pérdida de masa para cada ciclo de exposición.

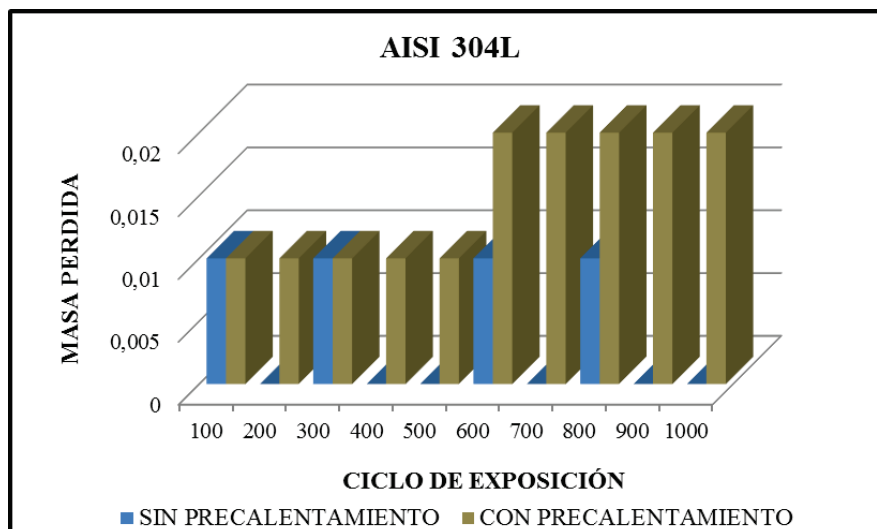
**Tabla 4.14** Pérdida de Masa

CICLO DE EXPOSICIÓN	PÉRDIDA DE MASA			
	CON PRECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
<b>100</b>	0,01	0	0,01	0
<b>200</b>	0,01	0	0	0
<b>300</b>	0,01	0	0,01	0
<b>400</b>	0,01	0	0	0
<b>500</b>	0,01	0,01	0	0,01
<b>600</b>	0,02	0	0,01	0
<b>700</b>	0,02	0,01	0	0,01
<b>800</b>	0,02	0,01	0,01	0,01
<b>900</b>	0,02	0,01	0	0,01
<b>1000</b>	0,02	0,01	0	0

La tabla 4.14, indica valores mínimos de pérdida de masa que experimentan las probetas de cada condición establecida, sin y con precalentamiento, no tienen mayor incidencia ya que la diferencia de pérdida de masa es mínima. Se observa que las probetas con precalentamiento para el caso del acero AISI 304L la pérdida de masa aumentan a partir de ciclo 600 y en el acero AISI 316L a partir del ciclo 400 no encuentra estabilidad.

De los valores obtenidos en la tabla 4.14, se amplía la información por separado cada una de las condiciones, pérdida de masa vs el ciclo de exposición mostradas a continuación en las figuras 4.43 y 4.44.

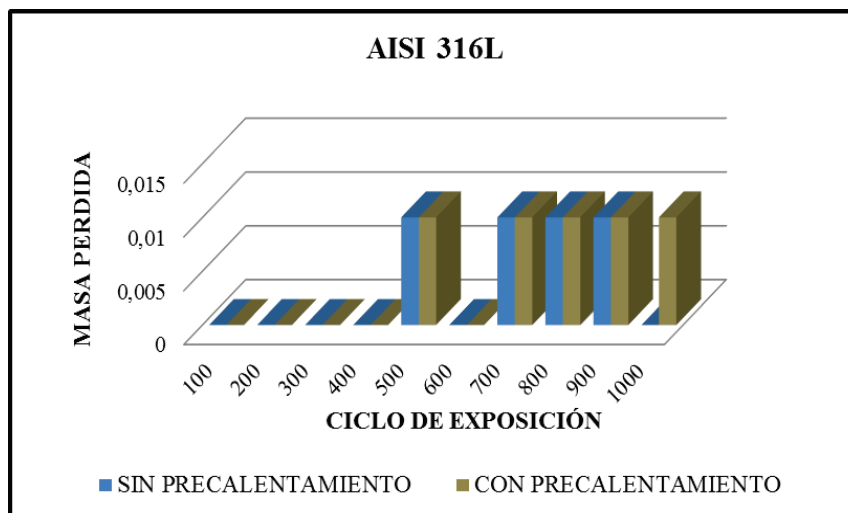
#### 4.1.16.2 Acero AISI 304L



**Figura 4.43** Pérdida de Masa vs Ciclo de Exposición

Las probetas con pre calentamiento aumentan la pérdida de masa mientras aumenta el ciclo de exposición a la niebla salina, las probetas sin pre calentamiento no presentan estabilidad.

#### 4.1.16.3 Acero AISI 316L



**Figura 4.44** Pérdida de Masa vs Ciclo de Exposición

La figura 4.43 y la figura 4.44 sirven para realizar una comparación visual de las dos condiciones, al realizar el pre calentamiento se observa claramente mayor pérdida de masa, sin embargo la diferencia entre estos valores no es representativa.

#### 4.1.17 LIMPIEZA QUÍMICA DE LAS PROBETAS LUEGO DE SALIR DE LA CÁMARA SALINA.

Otra forma de verificar si existe o no pérdida de masa, es la limpieza química. Se selecciona este proceso ya que los demás pueden cambiar aún más la superficie del material luego de haber salido del ensayo de niebla salina.

El proceso de limpieza química debe eliminar únicamente los productos de corrosión. Para esta limpieza es necesario preparar la solución que menciona la norma ASTM G31 (tabla A1) para cada tipo de material, ver anexo 4. La norma menciona que para el acero inoxidable es necesario utilizar la solución hidróxido de sodio+ polvo de zinc, la misma que fue preparada en el laboratorio.

##### 4.1.17.1 Elaboración de la solución.

Se elabora la solución con 200g de Hidróxido de Sodio (NaOH) con 50g de polvo de Zinc, en 1000mL de agua destilada. Esta mezcla se realizó en un balón de 1000mL y antes de introducir los demás componentes fueron pesados según la cantidad a utilizar. Posteriormente, la mezcla se coloca en otro recipiente que permita introducir con facilidad las probetas, cuando la solución llega al punto de ebullición se coloca inmediatamente las probetas, las cuales permanecen por un tiempo aproximado de 20 min., como especifica la norma.

En la figura 4.45, se muestra unos de los pasos en la elaboración de la solución.



**Figura 4.45** Solución Hidróxido de sodio y polvo de zinc.

- Polvo de Zinc, 99%, EPN
- Hidróxido de sodio, 90%, EPN.
- Agua destilada, 100mL

Es indispensable utilizar la sorbona ya que ayuda a neutralizar los olores tóxicos emanados por la solución. La solución química se introdujo en el vaso de precipitación para luego llevarla a la plancha donde hirvió a  $310^{\circ}\text{C}$  e inmediatamente se introdujo las probetas en el vaso de precipitación dentro de la sorbona tal como se muestra en la figura 4.46.



**Figura 4.46** Limpieza Química

Las probetas permanecieron alrededor de 20min., dentro de la solución para posteriormente ser retiradas. Luego de retirar las probetas de la solución de hidróxido de sodio + polvo de zinc, se procedió a lavar las probetas con agua para retirar restos de la solución, utilizando un cepillo de cerdas muy finas. Para todos estos procesos se contó con todos los utensilios de limpieza así como de protección.



**Figura 4.47** Lavado y secado de las probetas luego de la limpieza química.

Para el cepillado y secado de cada probeta se utilizó un cepillo plástico de cerdas muy finas, en general se utilizan los equipos de limpieza y protección, tal como se muestra en la figura 4.47.

Todas las probetas presentaron un buen aspecto superficial luego de cada limpieza.

#### 4.1.18 PROBETAS LUEGO DE SER EXPUESTAS A LA LIMPIEZA QUÍMICA.

Como menciona la norma ASTM G1, para retirar los residuos o productos de corrosión es importante realizar varias limpiezas y comprobar si con esta solución existe o no pérdida de masa.

##### 4.1.18.1 Masa de las placas luego de la limpieza química.

La limpieza química se realizó a cada probeta de diferente condición y se recopiló la masa después de cada limpieza, los valores se muestran en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15** Masa de las probetas luego de la Limpieza Química.

<b>AISI 304LCON PRECALENTAMIENTO</b>										
<b>CICLO DE EXPOSICIÓN EN HORAS</b>										
	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<b>0</b>	27,75	30,05	29,1	28,89	31,5	29,38	28,49	30,74	30,95	29,68
<b>1</b>	27,74	30,04	29,08	28,87	31,48	29,35	28,47	30,72	30,93	29,66
<b>2</b>	27,74	30,03	29,07	28,87	31,48	29,35	28,46	30,72	30,93	29,66
<b>3</b>	27,73	30,03	29,07	28,87	31,47	29,35	28,46	30,72	30,93	29,66
<b>4</b>	27,73	30,03	29,07	28,87	31,47	29,35	28,46	30,72	30,93	29,66
<b>5</b>	27,73	30,03	29,07	28,87	31,47	29,35	28,46	30,72	30,93	29,66
<b>6</b>	27,73	30,03	29,07	28,86	31,47	29,35	28,46	30,72	30,93	29,66
<b>AISI 304L SIN PRECALENTAMIENTO</b>										
	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<b>0</b>	28,45	29,35	28,15	29,28	30,81	29,27	29,78	33,23	30,97	28,67
<b>1</b>	28,44	29,34	28,14	29,26	30,79	29,26	29,77	33,22	30,96	28,67
<b>2</b>	28,43	29,33	28,13	29,26	30,79	29,25	29,77	33,22	30,96	28,67
<b>3</b>	28,43	29,33	28,13	29,26	30,79	29,25	29,77	33,22	30,96	28,67
<b>4</b>	28,43	29,33	28,13	29,26	30,79	29,25	29,77	33,22	30,96	28,66
<b>5</b>	28,43	29,33	28,13	29,26	30,79	29,25	29,77	33,22	30,96	28,66
<b>6</b>	28,44	29,33	28,13	29,26	30,79	29,25	29,77	33,22	30,96	28,66
<b>AISI 316LCON PRECALENTAMIENTO</b>										
	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<b>0</b>	28,24	32,13	28,98	31,52	31,3	28,05	30,74	31,92	32,43	27,84
<b>1</b>	28,23	32,11	28,97	31,51	31,28	28,04	30,72	31,9	32,42	27,82
<b>2</b>	28,23	32,11	28,96	31,51	31,28	28,04	30,72	31,9	32,41	27,82
<b>3</b>	28,22	32,11	28,96	31,51	31,28	28,03	30,72	31,9	32,41	27,82
<b>4</b>	28,22	32,11	28,96	31,51	31,28	28,03	30,72	31,9	32,41	27,82
<b>5</b>	28,22	32,11	28,96	31,51	31,28	28,03	30,72	31,9	32,41	27,82
<b>6</b>	28,22	32,11	28,96	31,51	31,28	28,03	30,72	31,9	32,41	27,82
<b>AISI 316L SIN PRECALENTAMIENTO</b>										
	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<b>0</b>	30,46	29,75	30,24	29,71	31,11	33,22	27,42	27,78	31,36	29,64
<b>1</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,11	33,22	27,42	27,78	31,35	29,63
<b>2</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,10	33,22	27,42	27,77	31,35	29,63
<b>3</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,10	33,21	27,42	27,77	31,35	29,63
<b>4</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,10	33,21	27,42	27,77	31,35	29,63
<b>5</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,10	33,21	27,42	27,77	31,35	29,63
<b>6</b>	30,44	29,73	30,22	29,71	31,10	33,21	27,42	27,77	31,35	29,63

\*Ciclo de limpieza (0): Masa inicial antes de empezar con el ensayo

\*Ciclo de limpieza (6): Masa final donde se estabiliza la masa perdida luego de la limpieza química

De la tabla anterior 4.15, se observa que la limpieza química elimina los productos de corrosión de las probetas desde el ciclo 3 de limpieza la masa permanece constante hasta el ciclo 6. La pérdida de masa se obtiene con la diferencia de la masa inicial y la masa final cuando se estabiliza luego de salir de la limpieza química, los resultados se muestran en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16** Masa Perdida del acero 304L

CICLO DE EXPOSICIÓN	CON PRECALENTAMIENTO	SIN PRECALENTAMIENTO
1	0,02	0,01
2	0,02	0,02
3	0,03	0,02
4	0,03	0,02
5	0,03	0,02
6	0,03	0,02
7	0,03	0,01
8	0,02	0,01
9	0,02	0,01
10	0,02	0,01

Con los datos de la tabla 4.16, se obtiene la figura masa perdida vs el ciclo de exposición de cada probeta.

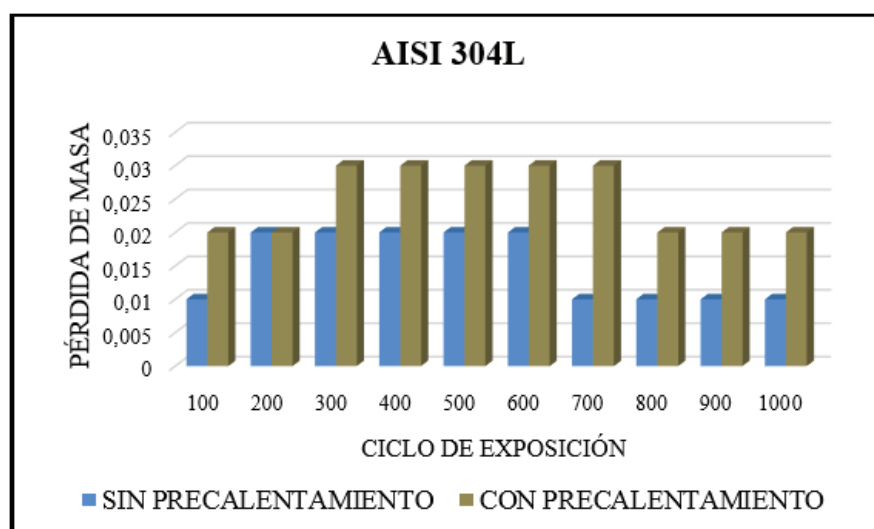


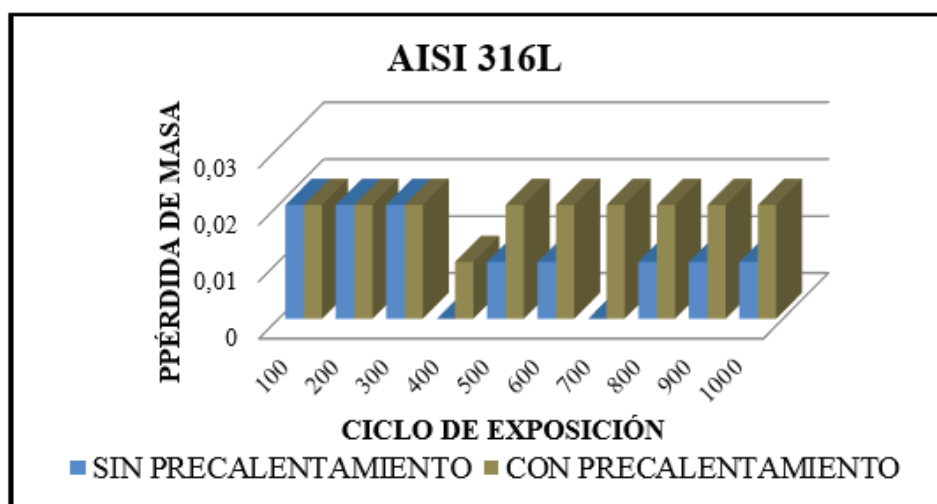
Figura 4.48 Masa Perdida vs Ciclo de Exposición

La figura 4.48 muestra la pérdida de masa por unidad de superficie del acero inoxidable AISI 304 L sin y con pre calentamiento. Como se observa durante todo el ensayo la pérdida de masa para las probetas sin pre calentamiento es mínima en

comparación con las de precalentamiento, en ambos caso los dos aceros aun presentando pérdida de masa conservan su principal característica, la resistencia a la corrosión cuando operan un medio salino.

**Tabla 4.17** Masa Perdida del acero AISI 316L

CICLO DE EXPOSICIÓN	CON PRECALENTAMIENTO	SIN PRECALENTAMIENTO
1	0,02	0,02
2	0,02	0,02
3	0,02	0,02
4	0,01	0
5	0,02	0,01
6	0,02	0,01
7	0,02	0
8	0,02	0,01
9	0,02	0,01
10	0,02	0,01



**Figura 4.49** Masa Perdida vs Ciclo de Exposición AISI 316L

De las figuras 4.48 y 4.49, se observa en general que la limpieza química hace que el material elimine los restos de corrosión originados por la solución salina, paralelamente a esto existe pérdida de masa la cual es insignificante en las dos condiciones. Por otro lado es importante comentar que cada probeta no presenta la misma cantidad de material de aporte, por tanto esto hace que cada una posea diferente masa.



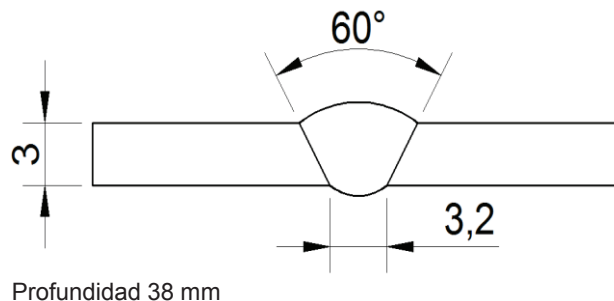
#### 4.1.19 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

Una vez ya obtenidos todos los datos necesarios, como los valores de variación de masa de las probetas, se procede al cálculo de la velocidad de corrosión.

Para obtener la velocidad de corrosion es necesario calcular el área de la soldadura.

##### 4.1.19.1 Área del cordón de soldadura

Es el área de la probeta expuesta al ensayo de corrosión, las dimensiones de la probeta se muestran en la figura 4.51.



Profundidad 38 mm

**Figura 4.50** Longitud de la probeta

$$A_{Total} = 27.12 \text{ cm}^2.$$

##### 4.1.19.2 Cálculo de la velocidad de corrosión

A continuación se realiza un ejemplo de cálculo para el acero Inoxidable tipo AISI 304L sin precalentamiento, probeta extraída a las 100 horas, donde la constante cinética  $K$  se encuentra especificada en el literal 8.1.2 y la densidad  $D$  tanto para el acero AISI 304L como para el AISI 316L, se obtienen de tabla X1.1 del anexo 2 de la norma ASTM G1. Entonces el valor de la constante cinética  $K$ , evaluados en mpy (mils per year) es de  $3.45 \cdot 10^6$  y la densidad  $D$  para el AISI 304L es  $7.94 \text{ g/cm}^3$ .

La masa perdida se calcula con la ecuación 3.2, pesando la probeta antes de entrar a la cámara de niebla salina y luego de salir de ella:

$$W = w_1 - w_2$$

$$W = 27.75 - 27.74 \text{ (g)}$$

$$W = 0.01 \text{ g.}$$

Con la ecuación 3.1 y los valores obtenidos de la masa perdida se procede a calcular la velocidad de corrosión:

$$\text{Velocidad de corrosión}(L) = ((K * W)) / ((A * T * D) )$$

$$L = \frac{3.45 \times 10^6 \text{ mpy} * 0.01 \text{ g}}{27.12 \text{ cm}^2 * 100 \text{ horas} * 7.94 \text{ g/cm}^3}$$

$$L = 1.60 \text{ mpy}$$

#### 4.1.19.3 Sin limpieza Química

La velocidad de corrosión para la demás probetas sin limpieza química se muestra en la tabla 4.18.

**Tabla 4.18** Velocidad de corrosión en mpy

HORAS DE EXPOSICIÓN	VELOCIDAD DE CORROSIÓN			
	CON RECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
<b>100</b>	1,60	0,00	1,60	0,00
<b>200</b>	0,80	0,00	0,00	0,00
<b>300</b>	0,53	0,00	0,53	0,00
<b>400</b>	0,40	0,00	0,00	0,00
<b>500</b>	0,32	0,32	0,00	0,32
<b>600</b>	0,53	0,00	0,27	0,00
<b>700</b>	0,46	0,23	0,00	0,23
<b>800</b>	0,40	0,20	0,20	0,20
<b>900</b>	0,36	0,18	0,00	0,18
<b>1000</b>	0,32	0,16	0,00	0,00

De los resultados obtenidos en la tabla 4.18, se observa que la velocidad de corrosión es reducida en los dos casos, este resultado depende de la pérdida de masa que es la disminución de masa luego de exponerse al ensayo de niebla salina.

##### 4.1.19.3.1 Material AISI 304L

A continuación se muestra la curva, horas de exposición vs velocidad de corrosión. Los puntos máximos de velocidad de corrosión en las probetas sin precalentamiento se dan en las horas de exposición 300, 500 y 700, lo que significa que en estos puntos existió mayor pérdida de masa, en los demás puntos

permanecen en cero. Las probetas de precalentamiento presentan una curva que parcialmente se mantiene la velocidad de corrosión constante.

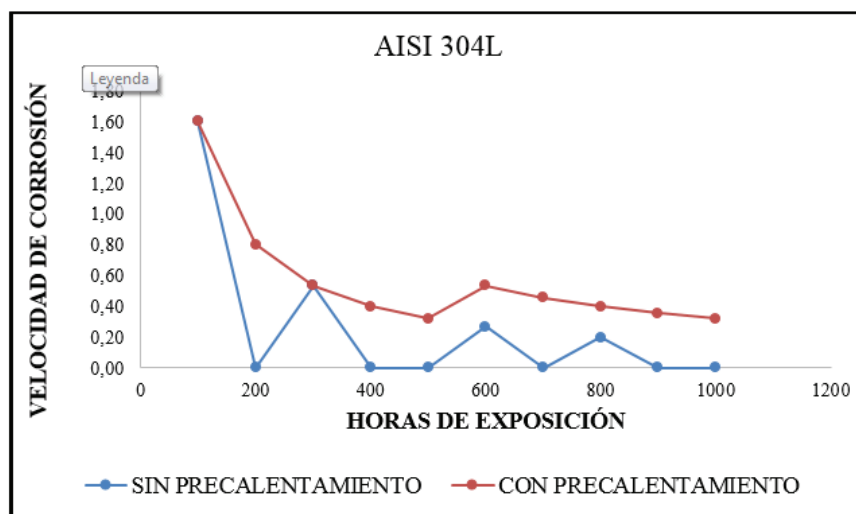


Figura 4.51 Velocidad de Corrosión

#### 4.1.19.3.2 Material AISI 316L

En la figura 4.52, el material presenta una variación constante de la velocidad de corrosión, estos valores tienen una clara relación con la pérdida de masa.

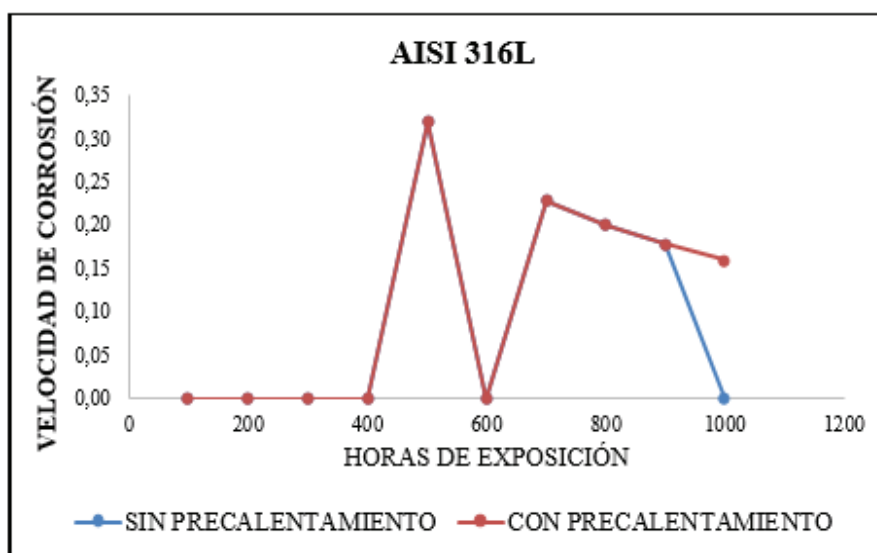


Figura 4.52 Velocidad de Corrosión

#### 4.1.19.4 Con limpieza Química

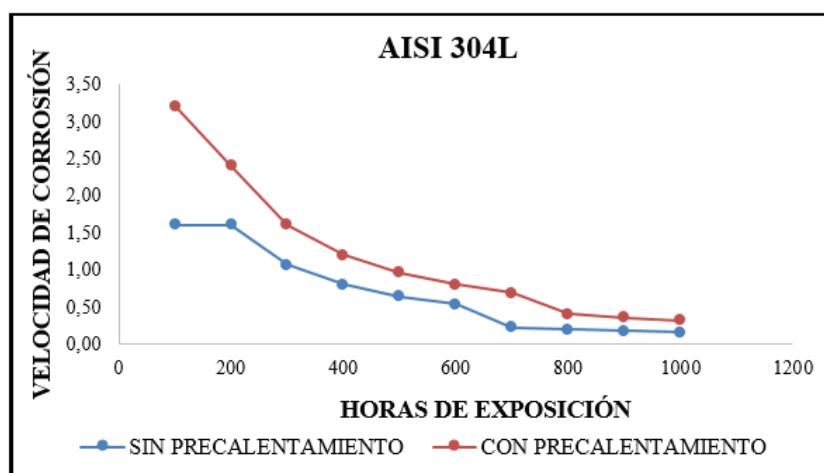
En la tabla 4.19 se muestra los resultados de la velocidad de corrosión en mpy para los aceros utilizados.

**Tabla 4.19** Velocidad de corrosión en mpy

HORAS DE EXPOSICIÓN	VELOCIDAD DE CORROSIÓN			
	CON PRECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
100	3,20	3,19	1,60	3,19
200	2,40	1,59	1,60	1,59
300	1,60	1,06	1,07	1,06
400	1,20	0,40	0,80	0,00
500	0,96	0,64	0,64	0,32
600	0,80	0,53	0,53	0,27
700	0,69	0,46	0,23	0,00
800	0,40	0,40	0,20	0,20
900	0,36	0,35	0,18	0,18
1000	0,32	0,32	0,16	0,16

##### 4.1.19.4.1 Material AISI 304L

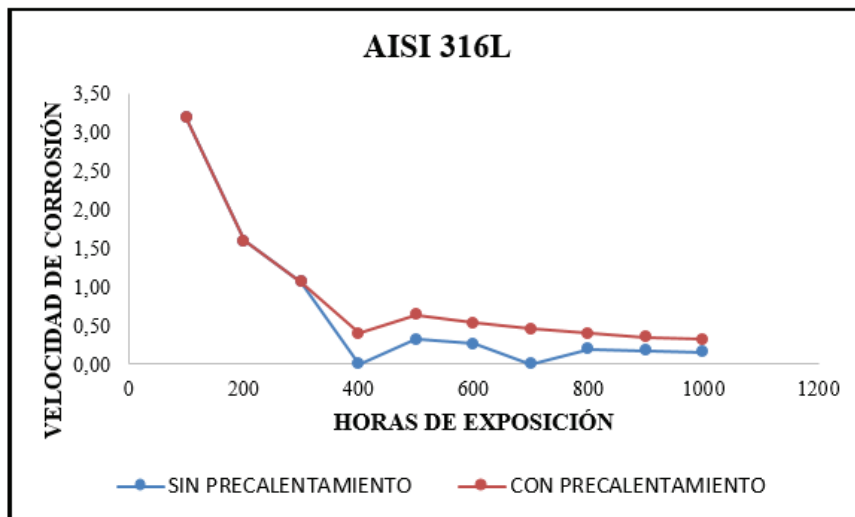
La velocidad de corrosión para las probetas con y sin precalentamiento para los dos tipos de aceros se muestra en la figura 4.53. El aceros AISI 304L presenta velocidades de corrosión comprendidas entre 0.32 y 3.20 mpy, para las de precalentamiento, mientras que las de sin precalentamiento presenta valores entre 0.16 y 1.60 mpy, sin embargo estos valores comparativamente no son excesivamente altas.



**Figura 4.53** Velocidad de Corrosión

#### 4.1.19.4.2 Material AISI 316L

En la figura 4.54 se observa de modo comparativo entre las dos condiciones, que la velocidad de corrosión originada no experimenta variaciones significativas.



**Figura 4.54** Velocidad de Corrosión

Finalmente, la representación gráfica de la velocidad de corrosión que presentan los aceros AISI 304L y AISI 316L, sin y con limpieza química, en función del ciclo de exposición permite concluir que la solución salina no modifica apreciablemente la superficie de los materiales utilizados. Los materiales ensayados tienen una elevada resistencia a la corrosión, por lo tanto las velocidades de corrosión calculadas se consideran bajas en todas las muestras.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en el Proceso Experimental realizados en el capítulo 4. El análisis empieza con la evaluación de la calificación del proceso de soldadura, para luego finalizar con el ensayo de corrosión.

El ensayo de corrosión reporta un análisis completo que conlleva una comparación entre las velocidades de corrosión realizadas entre las condiciones utilizadas para la soldadura de los aceros. Además muestra la pérdida de masa de cada probeta luego del ensayo y luego de la limpieza química alcanzada en los aceros inoxidables AISI 304L y AISI 316L en el sistema analizado.

#### **5.2 ANÁLISIS DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA.**

A continuación se detalla los ensayos que determinan la calificación del proceso de soldadura realizado.

##### **5.2.1 INSPECCIÓN VISUAL**

Se procede a realizar la inspección visual de todas las probetas, observando que las mismas presentan un cordón uniforme y libre de fisuras.

La raíz del cordón de soldadura presenta una penetración total, la sobremonta presenta un buen aspecto, uniforme y sin presencia de mordeduras.

Con la inspección visual realizada se identificó que presenta un buen aspecto obteniendo así resultados deseados.

##### **5.2.2 ENSAYO DE TENSIÓN**

Este ensayo de tensión se aplicó a todas las probetas, con y sin precalentamiento, obteniendo buenos resultados, cumpliendo así con la calificación del procedimiento.

Las probetas sin precalentamiento y con precalentamiento fallaron en la junta soldada. En la tabla 4.8, se detallaron los valores de la resistencia a la tracción soportada por las probetas antes de llegar a la fractura.

La resistencia a la tracción soportada por las probetas antes de llegar a la fractura no mostró una variación significativa en sus valores y estos son mayores a 485 MPa, por lo que aprueban los requerimientos del material base.

El precalentamiento a 650°C aumenta la ductilidad en las probetas AISI 304L y 316L, pero la resistencia a la rotura se mantuvo casi igual con respecto a las probetas que no fueron sometidas al precalentamiento.

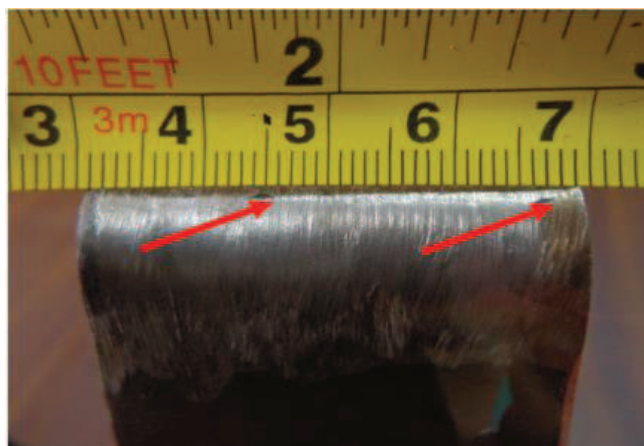
El precalentamiento de las probetas del material AISI 304L y AISI 316L, se realiza utilizando un horno, controlando la temperatura entre pases, considerando que no debe disminuir de los 300°C. El enfriamiento se realizó al aire.

Los resultados de los ensayos mecánicos pasan la norma AWS D1.6.

### **5.2.3 ENSAYO DE DOBLADO (RAÍZ Y CARA)**

El ensayo de doblado (cara y raíz) se realizó a todas las probetas en total 16, cumpliendo así la especificación de la norma AWS D1.6. Esta norma mencionada que las fisuras encontradas no deben exceder de 3mm de longitud medidos en cualquier dirección.

Se encontró fisuras en la probeta DC2 del acero AISI 304L con precalentamiento tal como se muestra en la figura 5.1, de 2.1mm y 1.8 mm que no exceden los 3mm y sumadas dan un total de 3.9 mm, cumpliendo así con lo dispuesto en la norma AWS D1.6.



**Figura 5.1.** Doblado de cara AISI 304L con precalentamiento.

Además se encontró cuatro fisuras en la probeta DC2 del acero AISI 316L sin precalentamiento de 2.1, 1.1, 0.6 y 0.1, de las cuales ninguna sobrepasa los 3 mm, el total de estas fisuras sumadas es 4,2 mm, con lo cual también se cumplen con lo dispuesto en la norma.



**Figura 5.2** Doblado de cara AISI 316L sin precalentamiento.

En resumen las fisuras encontradas para cada tipo de probetas son muy pequeñas y no exceden de 3mm por tal motivo las fisuras se encuentran dentro del límite permisible. Con respecto a la condición de cada una de las probetas para este ensayo se demostró que a pesar de ser expuestas a precalentamiento no existe mayor diferencia y pudieron resistir de la misma manera que las sin precalentamiento.



### 5.2.3.1 Resultados:

En general se ha realizado los ensayos estipulados por la norma ANSI/AWS D1.6 para la calificación del procedimiento, en la soldadura de los aceros inoxidable soldados mediante el proceso de soldadura GTAW, se muestran los siguientes resultados:

**Tabla 5.1** Resultados de los ensayos realizados.

TIPO DE ENSAYO	OBSERVACIÓN	RESULTADOS
ENSAYO DE TRACCIÓN	Los valores de la resistencia mínima a la tracción se encuentran dentro del rango permisible.	APRUEBA
ENSAYO DE DOBLADO DE RAÍZ	Las superficies no presentan ningún tipo de mordeduras o algún otro tipo de discontinuidad.	APRUEBA
ENSAYO DE DOBLADO DE CARA	Se presentan pequeñas fisuras, las cuales se encuentran dentro del límite permisible.	APRUEBA
MACROGRAFÍA	Se observa penetración total en los cordones de soldadura.	APRUEBA

Fuente: Propia.

Con los resultados expuestos se puede decir que la elección de los materiales, así como los equipos y los parámetros utilizados en la unión de los aceros AISI 304L y AISI 316L, con y sin precalentamiento, por medio del proceso GTAW con varillas de aporte ER 304L y ER 308L, respectivamente han sido los adecuados. Con estas características se llega a la conclusión de que el proceso queda calificado mediante los WPS (Anexo 1).

### 5.2.4 ANÁLISIS MACROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS.

Todas las probetas en su sección transversal presentan fusión completa entre el metal de aporte y la zona afecta por el calor, y están libres de fisuras. Con lo que cumple los requerimientos de la norma AWS D1.6, por lo que todas las probetas aprueban el ensayo macrográfico.

Entre las probetas ensayadas no existió presencia de discontinuidades significativas.

## 5.2.5 ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS.

### 5.2.5.1 Probetas de acero AISI 304L con precalentamiento

A esta probeta se la precalentó a 560°C y se controla que la temperatura entre pases no sea menor, el enfriamiento se los realiza al aire.

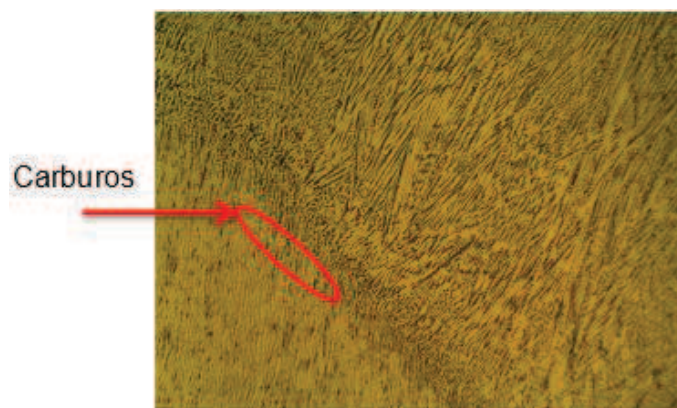
#### 5.2.5.1.1 Metal base.

La micrografía obtenida en el metal base muestra una fase totalmente austenítica, del tipo equiaxial. En la microestructura también se observa presencia de carburos de cromo los cuales son característicos en este tipo de materiales como se muestra en la figura 4.24.

De manera general para esta condición no se ve afectada significativamente por el precalentamiento realizado.

#### 5.2.5.1.2 Zona afectada por el calor ZAC

La zona afectada por el calor presenta un significativo crecimiento de grano, esta microestructura se observa en la figura 4.25, además presenta carburos de cromo en los límites de grano.



**Figura 5.3** Zona afectada por el calor 100X

Se presenta crecimiento de grano afectada térmicamente, este es un problema particular de los aceros austeníticos cuando están expuestos a temperaturas considerablemente altas. Estos precipitados de carburos tanto en la ZAC y el metal base muy cercano al cordón, puede sensibilizar la microestructura, pudiéndose presentar corrosión intergranular.

#### 5.2.5.1.3 Zona de Fusión

En la zona de fusión presenta una solidificación de tipo FA, también se observa un crecimiento de grano en que se puede diferenciar dendritas primarias y dendritas secundaria, estas dendritas están orientadas hacia la zona de mayor temperatura.

### 5.2.5.2 PROBETAS DE ACERO AISI 304L SIN PRECALENTAMIENTO

A esta probeta se controló la temperatura entre pases que no supere los 300°C.

#### 5.2.5.2.1 Metal base.

El metal base presenta una matriz completamente austenítica de tipo equiaxial. No presenta mayor modificación en su microestructura, esta microestructura se muestra en la figura 4.27.

#### 5.2.5.2.2 Zona afectada por el calor ZAC

La zona afectada por el calor presenta una microestructura con presencia de carburos, en los límites de grano. Se aprecia un crecimiento epitaxial próximo a la zona de fusión.

#### 5.2.5.2.3 Zona de fusión

La figura 4.29 presenta una solidificación austenítico- ferrítico con bordes dendríticos, también se observa precipitación de carburos.

### 5.2.5.3 PROBETAS DE ACERO AISI 316L CON PRECALENTAMIENTO

#### 5.2.5.3.1 Metal base.

Presenta una estructura austenítica de tipo equiaxial. Dentro de la microestructura también es notoria la presencia de carburos.

#### 5.2.5.3.2 Zona afectada por el calor ZAC

La zona afectada por el calor presenta crecimiento epitaxial, y ferrita acicular alargada. También se observa el fenómeno de crecimiento epitaxial, en donde los granos se encuentran próximos a la línea de fusión, como se muestra en la figura 4.31.

#### 5.2.5.3.3 *Zona de fusión*

La zona de fusión en esta probeta presenta una zona bifásica austenita-ferrita, con precipitación de carburos

### 5.2.5.4 **PROBETAS DE ACERO AISI 316L SIN PRECALENTAMIENTO**

#### 5.2.5.4.1 *Metal base.*

Presenta una estructura austenítica, también de tipo epitaxial, dentro de la matriz se puede observar carburos de manera significativas, los cuales son característicos de este tipos de materiales. Esta microestructura se observa en la figura 4.33.

#### 5.2.5.4.2 *Zona afectada por el calor ZAC*

En esta zona no se presenta sensitización ya el bajo de contenido de carbono lo retarda

#### 5.2.5.4.3 *Zona de fusión*

La zona de fusión, presenta una solidificación austenítica, se nota claramente un crecimiento dendrítico, en el que se puede diferenciar dendritas primarias y secundarias, las cuales están orientadas hacia la zona de mayor temperatura.

Según lo observado en la zona de fusión, por la morfología de ferrita delta presenta un modo de solidificación ferrítico primario (FA).

### 5.2.6 **ANÁLISIS DEL ENSAYO DE NIEBLA SALINA.**

Como se ha descrito anteriormente ingresaron 40 muestras al equipo de cámara de niebla salina expuestas a agua estándar que consiste agua destilada más cloruro de sodio. La permanencia de las muestras en la cámara fue de 1000 horas, estas muestras fueron retiradas en un intervalo de 100 horas, la pérdida masa se determina con la masa inicial esto es antes de entrar a la cámara salina y luego de salir de ella.

Para este ensayo se toma en cuenta dos procedimientos. El primero consiste en el análisis de las probetas antes y después de retirarlas de la cámara salina, la otra en la evaluación de la corrosión por medio de limpieza química la misma que limpia los productos de corrosión.

### 5.2.6.1 Velocidad de corrosión sin limpieza química

La velocidad de corrosión se realizó para cada situación, con y sin precalentamiento.

En la tabla 5.2 se muestra los resultados de la velocidad de corrosión para cada probeta, donde se observa que la velocidad de corrosión para cada tipo de material.

**Tabla 5.2** Velocidades de corrosión.

HORAS DE EXPOSICIÓN	VELOCIDAD DE CORROSIÓN			
	CON PRECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
<b>100</b>	1,60	0,00	1,60	0,00
<b>200</b>	0,80	0,00	0,00	0,00
<b>300</b>	0,53	0,00	0,53	0,00
<b>400</b>	0,40	0,00	0,00	0,00
<b>500</b>	0,32	0,32	0,00	0,32
<b>600</b>	0,53	0,00	0,27	0,00
<b>700</b>	0,46	0,23	0,00	0,23
<b>800</b>	0,40	0,20	0,20	0,20
<b>900</b>	0,36	0,18	0,00	0,18
<b>1000</b>	0,32	0,16	0,00	0,00

La velocidad de corrosión para las probetas material AISI 304L y 316L oscilan entre los valores de 0 a 2 mpy con y sin precalentamiento, en esta sección es importante mencionar que se produce mayor pérdida de masa y por tal, existe una velocidad de corrosión relativamente acelerada en el acero AISI 304L, ya que este es más susceptible a la corrosión, además eso sucede porque en su estructura presenta precipitación de carburos lo que desembocaría en un corrosión intergranular.

Por otro lado el acero AISI 316L, tiene una mínima velocidad de corrosión ya que en algunos ciclos tienden a cero. Este tipo de acero a más de presentar una estructura con precipitación de carburos en menor cantidad, presenta una pérdida de masa despreciable a diferencia del otro tipo este acero, este tiene mayor resistencia a la corrosión.

### 5.2.6.2 Velocidad de corrosión con limpieza química

Luego de que las muestras salen de la cámara salina y una vez extraídas los restos de la solución salina se pesaron e inmediatamente fueron colocadas en la solución

de hidróxido de sodio la misma que limpia los productos de corrosión, con estos valores al igual que el proceso anterior sirve para la evaluación de la velocidad de corrosión. Esta limpieza química supone la limpieza sólo de los productos de corrosión y se comprueba con los ciclos de limpieza realizados hasta cuando llega a estabilizarse, es decir cuando ya no existe pérdida de masa.

En la siguiente tabla se muestra la velocidad de corrosión realiza a las probetas luego de la limpieza química.

**Tabla 5.3** Velocidad de corrosión con limpieza química

HORAS DE EXPOSICIÓN	VELOCIDAD DE CORROSION			
	CON PRECALENTAMIENTO		SIN PRECALENTAMIENTO	
	304L	316L	304L	316L
<b>100</b>	3,20	3,19	1,60	3,19
<b>200</b>	2,40	1,59	1,60	1,59
<b>300</b>	1,60	1,06	1,07	1,06
<b>400</b>	1,20	0,40	0,80	0,00
<b>500</b>	0,96	0,64	0,64	0,32
<b>600</b>	0,80	0,53	0,53	0,27
<b>700</b>	0,69	0,46	0,23	0,00
<b>800</b>	0,40	0,40	0,20	0,20
<b>900</b>	0,36	0,35	0,18	0,18
<b>1000</b>	0,32	0,32	0,16	0,16

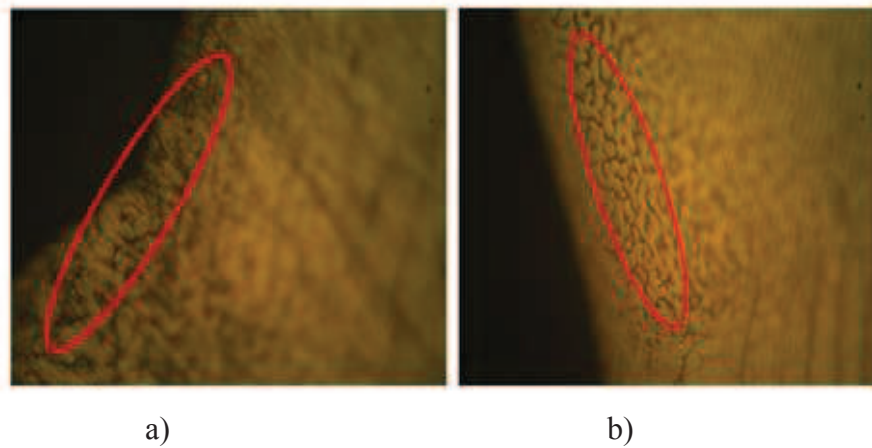
De la tabla anterior se observa que la velocidad de corrosión oscila entre valores de 0 a 4 mpy, por lo tanto la velocidad al igual que el proceso anterior es mínima.

Al realizar el ensayo de niebla salina se comprueba que la solución salina en la cantidad establecida por la norma es capaz de producir corrosión, sin embargo la pérdida de masa a causa de esta solución es mínima en ambos casos.

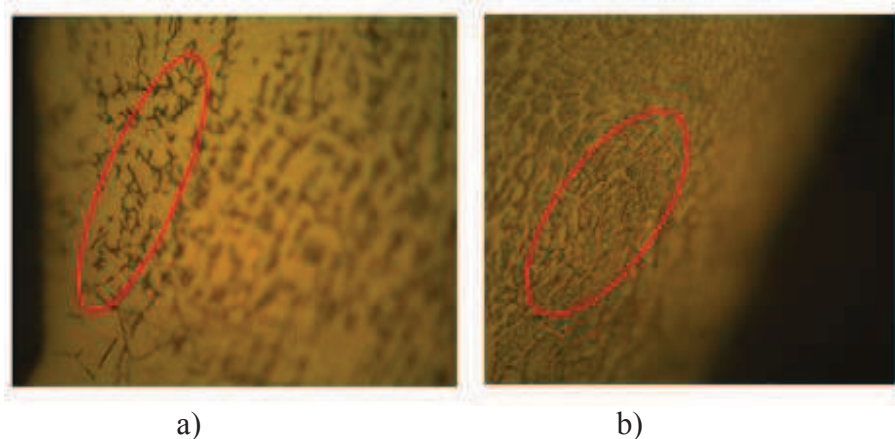
### 5.2.6.3 Resultados.

Finalizado el ensayo, a los aceros inoxidables se les realizó la micrografía con el objeto de observar cambios producidos en la superficie. La velocidad de corrosión de los dos materiales es prácticamente inapreciable en las condiciones más desfavorables al ser aplicada por aproximadamente por 42 días aproximadamente, tiempo en que podría existir una pérdida de masa considerable, sin embargo estas solo representan una velocidad de corrosión mínima.

A continuación se presenta las microestructura de las probetas que cumplieron con el ciclo de 1000 horas de exposición.



**Figura 5.4** Microestructura del material base a) AISI 304L y b) AISI 316L expuesto a 1000 horas con precalentamiento por 500X



**Figura 5.5** Microestructura del material base a) AISI 304L y b) AISI 316L expuesto a 1000 horas sin precalentamiento por 500X

Las probetas (cordón de soldadura) presentan una pérdida de masa insignificante, al terminar las 1000 horas y al comparar con la velocidad de corrosión calculada en mpy, se comprueba que en realidad esta es mínima.

En ambos casos se observa que los materiales no han sufrido daños importantes ya que las micrográficas revelan una microestructura mínimamente degradada.

Aun buscando su debilitamiento a través del precalentamiento, no se llega a apreciar en mayor proporción la pérdida de masa, quizás esta disminución afecte su resistencia a largo plazo y pueda presentarse varios tipos de corrosión comúnmente encontrados para estos tipos de aceros.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

El proceso de soldadura GTAW para los aceros AISI 304L y AISI 316L de pequeños espesores, planteados en este proyecto es el adecuado, ya que presentan soldaduras sin presencia de escoria y de buena calidad debido a que esta siempre está protegida el área de soldadura de la atmósfera.

Los aceros inoxidable austeníticos AISI 304L y 316L a temperaturas relativamente elevadas, están sometidos a cambios metalúrgicos drásticos en la zona de fusión y en la ZAC, mostrando cambios muy evidentes como: el crecimiento de grano, precipitación de carburos y el fenómeno de crecimiento epitaxial.

Al establecer temperaturas de precalentamiento para los aceros utilizados en este proyecto, se comprobó que efectivamente el material disminuye su sensibilización a la resistencia a la corrosión al presentarse carburos de cromo, los cuales son causantes de la corrosión intergranular principalmente en estos aceros u otros tipos de corrosión dependiendo de la aplicación en la que vaya a ser utilizado el material.

La sensibilización influyó también en las propiedades mecánicas es por esto que a pesar de aprobar el ensayo de doblado presentaron discontinuidades en el cordón de soldadura, los mismos que estuvieron dentro de los límites permisibles de aceptación especificados en el norma ANSI/AWS D1.6.

Las varillas de aporte ER308L y ER316L utilizados para la soldadura de los aceros 304L y 3016L respectivamente, cumplen con el objetivo, ya que presentan propiedades similares al del metal base, esto hace que la soldadura presente una buena condición ante los ensayos especificados dentro de la norma ANSI/AWS D1.6.

Los carburos de cromo encontrados en la microestructura de los aceros que se sometieron al precalentamiento son muchos más grandes por lo tanto son propensos de sufrir una corrosión intergranular.



El precalentamiento fue un proceso necesario para establecer una diferencia de la velocidad de corrosión al momento de introducir en la cámara salina, lo cual se comprobó que aun perteneciendo a un tipo de acero inoxidable, sufrió una mínima pérdida de masa.

El ensayo de niebla salina puede ayudar a optimizar la selección de aceros inoxidables, ya que permite evidenciar cambios que experimentan al ser expuestos a condiciones similares a las del ambiente.

Las probetas, en el proceso de limpieza química presentan una mínima pérdida de masa, al aumentar los ciclos de exposición alcanzan un estado estacionario donde se minimiza esta y se mantiene constante, se observa que los aceros AISI 304L y AISI 316L, muestran buenos comportamientos frente a la solución salina.

## 6.2 RECOMENDACIONES

La soldadura de estos aceros inoxidable se debe realizar en el menor tiempo posible y debe ser enfriado de manera brusca, para evitar la permanencia a la temperatura de sensibilización (precipitación de carburos) pueda disminuir.

A las probetas luego de la soldadura se debe limpiar de manera homogénea toda la superficie utilizando la esmeriladora u otros equipos de limpieza, ya que si no se realiza esta limpieza antes de entrar a la cámara salina pueden confundir más los resultados de la velocidad de corrosión.

Es necesario, antes de introducir en la cámara salina, obtener probetas que tengan el mismo de masa para las diferentes condiciones, para así poder obtener mejores resultados en el cálculo de la velocidad de corrosión

Se recomienda utilizar las guías de pasos para la realización del ensayo de niebla salina ya que estos fueron elaboradas tomando como referencia la norma ASTM B117. También es conveniente que la cámara salina se mantenga con las especificaciones descritas en la norma estándar de referencia hasta finalizar el ensayo. Unido a esto es importante realizar la limpieza de la cámara salina luego de terminar el ensayo con el fin de asegurar su calidad.

Para optimizar la resistencia a la corrosión se recomienda utilizar varios tipos de recubrimientos óptimos para estos aceros, utilizados en el presente proyecto.

Se recomienda que al momento de realizar la limpieza química se tenga mucho cuidado con la manipulación de la solución ya que estos pueden causar graves quemaduras.

Realizar ensayos de exposición al ambiente en distintos lugares donde la presión atmosférica sea distinta para obtener mayor relación y establecer una comparación con el ensayo acelerado (cámara salina).

Para obtener mejores resultados de la velocidad de corrosión se recomienda prolongar el tiempo de permanencia en la cámara salina.

Es recomendable realizar inspecciones metalograficas para examinar las transformaciones en las microestructuras y sólo así poder determinar los factores que pueden provocar fisuras y tipos de corrosión.

El ensayo de niebla salina puede ser utilizado como un ensayo de control de calidad para aceros inoxidables.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN WELDING SOCIETY; AWS D1.6; “Structural Welding Code – Stainless Steel”; Miami-USA1999.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; ASTM G1; “Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens; 2011.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; ASTM B117; “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus”; 2011
4. ALMEIDA-VILLENA;(2009); “Soldadura fuerte del acero inoxidable austenítico”; EPN; pg.33-34.
5. ASKELAND D.; “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”; International Thomson Editors; 1999.
6. COLOMBER R.; DESMOND R.; “Aceros Inoxidables-Aceros Refractarios”, España; 1972.
7. CORDOVA, CALVO, JARAMILLO; (2007); “Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión.”; Madrid; 2007.
8. CHAVEZ Ch.; “Apuntes de Metalurgia”; México; 1995.
9. DELATRE, F.; “Soldabilidad de los aceros inoxidables”; URMO; España 1972.
10. GALVAN V., SORIANO M, ESLON C.; “Materiales Metálicos”; Valencia; 2005.
11. GIACHINO J., WEEKS; “Técnica y práctica de soldadura”; España; 2007.
12. HORWITZ, H.; “Soldadura: aplicaciones y práctica”; Alfaomega; México.; 1990
13. IBARRA M., NUÑEZ E.;HUERTA J., (2010); “Manual de Aceros Inoxidables”; Chile
14. INDURA S.A; “Sistemas y Materiales de Soldadura”; Chile; 2010.
15. INDURA S.A.;”Manual de los aceros Inoxidables”; Chile; 2010
16. JEFFUS, LARRY; “MANUAL DE SOLDADURA GTAW”; ESPAÑA; 2005.

17. JOHN C.LIPPOLD, DAMIAN J.KOTECKI, D.; "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels"; Wiley-Interscience; New Jersey-USA 2005.
18. KHATAK H.S., BALDEV R.; "Corrosion of austenitic stainless Steels"; USA; 2002.
19. LAUFGANG S.; "Tratamiento térmico de soldadura"; Termo Soldex S.A.; 2004.
20. RODRIGUEZ, P.; "Manual de Soldadura-Soldadura MIG y TIG"; Argentina; 2001.
21. SEFERIAN D., "Las soldaduras, técnica – control, soldabilidad de los metales"; Bilbao; 1981.
22. SHANKAR V., "Soldification cracking in austenitic stainless steels", India.
23. VILLACRÉS Miguel, "Principios y control de soldadura".

**Sitios Web:**

1. Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable;  
<http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v12n2/art07.pdf>.
2. Metalurgia del acero inoxidable;  
[http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1027/3/Capitulo\\_2.pdf](http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1027/3/Capitulo_2.pdf).
3. INCHICOL (2007); Inspector de soldadura AWS QC-1;  
<http://es.scribd.com/doc/50005935/Libro-Inspector-de-Soldadura-AWS>.
4. Procesos de Soldadura;  
<http://www.studyblue.com/notes/note/n/fcaw/deck/944200>
5. Aceros inoxidables;  
<http://montajesurbanos.com/aceroinoxidable.html>
6. Aplicaciones de los aceros inoxidables;  
<http://montajesurbanos.com/aceroinoxidable.html>  
<http://image.made-in-china.com/2f0j00HvITWVdyfeGM/Stainless-Steel-Sanitary-Welded-Butterfly-Valve.jpg>