

# **ESCUELA POLITECNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

## **ESTUDIO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS DE HASTA 3 MM DE ESPESOR**

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

**GUSTAVO ALBINO MORALES ILES**

[gustavomorales.epn@gmail.com](mailto:gustavomorales.epn@gmail.com)

**DIRECTOR: ING. PATRICIO ESTUPIÑAN MSc.**

[patricio.estupinan@epn.edu.ec](mailto:patricio.estupinan@epn.edu.ec)

**Quito, Mayo del 2009**

## DECLARACION

Yo Gustavo Albino Morales Iles, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; 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.

---

Gustavo Albino Morales Iles

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gustavo Albino Morales Iles, bajo mi supervisión.

---

Ing. Patricio Estupiñán M. MSc.  
DIRECTOR DE PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme la sabiduría y el entendimiento.

A toda familia en especial a Luis Humberto, por su apoyo total e incondicional.

Al personal de GENERAL MOTORS, en especial Al Ing. Diego Rivadeneira, Gerente de Manufactura y Calidad, por las facilidades prestadas.

Al personal de ACINDEC, por su colaboración desinteresada.

Al personal de laboratorio de Metalografía, de manera especial al Ing. Patricio Estupiñán M, que además de ser un excelente director me brindo sus valiosos consejos.

***Gustavo***

## **DEDICATORIA**

A toda mi familia, en especial Gabrielita y Fanny por ser la fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mis amigos y conocidos.

***Gustavo***

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	ii
CERTIFICACIÓN .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
RESUMEN .....	xvii
PRESENTACIÓN.....	xviii

### CAPITULO 1

1. ESTUDIO DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS, ESPECIFICACIONES Y APLICACIONES.....	1
1.1. INTRODUCCION.....	1
1.2. LOS ACEROS INOXIDABLES .....	1
1.2.1. DEFINICIÓN <sup>15</sup> .....	1
1.3. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN <sup>13</sup> .....	2
1.4. RESEÑA HISTORICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES <sup>14</sup> .....	3
1.5. DIAGRAMAS DE FASE <sup>13</sup> .....	3
1.5.1. DIAGRAMA DE FASE HIERRO CROMO <sup>13</sup> .....	4
1.5.2. DIAGRAMA HIERRO-CROMO-CARBONO <sup>13</sup> .....	5
1.5.3. DIAGRAMA HIERRO-CROMO-NICKEL <sup>13</sup> .....	5
1.6. ELEMENTOS ALEANTES DE LOS ACEROS INOXIDABLES <sup>14</sup> .....	7
1.6.1. CROMO .....	8
1.6.2. NÍQUEL.....	9
1.6.3. MANGANESO.....	9
1.6.4. SILICIO .....	10
1.6.5. MOLIBDENO.....	10
1.6.6. ELEMENTOS FORMADORES DE CARBURO <sup>13</sup> .....	10
1.7. DIAGRAMAS DE CONSTITUCION.....	11
1.7.1. DIAGRAMA DE SCHAEFFLER <sup>13</sup> .....	11

1.7.2. DIAGRAMA DELONG <sup>13</sup> .....	12
1.8. DESIGNACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES <sup>15</sup> .....	13
1.9. CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES <sup>13</sup> .....	13
1.9.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS <sup>13</sup> .....	14
1.9.2. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS. <sup>13</sup> .....	30
1.9.3. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS. <sup>13</sup> .....	31
1.9.4. ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX. <sup>13</sup> .....	31
1.9.5. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN <sup>13</sup> .....	32

## CAPITULO 2

2. ESTUDIO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA DE PUNTOS Y LA SOLDABILIDAD EN EL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO.....	33
2.1. PRINCIPIO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA .....	33
2.2. PARAMETROS DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA POR PUNTOS (RSW).....	33
2.2.1. PRESIÓN (FUERZA/AREA EN LOS ELECTRODOS).....	34
2.2.2. CORRIENTE DE SOLDADURA.....	34
2.2.3. TIEMPO DE SOLDADURA .....	35
2.3. CICLO DE SOLDADURA EN RSW.....	36
2.4. EQUIPO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA.....	37
2.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE SOLDADURA POR RESISTENCIA.....	38
2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE RSW. <sup>18</sup> .....	40
2.5.1. VENTAJAS.....	40
2.5.2. DESVENTAJAS .....	40
2.6. EFECTO SHUNT. <sup>24</sup> .....	40
2.7. PRUEBAS MECANICAS. <sup>24</sup> .....	41
2.7.1. PRUEBAS ESTÁTICAS. ....	41
2.7.2. PRUEBAS DINÁMICAS .....	43
2.7.3. PRUEBAS DE TORSION.....	45
2.7.4. PRUEBAS DE TALLER .....	45
2.7.5. ENSAYO METALOGRAFICO .....	48

2.8. DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA .....	48
2.8.1. CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES .....	48
2.9. SOLIDIFICACIÓN DEL MATERIAL BASE EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA .....	54
2.10. SOLDADURA POR RESISTENCIA DE ACEROS INOXIDABLES AUTENITICOS. ....	56
2.11. DIAGRAMA LOBE. <sup>24</sup> .....	57
2.12. INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS EQUIPOS DE SOLDADURA RSW, EN LA CALIDAD DE SOLDADURA.....	57
2.13. CONDICIONES SUPERFICIALES DE LOS METALES A SOLDAR .....	58
2.14. CALIDAD DE LA SOLDADURA. <sup>3</sup> .....	58
2.15. CUIDADOS A TENER EN RSW .....	59

### CAPITULO 3

3. PROCESO EXPERIMENTAL .....	60
3.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS .....	61
3.1.1. TAMAÑO DE LAS PROBETAS.....	61
3.2. SELECCIÓN DEL ELECTRODO.....	62
3.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ELECTRODO.....	62
3.2.1.1. GRUPO A: ALEACIONES A BASE DE COBRE. <sup>3</sup> .....	63
3.2.1.2. GRUPO B: METAL REFRACTARIO Y COMPONENTES DE METAL REFRACTARIO. <sup>3</sup> .....	64
3.2.1.3. GRUPO C: MATERIALES ESPECIALES. <sup>3</sup> .....	64
3.2.2. TIPOS DE ELECTRODOS PARA SOLDADURA POR RESISTENCIA POR PUNTOS. <sup>4</sup> .....	65
3.2.3. TIPO DE PUNTA O NARIZ .....	66
3.2.4. DESIGNACIÓN DE LOS ELECTRODOS .....	67
3.2.5. ELECTRODO SELECCIONADO .....	67
3.2.6. ALINEACION DE LOS ELECTRODOS. <sup>24</sup> .....	68
3.2.7. EMPRESAS PROVEEDORAS DE ELECTRODOS PARA RSW .....	70
3.2.8. FUNCIONES PRINCIPALES DE UN ELECTRODO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA.....	70



3.2.9. LA VIDA DEL ELECTRODO.....	71
3.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO .....	72
3.3.1. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE RSW DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE SOLDADURA DE INGENIERIA MECÁNICA. .	72
3.3.2. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE RSW PROPORCIONADO POR LA EMPRESA PRIVADA .....	72
3.4. PRUEBAS DE SOLDADURA .....	73
3.5. PARAMETROS DE CALIFICACION PARA LA SOLDADURA .....	73
3.5.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	73
3.5.2. ANGULO DE DISTORSIÓN. <sup>5</sup> .....	74
3.5.3. PRUEBAS DESTRUCTIVAS .....	75
3.5.4. TAMAÑO DEL PUNTO SOLDADURA.....	77
3.5.5. PORCENTAJE DE INDENTACIÓN. <sup>5</sup> .....	79
3.6. PUNTO DE SOLDADURA IDEAL.....	79

## CAPITULO 4

4. ENSAYOS REALIZADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	80
4.1. CRITERIO DE CALIFICACIÓN .....	80
4.1.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	80
4.1.2. MEDICION DEL ANGULO DE DISTORCION.....	80
4.1.3. ENSAYO DE DESGARRE Y DEL CINCEL.....	81
4.1.4. ENSAYO METALOGRAFICO .....	81
4.1.5. TAMAÑO DEL PUNTO DE SOLDADURA .....	81
4.1.6. PORCENTAJE DE INDENTACIÓN .....	81
4.2. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL EQUIPO DE RSW DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE SOLDADURA DE INGENIERIA MECÁNICA. ....	84
4.2.1. PROBETAS UTILIZADAS.....	84
4.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLDADURA. ....	84
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL EQUIPO DE RSW DE LA EMPRESA PRIVADA.....	89
4.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 1.0 MM DE ESPESOR .....	89

4.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 1.5 MM DE ESPESOR .....	91
4.3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 2.0 MM DE ESPESOR .....	94
4.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 2.5 MM DE ESPESOR .....	96
4.3.5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 3.0 MM DE ESPESOR .....	99
4.4. ANALISIS DE RESULTADOS. ....	101

## CAPITULO 5

5.1. CONCLUSIONES. ....	102
5.2. RECOMENDACIONES. ....	103
BIBLIOGRAFIA .....	105

## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1

Figura 1. 1. Diagrama de fase Fe-Cr <sup>13</sup> .....	4
Figura 1. 2. Efecto del carbono en la expansión del bucle gamma. <sup>12</sup> .....	5
Figura 1. 3. Proyecciones liquidus y solidus del diagrama ternario Fe-Cr-Ni <sup>13</sup> .....	7
Figura 1. 4. Efecto del incremento de elementos aleantes en la formación de la ferrita delta <sup>14</sup> .....	8
Figura 1. 5. Diagrama de Schaeffler actualmente en uso. <sup>13</sup> .....	12
Figura 1. 6. Diagrama de DeLong mejorado. <sup>13</sup> .....	13
Figura 1. 7. Relación de tipo de solidificación del diagrama de fase pseudobinario. <sup>13</sup> .....	16
Figura 1. 8. Solidificación tipo A. Completamente austenítica. <sup>13</sup> .....	17
Figura 1. 9. Ejemplo de microestructura, con solidificación tipo A. <sup>13</sup> .....	17
Figura 1. 10. Esquema de la solidificación tipo AF. <sup>13</sup> .....	18
Figura 1. 11. Microestructura resultante en la zona de fusión de una solidificación tipo AF. <sup>13</sup> .....	18
Figura 1. 12. Esquema de la solidificación FA. (a) ferrita esquelética. (b) morfología lathy. ....	20
Figura 1. 13. Ejemplo de microestructura resultante en la zona de fusión de la solidificación FA. ....	20
Figura 1. 14. Esquema de la solidificación tipo F. (a) Ferrita acicular. (b) Ferrita y Austenita. <sup>13</sup> .....	21
Figura 1. 15. Microestructura resultante en la zona de fusión de una solidificación tipo F. <sup>13</sup> .....	22
Figura 1. 16. Fisuración debido a la presencia de cobre. <sup>13</sup> .....	24
Figura 1. 17. Esquema del efecto de la sensibilización de los aceros inoxidables austeníticos. <sup>17</sup> .....	25
Figura 1. 18. Muestra esquemática de la zona de sensibilización. <sup>17</sup> .....	26
Figura 1. 19. Zona donde se produce la sensibilización, el ataque KLA. <sup>13</sup> .....	28

## CAPITULO 2

Figura 2. 1. Esquema de una máquina de RSW.....	34
Figura 2. 2. Parámetros de soldadura por resistencia.....	36
Figura 2. 3. Sistema de enfriamiento de los electrodos.....	37
Figura 2. 4. Efecto Shunt. <sup>24</sup> .....	41
Figura 2. 5. Probeta utilizada para el ensayo de tracción.....	42
Figura 2. 6. Probetas para ensayo de tracción en cruz simple(a), en cruz con pestaña (b). <sup>24</sup> .....	43
Figura 2. 7. Probetas para tracción en U. <sup>24</sup> .....	43
Figura 2. 8. Esquema de la prueba de impacto. <sup>24</sup> .....	44
Figura 2. 9. Prueba del cincel. <sup>24</sup> .....	46
Figura 2. 10. Prueba de desgarre con alicate.....	47
Figura 2. 11. Prueba de desgarre con rodillo. ....	47
Figura 2. 12. Típicas discontinuidades internas producidas en el punto de soldadura. ....	49
Figura 2. 13. Expulsión de material fundido por los bordes de las placas.....	50
Figura 2. 14. Discontinuidades debido a la soldadura fuera de lugar. <sup>24</sup> .....	50
Figura 2. 15 Placas separadas a causa de la sobreindentación. ....	51
Figura 2. 16. Explosión interna en placas .....	51
Figura 2. 17. Expulsión en la superficie. <sup>24</sup> .....	52
Figura 2. 18. Fisura en la superficie de soldadura. <sup>24</sup> .....	53
Figura 2. 19. Distorsiones producidas durante la soldadura .....	53
Figura 2. 20. Estructura esquemática de un punto de soldadura ideal <sup>24</sup> .....	55
Figura 2. 21. Estructura esquemática de un punto de soldadura, con enfriamiento más rápido en los electrodos que en el metal base. <sup>24</sup> 55	55
Figura 2. 22. Estructura esquemática de punto de soldadura con enfriamiento rápido a través del metal base y deficiente en los electrodos. <sup>24</sup> .....	56
Figura 2. 23. Diagrama lobe.....	57

## CAPITULO 3

Figura 3. 1. Procedimiento del desarrollo experimental. ....	60
Figura 3. 2. Dimensiones de las probetas en base a diferentes normas. <sup>24</sup> .....	61
Figura 3. 3. Tamaño de probeta seleccionado para realizar las pruebas.....	62

Figura 3. 4. Capsula MA25Z00 utilizadas en las pruebas. ....	68
Figura 3. 5. Alineación de los electrodos. <sup>24</sup> .....	69
Figura 3. 6. Punto de soldadura elíptico producido por un .....	69
Figura 3. 7. Punto de soldadura producido por electrodos desalineados angularmente. ....	70
Figura 3. 8. Electrodo con vida útil cumplida. ....	71
Figura 3. 9. Angulo de distorsión permitido. <sup>5</sup> .....	74
Figura 3. 10. Herramientas necesarias para los ensayos de taller. ....	75
Figura 3. 11. Forma de realizar la prueba de desgarre. ....	76
Figura 3. 12. Resultado de la prueba de desgarre. ....	76
Figura 3. 13. Prueba del cincel. <sup>21</sup> .....	77
Figura 3. 14. Formas de medir el diámetro del punto de soldadura. <sup>5</sup> .....	78
Figura 3. 15. Indentación en un punto de soldadura. <sup>5</sup> .....	79

## CAPITULO 4

Figura 4. 1. Proceso seguido en la calificación de las pruebas de soldadura. ....	83
Figura 4. 2. Probetas utilizadas en las pruebas de soldadura por resistencia de puntos con.....	84
Figura 4. 3. Punto de soldadura en la probeta de 1 mm. ....	88
Figura 4. 4. Punto de soldadura en la .....	88
Figura 4. 5. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1 mm a 10x. .	88
Figura 4. 6. Punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm. ....	88
Figura 4. 7. Punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm a 5x.....	88
Figura 4. 8. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1 mm a 10x. ...	88
Figura 4. 9. Punto de soldadura en la probeta de 2 mm. ....	88
Figura 4. 10. Punto de soldadura en la probeta de 2 mm a 5x.....	88
Figura 4. 11. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2 mm a 10x. ....	88
Figura 4. 12. Diagrama lobe para 1.0 mm de espesor. ....	89
Figura 4. 13. Probetas de 1.0 mm, después de haber realizado el ensayo de desgarre y cincel. ....	90

Figura 4. 14. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1.0 mm (10x) .....	90
Figura 4. 15. Parámetros seleccionados para la probeta de 1.0 mm .....	91
Figura 4. 16. Diagrama lobe para 1.5mm de espesor .....	92
Figura 4. 17. Probetas de 1.5 mm, después de realizado el ensayo de pelado y de cincel. ....	93
Figura 4. 18. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm (10x) .....	93
Figura 4. 19. Parámetros seleccionados para la probeta de 1.5 mm .....	93
Figura 4. 20. Diagrama lobe para 2.0 mm de espesor .....	94
Figura 4. 21. Probetas de 2.0 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel. ....	95
Figura 4. 22. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2.0 mm (10x) .....	95
Figura 4. 23. Parámetros seleccionados para la probeta de 2.0 mm. ....	96
Figura 4. 24. Diagrama lobe para 2.5 mm de espesor .....	97
Figura 4. 25. Probetas de 2.5 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel. ....	98
Figura 4. 26. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2.5 mm (10x) .....	98
Figura 4. 27. Parámetros seleccionados para la probeta de 2.5 mm. ....	98
Figura 4. 28. Diagrama lobe para 3.0 mm de espesor .....	99
Figura 4. 29. Probetas de 3.0 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel. ....	100
Figura 4. 30. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 3.0 mm (10x) .....	100
Figura 4. 31. Parámetros seleccionados para la probeta de 3.0 mm. ....	101

## INDICE DE TABLAS

### CAPITULO 1

Tabla 1. 1. Composición química de los aceros inoxidable <sup>6</sup> .....	14
Tabla 1. 2. Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes <sup>13</sup> .	16
Tabla 1. 3 Propiedades del acero inoxidable 304 <sup>26</sup> .....	23
Tabla 1. 4. Composición química del acero inoxidable 304 <sup>26</sup> .....	24
Tabla 1. 5. Estructuras cristalinas y precipitados de los aceros inoxidables austeníticos. <sup>6</sup> .....	29

### CAPITULO 3

Tabla 3. 1. Clasificación de los electrodos para soldadura por resistencia mediante su composición química. <sup>4</sup> .....	62
Tabla 3. 2. Materiales recomendados para la soldadura de materiales similares. <sup>4</sup> .....	65
Tabla 3. 3. Tabla de interpretación. <sup>4</sup> .....	65
Tabla 3. 4. Configuraciones de la puntas de los electrodos. ....	66
Tabla 3. 5. Características del equipo RSW del laboratorio de Soldadura.....	72

### CAPITULO 4

Tabla 4. 1. Parámetros utilizados en la soldadura de las probetas que se muestran en la figura 4.2.....	85
Tabla 4. 2. Resultados obtenidos en la probeta de 1.0 mm de espesor.....	85
Tabla 4. 3. Resultados obtenidos en la probeta de 1.5 mm de espesor.....	86
Tabla 4. 4. Resultados obtenidos en la probeta de 2.0 mm de espesor.....	86
Tabla 4. 5. Resultados obtenidos en la probeta de 3.0 mm de espesor.....	87
Tabla 4. 6. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 1.0 mm .....	89
Tabla 4. 7. Resultados obtenidos en la probeta de 1.0 mm de espesor.....	90
Tabla 4. 8. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 1.5 mm .....	91
Tabla 4. 9. Resultados obtenidos en la probeta de 1.5 mm de espesor.....	92

Tabla 4. 10. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 2.0 mm .....	94
Tabla 4. 11. Resultados obtenidos en la probeta de 2.0 mm de espesor.....	95
Tabla 4. 12. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 2.5 mm .....	96
Tabla 4. 13. Resultados obtenidos en la probeta de 2.5 mm de espesor.....	97
Tabla 4. 14. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 3.0 mm .....	99
Tabla 4. 15. Resultados obtenidos en la probeta de 3.0 mm de espesor.....	100



## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio de la soldadura por resistencia de puntos en aceros inoxidable austeníticos del tipo 304 de hasta 3 mm de espesor, el cual está destinado a buscar los parámetros reales que intervienen en este proceso y así lograr una soldadura de buena calidad.

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario dividirlo en cinco etapas: La primera etapa consistió en la búsqueda de bibliografía y literatura referente a los aceros inoxidables, el proceso de la soldadura por resistencia, las pruebas y ensayos para la calificación de la soldadura.

La segunda etapa consistió en la búsqueda del acero inoxidable austenítico 304 y del electrodo requerido para la soldadura de este tipo de aceros; En esta etapa se realizó además la búsqueda de proveedores de los electrodos tanto en empresas locales como extranjeras.

La tercera etapa fue la búsqueda de dos equipos de soldadura por resistencia de puntos; Equipos necesarios para realizar las pruebas de soldadura y poder así realizar una comparación entre ellos.

La cuarta etapa consistió en la realización de las pruebas de soldadura en los dos equipos de soldadura encontrados, con el objetivo de recalcar la importancia de cada uno de los parámetros que intervienen en este proceso de soldadura.

Finalmente la quinta etapa consiste en realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos tanto con el primer equipo de soldadura como con el segundo equipo de soldadura, para luego poner a disposición de la industria Ecuatoriana los parámetros de soldadura encontrado para los diferentes espesores.

## **PRESENTACIÓN**

La soldadura por resistencia hoy en día es uno de los procesos de gran importancia debido a sus crecientes campos de aplicación. Día tras día los investigadores han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar su eficiencia, rapidez y facilidad de maniobrabilidad del proceso tanto para equipos fijos como para portátiles.

Las primeras aplicaciones de la soldadura por resistencia estuvieron destinadas a los aceros al carbono, en el cual se obtuvo magníficos resultados. Sin embargo el desarrollo de nuevos materiales debidos a la tecnología moderna, obliga a buscar más campos de acción en donde se puede aplicar este proceso de soldadura, razón por la cual han realizando pruebas en distintos materiales como el aluminio y sus respectivas aleaciones, los aceros inoxidable, entre otros.

Razón por la cual el presente proyecto de titulación busca obtener parámetros reales de soldadura por resistencia de puntos en aceros inoxidable austeníticos, y así estar en la capacidad de ofrecer buenos resultados a la Industria Ecuatoriana, con el único objetivo de que la industria Ecuatoriana tome interés en el uso de este proceso de soldadura y se lo realice acorde con las normas existentes.

Finalmente se espera satisfacer las inquietudes del lector y haber contribuido en cierta forma con el desarrollo técnico científico de nuestro país.

## **CAPITULO 1**

# **1. ESTUDIO DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS, ESPECIFICACIONES Y APLICACIONES.**

### **1.1. INTRODUCCION**

El uso del acero al carbono en ambientes muy agresivos como ambientes cálidos-húmedos y salinos, provocan una corrosión acelerada en el acero convencional y consecuentemente su destrucción.

En el afán de encontrar nuevos materiales por el año de 1889, se dio la primera solución a este problema cuando se añadió Níquel al acero al carbono para reducir la corrosión. Desde aquel instante continuó la investigación en varios países hasta que se obtuvo como resultado el acero inoxidable y sus diferentes tipos muy utilizados en la actualidad.

La propiedad de inoxidable de estos aceros se da debido a que contienen cromo entre los intervalos del 10 al 30% en peso. El cromo es una material reactivo y se combina con el oxígeno del aire para formar una película que cubre a todo el acero inoxidable, esta película tiene la característica de ser muy adherente, densa (no porosa), insoluble, tenaz, autoregenerante e impermeable.

### **1.2. LOS ACEROS INOXIDABLES**

#### **1.2.1. DEFINICIÓN<sup>15</sup>**

Los aceros inoxidables son aleaciones compuestas de hierro (Fe), carbono (C) y cromo (Cr). La característica de inoxidable obedece a la formación de una película superficial de óxido rica en cromo y muy adherente; En la mayoría de los aceros inoxidables el contenido máximo de cromo es de alrededor del 30% y el contenido mínimo de hierro es del 50%. Normalmente, el carbono está presente en proporción de 0,03 por ciento hasta un máximo de 1,2 por ciento en ciertas calidades martensíticas.

Se adicionan otros elementos de aleación como son el níquel (Ni), Molibdeno (Mo), Titanio (Ti), Niobio (Nb) con el objeto de mejorar ciertas propiedades como son la ductilidad, la resistencia al impacto, resistencia a la fluencia, resistencia a la corrosión, al calor, etc.

### **1.3. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN<sup>13</sup>**

Los aceros inoxidable son susceptibles a ciertas formas de corrosión, razón por la cual se debe ser muy cuidadoso en la selección de los aceros inoxidable de acuerdo a su aplicación y el ambiente en que va a trabajar.

La corrosión por fisuras y por picadura son dos formas de corrosión localizadas que se pueden presentar en los aceros inoxidable.

La corrosión por picadura resulta de los cambios de composición localizadas en la película pasiva y es normalmente asociado con las características metalúrgicas de los aceros inoxidable como son el borde de grano y los componentes intermetálicos. La presencia de estas fallas, hace que la corrosión empiece a atacar por debajo de la película pasiva y como resultado se observa la presencia de una cavidad en la superficie del acero.

La corrosión por fisura se da cuando en un espacio confinado se da un cambio o alteración en la solución química del metal se puede dar por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no- metálico. Este tipo de corrosión se puede dar fácilmente en soluciones que contienen iones cloruros como el agua de mar.

La soldadura de un acero que tenga tendencia a la corrosión puede dar como resultado la formación de microestructuras que aceleren el proceso de corrosión. La falta de remoción de óxidos provenientes de la soldadura pueden reducir la resistencia a la corrosión.

La corrosión o ataque intergranular (IGA por sus siglas en Ingles) es el mecanismo de corrosión más crítico en los aceros inoxidable y es asociado al fenómeno conocido como fisuración por corrosión intergranular (IGSCC por sus

siglas en Ingles) y su ataque más común se da en la zona afectada por el calor de los aceros inoxidable austeníticos. Resulta de la condición metalúrgica llamada sensibilización, la que se da cuando precipitan carburos ricos en cromo en los bordes de grano, dejando zonas adyacentes con déficit de cromo, haciendo que estas zonas queden propensas al ataque de la corrosión.

Existe además un fenómeno conocido como fisuración por corrosión transgranular (TGSCC por sus siglas en Ingles) que se acelera en presencia de iones cloruros y también es un problema serio en los aceros inoxidable austeníticos como el 304L y 316L. Esta corrosión progresa a lo largo de ciertos planos de átomos en cada grano, es decir no tienen influencia en el borde de grano. En ocasiones pueden pasar de un grano a otro creando ramificaciones durante su avance.

#### **1.4. RESEÑA HISTORICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES<sup>14</sup>**

Como una clase de materiales, los aceros inoxidable aparte de ser considerados como la columna vertebral de la industria moderna desde que encontraron aplicaciones como en la industria química, generación de energía, En 1889 Riley of Glasgow descubrió que con una adición significativa de Nickel en los aceros dulces, estos incrementaban el esfuerzo a la tensión. En 1905 Portevin observo que aceros con contenido mayor al 9% de Cromo eran resistentes al ataque de los ácidos. Los primeros intentos de llevar los estudios de laboratorio de los aceros inoxidable a aplicaciones industriales reales se dieron entre los años de 1910 a 1915. Otros personajes que dieron gran aportación al descubrimiento de los aceros inoxidable están el Ingles Brearley en los aceros inoxidable martensíticos, los Estadounidenses Dansitzen y Beckert para los aceros inoxidable ferríticos y los Alemanes Maurer y Strauss para los aceros austeníticos.

#### **1.5. DIAGRAMAS DE FASE<sup>13</sup>**

Los diagramas de fase en equilibrio se usan para describir las transformaciones de fase y las fases estables presentes en los aceros inoxidable. Los diagramas

de fase se usan también para predecir el la evolución de la microestructura en los diferentes grados de los aceros inoxidable. Estos diagramas solo pueden aproximar la microestructura resultante proveniente de soldar aceros inoxidable con materiales de aporte que contengan hasta 10 elementos aleantes, ya que estos difícilmente pueden acomodarse en los diagramas de fase. Además los diagramas de fase están basados en condiciones de equilibrio.

### 1.5.1. DIAGRAMA DE FASE HIERRO CROMO<sup>13</sup>

El diagrama de fase hierro cromo se muestra en la figura 1.1, el diagrama muestra que existe solubilidad completa de cromo en hierro a elevadas temperaturas y una solidificación de todas las aleaciones de Fe-Cr en forma de ferrita.

El rango de solidificación de las aleaciones de Fe-Cr es muy estrecho. A baja concentraciones de cromo existe un bucle de austenita en los rangos de temperatura de 912 a 1394 °C (1670 a 2540 °F). Aleaciones con contenido de cromo mayor a 12.7% en peso serán completamente ferrita a elevadas temperaturas.

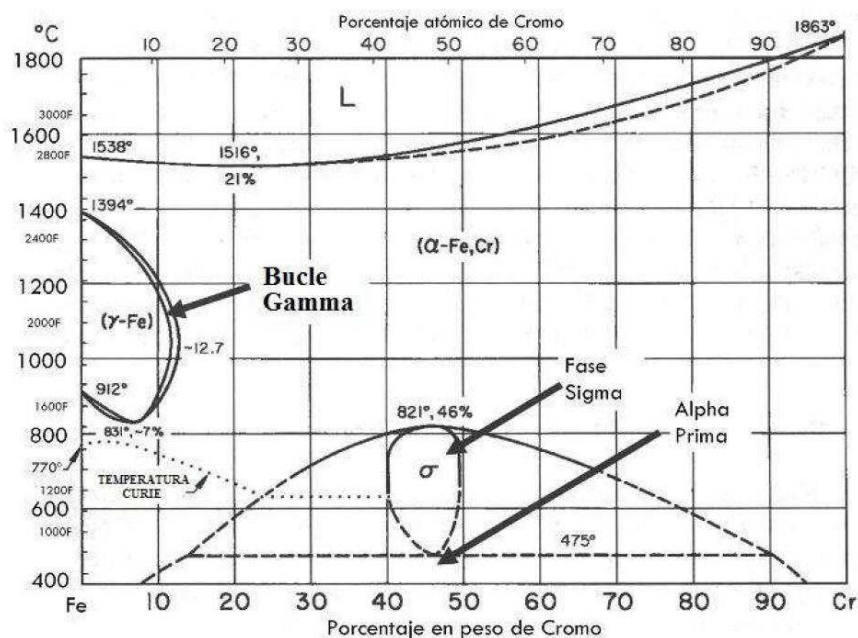


Figura 1. 1. Diagrama de fase Fe-Cr<sup>13</sup>

Aleaciones con menos del 12% en peso de cromo serán completamente austenita a temperaturas dentro del bucle gamma. Un rápido enfriamiento de esta austenita puede transformarse en martensita.

Existe además una fase denominada sigma, que se forma fácilmente en aleaciones que exceden el 20% en peso de cromo, la precipitación de esta a bajas temperaturas en el rango de 600 a 800 °C (1110 a 1470 °F) y requiere gran cantidad de tiempo para su formación. Esta fase es dura y frágil, y es indeseable su presencia en los aceros inoxidable.

En el diagrama se observa también una línea horizontal punteada dentro de la fase  $\sigma + \alpha$  presente a 475 °C (885 °F). Se trata de un precipitado denominado alfa- prima  $\alpha'$ . Este precipitado tiene la característica de fragilizar las aleaciones con contenido mayor a 14 % en peso de cromo.

### 1.5.2. DIAGRAMA HIERRO-CROMO-CARBONO<sup>13</sup>

La adición de carbono al sistema Fe-Cr altera y complica significativamente la fase de equilibrio. Debido a que el carbono es promotor de austenita este expandirá el bucle gamma, permitiendo que la austenita sea estable a elevadas temperaturas y con altos contenidos de cromo. El efecto del carbono en la expansión de campo de fase de austenita se muestra en la figura 1.2.

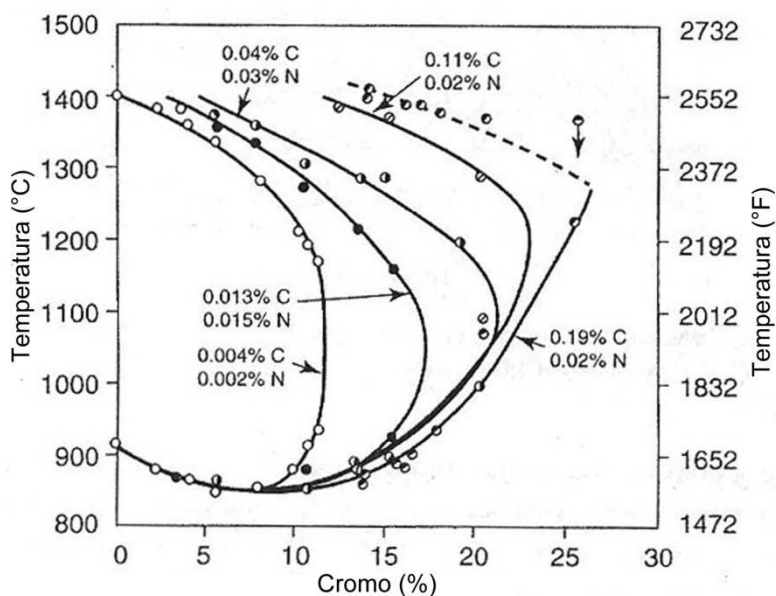


Figura 1. 2. Efecto del carbono en la expansión del bucle gamma.<sup>12</sup>

### 1.5.3. DIAGRAMA HIERRO-CROMO-NICKEL<sup>13</sup>

El sistema ternario Fe-Ni-Cr es la base para la formación de los aceros inoxidable austeníticos y dúplex. La figura 1.3a y 1.3b muestra las superficies de proyección liquidus y solidus del sistema ternario Fe-Ni-Cr.

Esta región separa la ferrita y la austenita en áreas separadas, mientras que la dirección de las flechas indica la disminución de la temperatura. Mientras que en la superficie de proyección liquidus se observa una línea gruesa que parte de un punto próximo al vértice rico en Fe hasta la composición 50%Cr-50%Ni; Esta línea separa las composiciones que solidifican como ferrita primaria (Arriba y a la izquierda) de las composiciones que solidifican como austenita primaria. Existe además un punto eutéctico aproximadamente en 48%Cr-44%Ni-8%Fe.



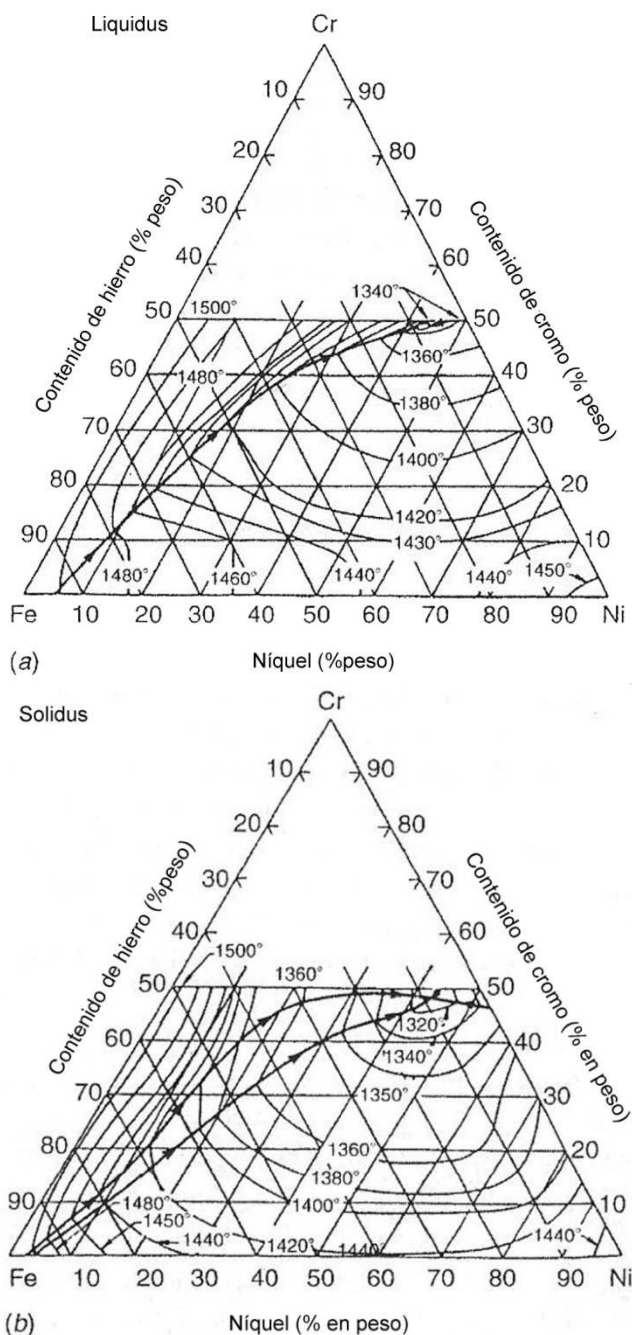


Figura 1. 3. Proyecciones liquidus y solidus del diagrama ternario Fe-Cr-Ni<sup>13</sup>

En la superficie de proyección solidus se observa dos líneas gruesas que nacen desde el vértice inferior izquierdo donde la aleación es rica en Fe y termina en un punto eutéctico ternario en (45 a 50)%Cr-(40 a 50)%Ni-(50 a 55)%Fe. En el área comprendida entre estas dos líneas, coexisten las dos fases ferrita y austenita.

## 1.6. ELEMENTOS ALEANTES DE LOS ACEROS INOXIDABLES<sup>14</sup>

Considerando al cromo y al níquel como los principales elementos aleantes de los aceros inoxidables, existen otros elementos que son añadidos, para modificar la

microestructura, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable.

La Figura 1.4 muestra, el comportamiento de los elementos aleantes como promotores de la ferrita delta, en una aleación que contiene 17% Cr and 4% Ni.

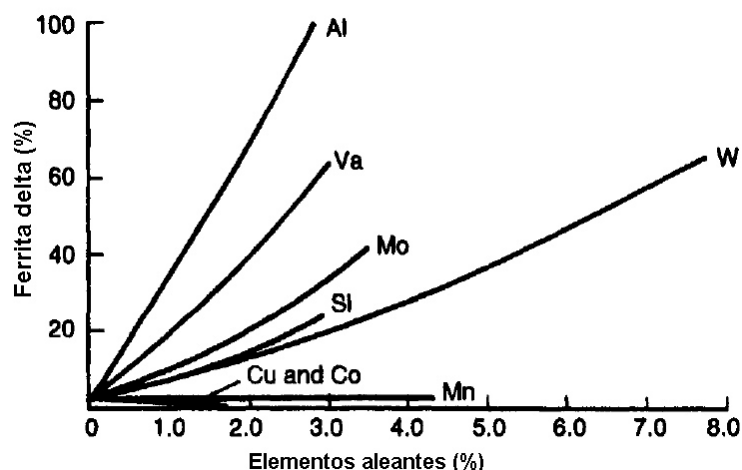


Figura 1. 4. Efecto del incremento de elementos aleantes en la formación de la ferrita delta<sup>14</sup>

Entre los principales elementos aleantes se tiene:

### 1.6.1. CROMO

El cromo es el elemento principal que ayuda a prevenir la corrosión en los aceros inoxidable inclusive en ambientes muy oxidantes como el ácido nítrico.

El cromo es el promotor de la ferrita, razón por lo cual aleaciones con contenidos mayores al 12% en peso de cromo son aleaciones 100% ferritas, en estas aleaciones el cromo estabiliza la microestructura.

El cromo además es el causante de la formación de carburos como el  $M_{23}C_6$ , donde M está predominado por el cromo, pero puede tener fracciones de Hierro y molibdeno.

El cromo combinado con nitrógeno forma nitruros como el  $Cr_2N$ , los que se observan tanto en los aceros inoxidable ferríticos como en los dúplex, además el cromo es el elemento principal para la formación de compuestos intermetálicos, varios de los cuales son causantes de fragilizar al acero inoxidable.

La presencia de altos contenidos de cromo en aleaciones ferríticas puede dar como resultado una reducción drástica en la dureza y la ductilidad principalmente

cuando se encuentren presentes el carbono y el nitrógeno; Cuando exista altos contenidos de cromo en las aleaciones ferríticas y se vaya a utilizar en la fabricación por soldadura, estas se deben tratar cuidadosamente o a su vez reducir los contenidos de carbono y nitrógeno para obtener unas propiedades mecánicas aceptables.

### **1.6.2. NÍQUEL**

Su función principal es originar el predominio de la fase austenítica, por lo que mejora las propiedades mecánicas y mejora también la resistencia a la corrosión. Una suficiente adición de níquel, podrá expandir ampliamente el campo de la fase austenítica que es estable a temperatura ambiente o incluso bajo ella.

El níquel no es un gran formador de carburos ni de compuestos intermetálicos. Existen evidencias de que la presencia de níquel en aleaciones ferríticas mejora la resistencia a la corrosión en general, particularmente en ambientes reductores como la presencia de ácido sulfúrico.

El níquel ha sido asociado con la reducción de la resistencia al esfuerzo de corrosión por agrietamiento, en ambientes con presencia de cloro.

### **1.6.3. MANGANESO**

El manganeso es añadido a casi todos los aceros. En los aceros inoxidables austeníticos se encuentra presente en un rango de 1 al 2% en porcentaje en peso, mientras que en la clase ferrítica y martensítica es normal que se encuentre en rango menor al 1% en peso.

El manganeso actúa como promotor y estabilizador de la austenita y tiene gran afinidad por el níquel.

El Manganeso es un gran estabilizador de la fase austenita a bajas temperaturas, ayudando a prevenir la transformación a martensita.

El manganeso interactúa con el azufre en el acero inoxidable para formar sulfuro manganeso, la morfología y composición de estos sulfuros afecta a la resistencia a la corrosión.

El manganeso inclusive puede aumentar la insolubilidad del nitrógeno en la austenita.

En ocasiones el manganeso es añadido en aleaciones especiales para incrementar la solubilidad del nitrógeno en la fase austenítica.

#### **1.6.4. SILICIO**

El silicio es un elemento alfégeno, debido a que favorece la formación y estabilización de la ferrita y, por consiguiente la formación de la fase sigma en los aceros ferríticos con contenido de cromo del 25 al 30 %, y en los aceros inoxidable austeníticos con contenido de cromo superior al 19%.

Incrementa la resistencia en caliente y disminuye la resistencia a la corrosión intergranular, especialmente en los aceros que contienen molibdeno.

Favorece la formación de las estructuras bifásicas ( $\alpha + \gamma$ ).

Amplía los intervalos de composición y temperatura en que resulta estable la fase sigma.

#### **1.6.5. MOLIBDENO**

El molibdeno es un elemento alfégeno y es añadido a la mayoría de los aceros inoxidable. En tipos ferríticos, austeníticos y dúplex, el molibdeno es añadido en cantidades superiores al 6% o más, con el objetivo de mejorar la resistencia a la corrosión por picadura y la corrosión por hendidura.

El molibdeno es un elemento promotor para la formación y retención de la ferrita, dicha característica puede ser un gran problema en los aceros inoxidable martensíticos, donde la ferrita residual a temperatura ambiente reduce la resistencia mecánica y la ductilidad de acero.

El molibdeno en combinación con el cromo es muy efectivo en términos de estabilización de la película pasiva, cuando exista la presencia de cloruros.

El molibdeno en los aceros inoxidable austeníticos aumenta la resistencia mecánica a elevadas temperaturas, lo que podría dar un efecto negativo cuando se vaya a trabajar en caliente.

Cuando el contenido de Molibdeno pasa de 1 al 3% para un mismo contenido de cromo, se debe incrementar la cantidad de níquel al 4% para conservar la fase austenítica.

#### **1.6.6. ELEMENTOS FORMADORES DE CARBURO<sup>13</sup>**

A parte del cromo y molibdeno, existen otros elementos formadores de carburos como son: niobio, titanio, tungsteno, tantalio y vanadio.

El niobio y el tantalio son añadidos en los aceros inoxidable austeníticos para la estabilización del carbono y evitar la corrosión intergranular.

El tungsteno, tantalio y vanadio son añadidos en algunos aceros inoxidable especiales para proveer la resistencia a elevadas temperaturas mediante la formación de una fina dispersión de carburos. Estos elementos tienden a promover la ferrita en la microestructura toda vez que ellos atrapan al carbono y neutralizan efectivamente este poderoso promotor de austenita.

## **1.7. DIAGRAMAS DE CONSTITUCION**

Los diagramas de constitución ayudan a la predecir el comportamiento de la soldadura de los aceros inoxidable. La realización de estos diagramas han tomado un esfuerzo considerable a los investigadores durante los últimos 75 años. Gran parte de este estudio ha sido enfocado a los efectos de composición en la microestructura de la soldadura.

### **1.7.1. DIAGRAMA DE SCHAEFFLER<sup>13</sup>**

Anton Schaeffler obtuvo su primer diagrama de manera empírica en el año de 1947, a partir del cual fue mejorando hasta obtener el hoy conocido como diagrama de Schaeffler y se muestra en la figura 1.5. Este diagrama permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición y además ayuda a predecir la estructura del metal de soldadura obtenido.

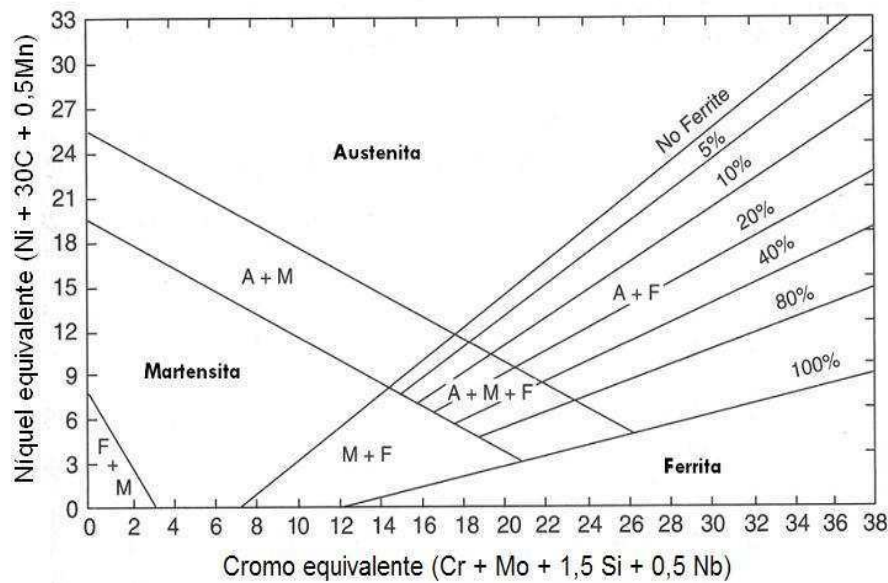


Figura 1. 5. Diagrama de Schaeffler actualmente en uso.<sup>13</sup>

El diagrama de Schaeffler muestra el dominio de las fases ferrítica, martensítica y austenítica propias de los aceros inoxidable cuando son enfriados a las velocidades de soldadura.

Usando las relaciones equivalentes del diagrama de Schaeffler ( $Cr_{eq}$  y  $Ni_{eq}$ ), Seferian desarrolló una expresión para calcular la cantidad de ferrita delta presente en el metal de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos.

$$\text{Ferrita delta} = 3(Cr_{eq} - 0.93Ni_{eq} - 6.7)$$

### 1.7.2. DIAGRAMA DELONG<sup>13</sup>

El diagrama DeLong mejorado se presenta en la figura 1.6; Las mejoras realizadas al diagrama original mejora la habilidad para predecir la ferrita delta. Pero el gran cambio que se realizó en el primer diagrama fue la creación de un número-escala de la ferrita (FN). Este término resultó de la dificultad que existía para cuantificar la cantidad de ferrita por volumen de acero inoxidable soldado. Los valores del FN se basan en mediciones magnéticas, las cuales son posibles debido a que la ferrita delta tiene una estructura BCC y la austenita no.

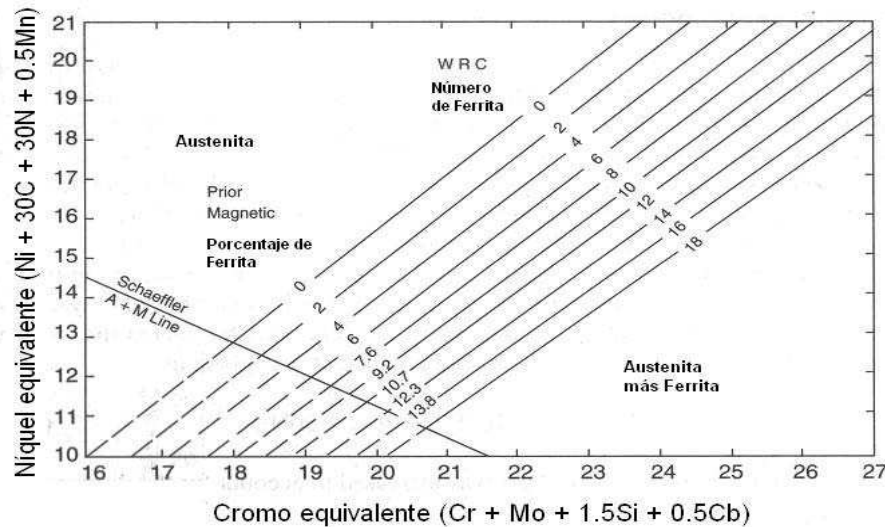


Figura 1. 6. Diagrama de DeLong mejorado.<sup>13</sup>

Las unidades FN no relacionan directamente el porcentaje de ferrita, sin embargo valores menores a 10 se consideran que tendrán un porcentaje de ferrita similar. En el año de 1973, el subcomité de investigación de la soldadura en aceros inoxidables adoptó el FN como medidor de la cantidad de ferrita, y los métodos de calibración está especificado en las normas AWS A4.2 e ISO 8249.

## 1.8. DESIGNACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES<sup>15</sup>

Los aceros inoxidables se denominan mediante dos nomenclaturas la AISI (American Iron and Steel Institute) y la UNS (Uniform Numbering System), la primera es la más utilizada y consiste en un número de 3 dígitos que representa a las calidades austeníticas serie 200 y 300, calidades ferríticas o martensíticas serie 400. Mientras que la segunda denominación es la más actual y abarca incluso a los aceros inoxidables recientemente descubiertos pero es de muy poco uso, consiste en la letra S seguida de un número de cinco dígitos, los tres primeros dígitos corresponden a la denominación AISI, y los dos últimos dígitos significan modificación a la calidad, en donde "00" significa acero inoxidable sin modificación.

## 1.9. CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES<sup>13</sup>

Los aceros inoxidables se dividen en cinco grupos:

Aceros inoxidable austeníticos (2XX, 3XX)

Aceros inoxidable ferríticos (4XX)

Aceros inoxidable martensíticos (4XX)

Aceros inoxidable dúplex (Austenita y ferrita)

Aceros inoxidable endurecidos por precipitación (PH)

Los tipos de aceros inoxidable dependen del tipo y la cantidad de elementos aleantes que contengan. La tabla 1.1 muestra los elementos aleantes de los diferentes grupos de aceros inoxidable.

Tabla 1. 1. Composición química de los aceros inoxidable<sup>6</sup>.

Grupo	C	Si (máx.)	Mn (máx.)	Cr	Mo (máx.)	Ni	Cu	Nb	Ti	Al	V	N	S
<b>Ferríticos</b>	≤0.1	1	1	15-18	2	≤1		+	+	+			
<b>Martensíticos</b>	0.1-1.2	1	1.5	12-18	1.2	≤2.5					+		+
<b>Austeníticos</b>	≤0.1	1	2	17-26	5	7-26	2.2 máx.	+	+			+	+
<b>Austeníticos – Ferríticos</b>	≤0.1	1	2	24-28	2	4-7.5		+					

### 1.9.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS<sup>13</sup>

Constituyen el mayor grupo dentro de la gran familia de aceros inoxidable, por ello se fabrican anualmente la mayor cantidad de toneladas respecto al resto. Tienen una buena resistencia a la corrosión en la mayoría de ambientes y suele ser mejor que la de los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos.

Los aceros inoxidable austeníticos tienen resistencias mecánicas equivalentes al acero dulce, aproximadamente 210 MPa (30 Ksi) de resistencia a la fluencia a temperatura ambiente; Sufren endurecimiento al ser trabajados en frío y son difíciles de maquinar.

Tienen buena tenacidad a bajas temperaturas debido a ello son ampliamente utilizados en aplicaciones criogénicas. La temperatura de servicio pueden ser del orden de 760 °C (1400 °F) y aun mayores, pero se pueden ver afectadas tanto la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión a altas temperaturas.



Los elementos aleantes de los aceros inoxidable austeníticos y sus respectivos rangos se presentan a continuación:

- 16 hasta 25% en peso de cromo
- 8 hasta 20% en peso de níquel
- 1 hasta 2% en peso de manganeso
- 0.5 hasta 3% en peso de silicio
- 0.02 hasta 0.08% en peso de carbono (<0.04% en peso se designan con grado L)
- 0 hasta 2% en peso de molibdeno
- 0 hasta 0.15% en peso de nitrógeno
- 0 hasta 0.2% en peso de titanio y niobio

Los aceros inoxidable 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.

#### **1.9.1.1. Metalurgia física y mecánica de los aceros inoxidable austeníticos.**

Los aceros inoxidable austeníticos son conformados por procesos térmico-mecánicos, con el objetivo de obtener la estructura principal denominada austenita.

#### **1.9.1.2. Metalurgia de la soldadura<sup>13</sup>**

La microestructura a temperatura ambiente de la zona de fusión de los aceros inoxidable austeníticos es dependiente 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.

#### **1.9.1.3. Evolución de la microestructura en la zona de fusión.<sup>13</sup>**

Los modos de solidificación de aceros inoxidable austeníticos son controlados por la fase primaria del proceso y por las transformaciones en el estado sólido, que están asociados a la composición de la aleación, expresada por la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ . Hay 4 tipos de solidificación y transformaciones de estado sólido

posibles para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos. Estas reacciones se muestran en la en la tabla 1.2.

Tabla 1. 2. Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes<sup>13</sup>

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

La figura 1.7, muestra como 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 como ferrita delta como la fase primaria. El resto de solidificaciones y las consiguientes modificaciones microestructurales ocurren en los estados FA y F, debido a la inestabilidad de la ferrita a bajas temperaturas.<sup>13</sup>

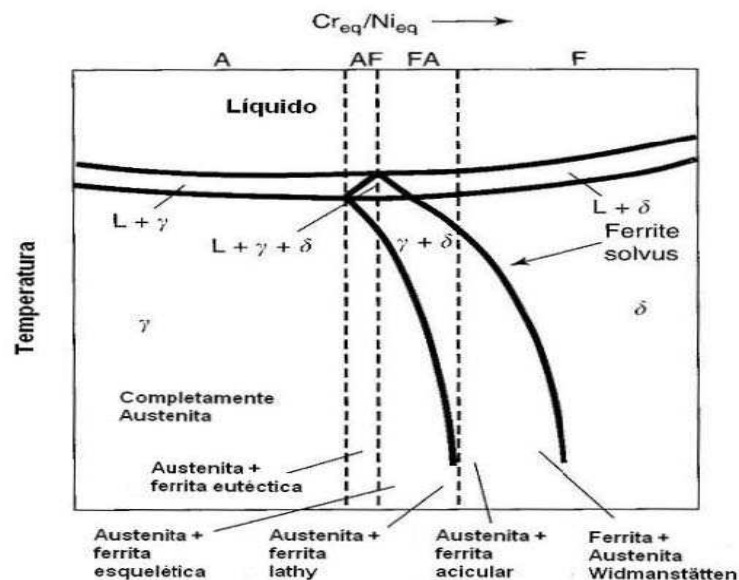


Figura 1. 7. Relación de tipo de solidificación del diagrama de fase pseudobinario.<sup>13</sup>

### 1.9.1.3.1 Solidificación Tipo A: Solidificación completamente Austenítica.<sup>2,13</sup>

Ocurre cuando  $Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,25$  e involucra a la transformación total del líquido en austenita. Si la estructura es completamente austenítica al final de la solidificación, esta se mantendrá hasta la temperatura ambiente y mostrará una estructura bien definida cuando sea observada metalográficamente.

La figura 1.8 muestra la forma esquemática de la solidificación tipo A, mientras que la figura 1.9 muestra un ejemplo de microestructura en donde se aprecia que la solidificación presenta formaciones de dendritas y células.

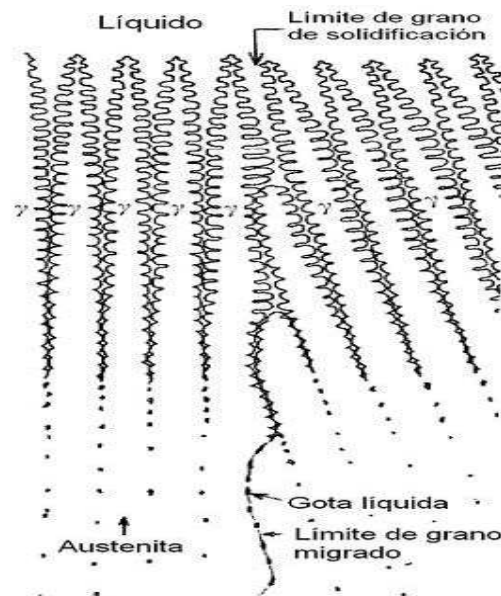


Figura 1. 8. Solidificación tipo A. Completamente austenítica.<sup>13</sup>

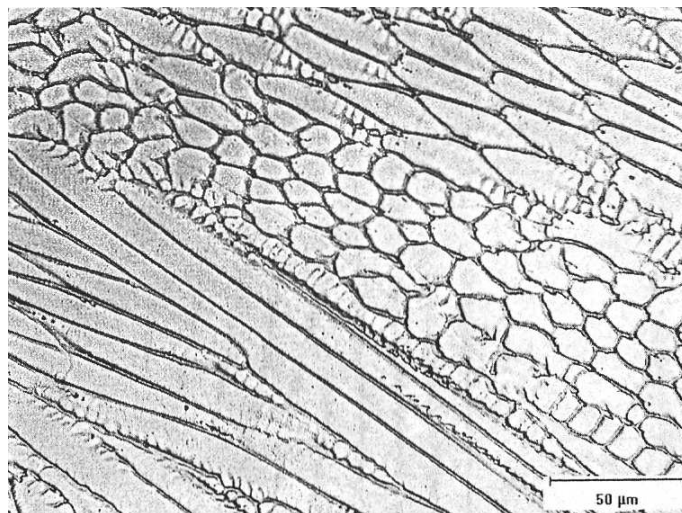


Figura 1. 9. Ejemplo de microestructura, con solidificación tipo A.<sup>13</sup>

### 1.9.1.3.2 Solidificación Tipo AF.<sup>2,13</sup>

Esta solidificación se da cuando la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  se encuentre en los rangos de 1,25 a 148, e involucra a la formación austenita y ferrita al final del proceso.

Durante la soldadura, la solidificación se inicia con la formación de austenita y el líquido remanente que contiene elementos promotores de ferrita (Cr y Mo) pueden alterar su composición formando ferrita en las regiones interdendríticas en los diferentes estados finales de la solidificación.

La figura 1.10 muestra un esquema de la solidificación tipo AF, mientras que la figura 1.11 muestra un ejemplo de la microestructura que exhibe la solidificación de la ferrita en los límites de sub grano.

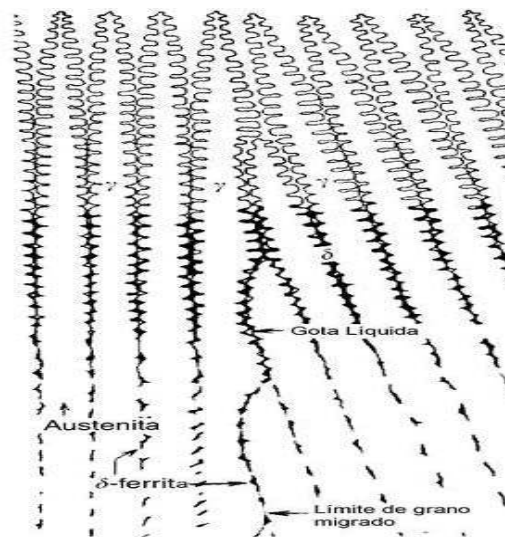


Figura 1. 10. Esquema de la solidificación tipo AF.<sup>13</sup>

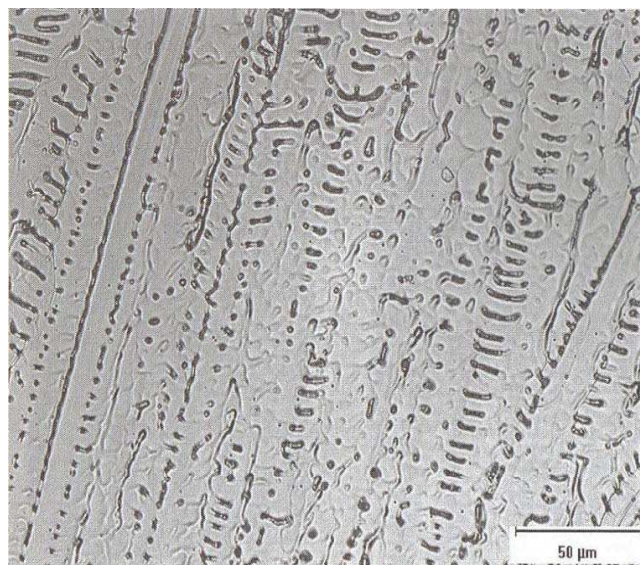


Figura 1. 11. Microestructura resultante en la zona de fusión de una solidificación tipo AF.<sup>13</sup>

### 1.9.1.3.3 Solidificación Tipo FA.<sup>13</sup>

Esta solidificación se da cuando  $1,48 < Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,95$  y permite formar al final del proceso ferrita y austenita; La austenita se forma por la reacción peritética – eutéctica y se da en los límites de grano de la ferrita. La solidificación se inicia a partir de la formación de ferrita como fase primaria.

Con la evolución de la solidificación durante el enfriamiento, el líquido remanente es enriquecido con elementos estabilizadores de austenita. Tal fenómeno lleva a ese líquido a transformarse en austenita. Así, en la microestructura final, la fase primaria permanece en el núcleo de los ramos dendríticos, con forma vermicular, envuelta por la austenita, la que se muestra esquemáticamente en la figura 1.12a y en la micrografía en la figura 1.12b.

Se observa además que la ferrita remanente de la transformación se torna más rica en cromo y más pobre en níquel en comparación con los tenores antes de la transformación.

Cuando las tasas de enfriamiento son altas y la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  se encuentran dentro del rango de la solidificación FA, resulta la formación de una ferrita alargada (lathy ferrite), en lugar de la ferrita esquelética debido a la restricción de la difusión durante la transformación ferrita austenita.

Cuando las distancias de difusión se reducen es más eficiente para la transformación proceder por espacios delgados y largos, como resultado se obtendrá una ferrita que cruza las formaciones dendríticas o la dirección de crecimiento de las células, lo que se muestra esquemáticamente en la figura 1.13a y en la Figura 1.13b se muestra un ejemplo de microestructura de esta solidificación.

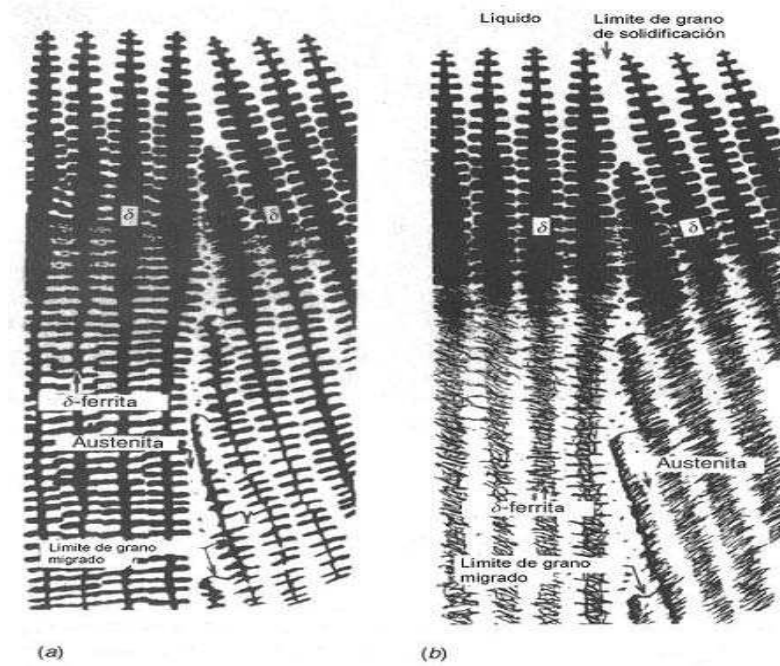


Figura 1. 12. Esquema de la solidificación FA. (a) ferrita esquelética. (b) morfología lathy.

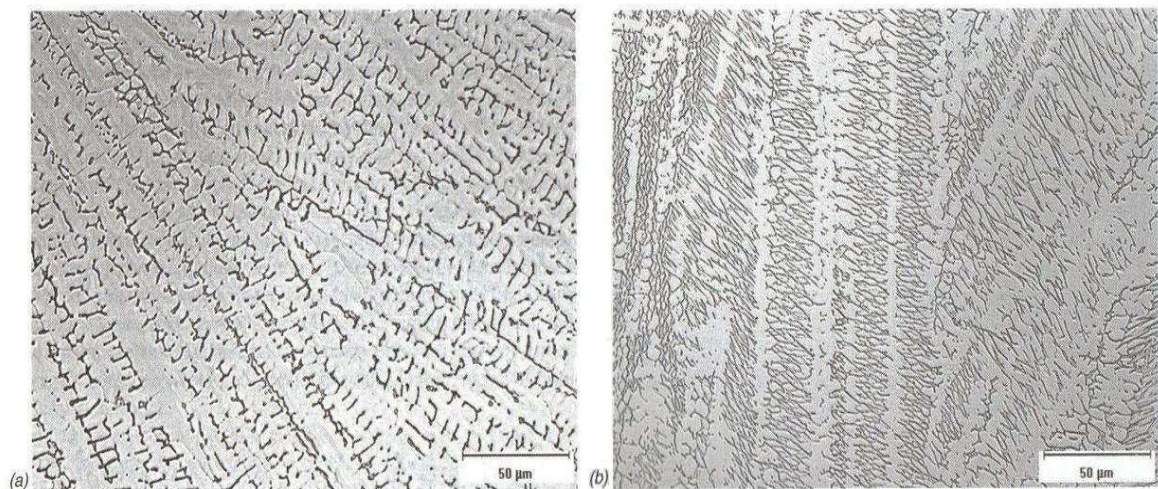


Figura 1. 13. Ejemplo de microestructura resultante en la zona de fusión de la solidificación FA. (a) morfología ferrita esquelética. (b) morfología ferrita lathy.<sup>[10]</sup>

#### 1.9.1.3.4 Solidificación Tipo F.<sup>13</sup>

Esta transformación se da cuando la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq} > 1,95$  y resulta en la formación completa de ferrita al final de la solidificación, que puede transformarse parcialmente en austenita, dependiendo del valor de  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  y la tasa de enfriamiento.

A bajos valores de la relación  $C_{req}/N_{req}$ , pero dentro del rango de de solidificación tipo F, se formará una ferrita acicular dentro de los granos de ferrita y se muestra en la figura 1.14a.

A altos valores  $C_{req}/N_{req}$  y similar tasa de enfriamiento, la microestructura resultante será de matriz ferrítica con austenita en los bordes de grano y placas de estructura Widmanstätten que nuclean en los bordes de grano austeníticos o dentro de los granos ferríticos; Esta microestructura se muestra esquemáticamente en la figura 1.14b, mientras que la microestructura resultante se muestra en la figura 1.15. En la que se puede observar que la transformación no ocurre enteramente a través del grano ferrítico.

En la práctica, la solidificación tipo F es muy inusual en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos. Gran parte de los metales de aporte son diseñados tomando en consideración que ocurre una solidificación tipo FA, con contenidos de ferrita en el metal de soldadura desde los 5 hasta los 20 FN.

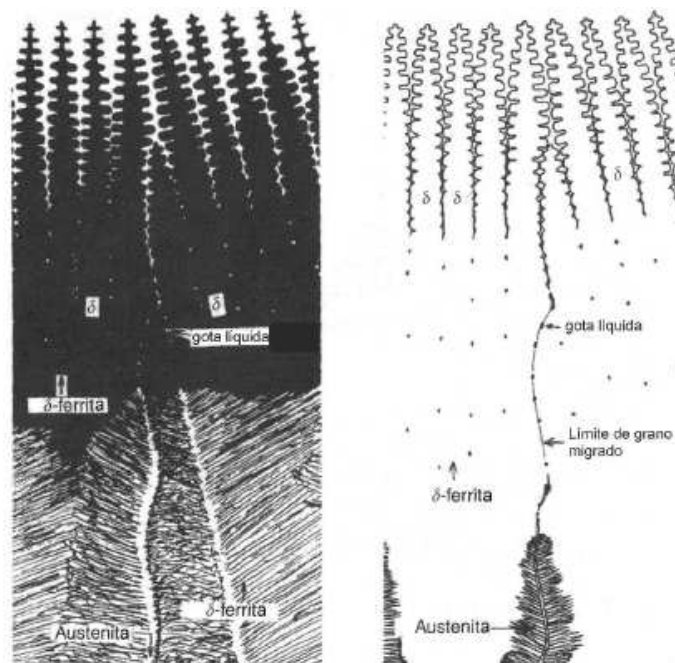


Figura 1. 14. Esquema de la solidificación tipo F. (a) Ferrita acicular. (b) Ferrita y Austenita.<sup>13</sup>

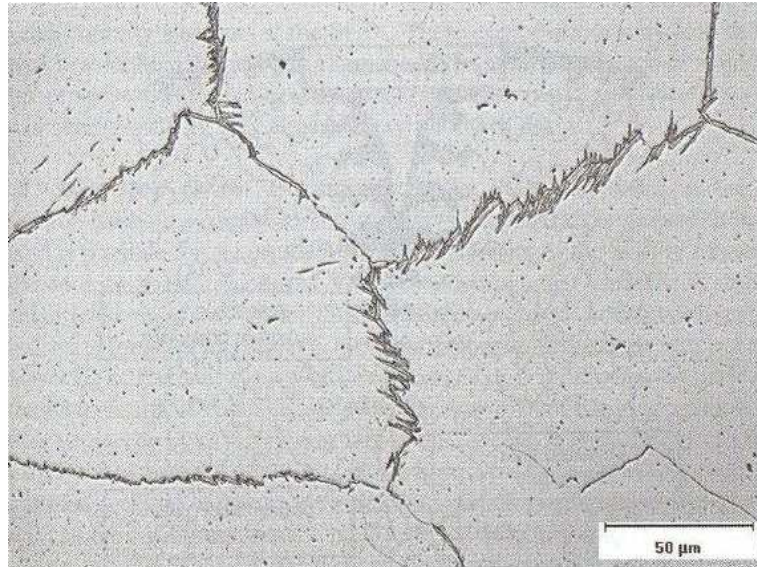


Figura 1. 15. Microestructura resultante en la zona de fusión de una solidificación tipo F.<sup>13</sup>

#### 1.9.1.4. Acero Inoxidable austenítico 304.

Forma parte de la familia de los aceros inoxidable austeníticos, tiene una excelente resistencia a la corrosión a una amplia variedad de medios corrosivos, incluyendo productos de petróleo caliente y gases de combustión, tiene alta ductilidad pero es poco maquinable, es esencialmente no magnético llega a ser levemente magnético cuando ha sido trabajado en frío. El contenido bajo de carbono favorece a la poca precipitación de carburos en la zona afectada por el calor durante la soldadura y una susceptibilidad más baja a la corrosión intergranular, su disponibilidad en el mercado es muy grande.

Su área de aplicación es muy amplia como en tanques de almacenamiento y pausterización de leche, almacenamiento y fermentación de cerveza, equipos químicos, intercambiadores de calor, equipo de refrigeración, evaporadores, equipo quirúrgico y utensilios, etc.

Sus denominaciones análogas son: UNS S30400; AMS 5501, 5513, 5560, 5565; ASME SA182, SA194 (8), SA213, SA240; ASTM A167, A182, A193, A194.



En la Tabla 1.3, se indican las propiedades del acero inoxidable 304.

Tabla 1. 3 Propiedades del acero inoxidable 304<sup>26</sup>

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Sistema métrico</b>	<b>Comentarios</b>
Densidad	8.00 g/cm <sup>3</sup>	
<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>Sistema métrico</b>	<b>Comentarios</b>
Dureza, Rockwell B.	70.0	
Ultimo esfuerzo a la tensión.	505 MPa	
Resistencia a la fluencia.	215 MPa	0.2% de offset
Elongación a la rotura.	70.0 %	in 50 mm
Modulo de elasticidad.	193 - 200 GPa	
Coefficiente de Poisson.	0.290	
Ensayo Charpy.	325 J	
Modulo al corte	86.0 GPa	
<b>Propiedades Eléctricas</b>	<b>Sistema métrico</b>	<b>Comentarios</b>
Resistividad eléctrica	0.0000720 ohm-cm	at 20°C; 1.16E-04 at 650°C
Permeabilidad magnética	1008	a RT
<b>Propiedades térmicas</b>	<b>Sistema métrico</b>	<b>Comentarios</b>
Coefficiente de expansión térmica, linear	17.3 µm/m-°C Entre (0.000 – 100) °C	
	17.8 µm/m-°C Entre (0.000 – 315)°C	
	18.7 µm/m-°C Entre ( 0.000 – 650)°C	
Calor específico	0.500 J/g-Â°C	De 0-100 °C
Conductividad térmica	16.2 W/m-K	A 0-100 °C, 21.5 W/m °C a 500°C
Punto de fusión	1400 - 1455 Â°C	
Solidus	1400 Â°C	
Liquidus	1455 Â°C	

#### 1.9.1.5. Composición química del acero inoxidable 304.

Los componentes químicos de los aceros inoxidables con su porcentaje se detallan en la tabla 3.

Tabla 1. 4. Composición química del acero inoxidable 304<sup>26</sup>.

Carbono, C	<= 0.080 %
Cromo, Cr	18.0 - 20.0 %
Hierro, Fe	66.345 - 74.0 %
Manganeso, Mn	<= 2.0 %
Níquel, Ni	8.0 - 10.5 %
Fosforo, P	<= 0.045 %
Silicio, Si	<= 1.0 %
Azufre, S	<= 0.030 %

### 1.9.1.6. Fisuración debido a la contaminación con cobre (CCC).<sup>13</sup>

La CCC es un fenómeno que se presenta tanto en los aceros inoxidable austeníticos como en los aceros estructurales.

Este fenómeno se origina cuando el cobre presente en las partes que intervienen en la soldadura (elementos a soldar, electrodos, o elementos de sujeción) alcanza la temperatura de fusión aproximadamente de 1083 °C y penetra en los bordes de grano austenítico. El cobre fundido penetra en los bordes de grano más efectivamente a temperaturas cercanas a 1100°C y el efecto de la CCC se observa generalmente en áreas cercanas a la zona de fusión. El grado de la fisuración depende del ciclo térmico de la soldadura y los esfuerzos aplicados, ya que los esfuerzos externos y/o residuales tienden a acelerar el CCC.

Para determinar si una fisuración presente en un acero inoxidable es debida a contaminación con cobre, se debe realizar un ensayo metalográfico de la estructura soldada.

El cobre presente en un material que forma parte del equipo de soldadura, en forma de elemento aleante, no influencia en la CCC.

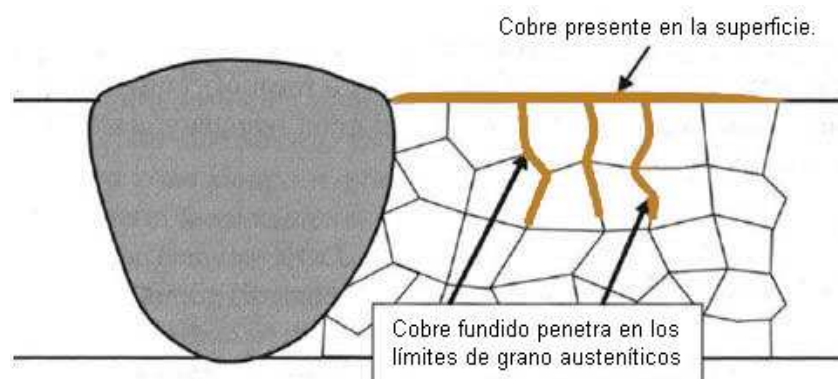


Figura 1. 16. Fisuración debido a la presencia de cobre.<sup>13</sup>

### 1.9.1.7. Sensibilización de los aceros inoxidable austeníticos.<sup>17</sup>

La sensibilización se presenta generalmente en la zona afectada por el calor y se produce cuando el cromo presente en los aceros inoxidable migra hacia los bordes de grano en forma de carburos precipitados como los carburos de hierro y los carburos del tipo  $M_{23}C_6Cr$ . Estas precipitaciones crean zonas con bajo contenido de cromo y por consiguiente sensibles a la corrosión.

La figura 1.17 muestra el efecto de la sensibilización, donde los puntos negros muestran los carburos precipitados en los bordes de grano, y el área entre las líneas punteadas es la zona de material sensible debido a la reducción drástica de cromo.

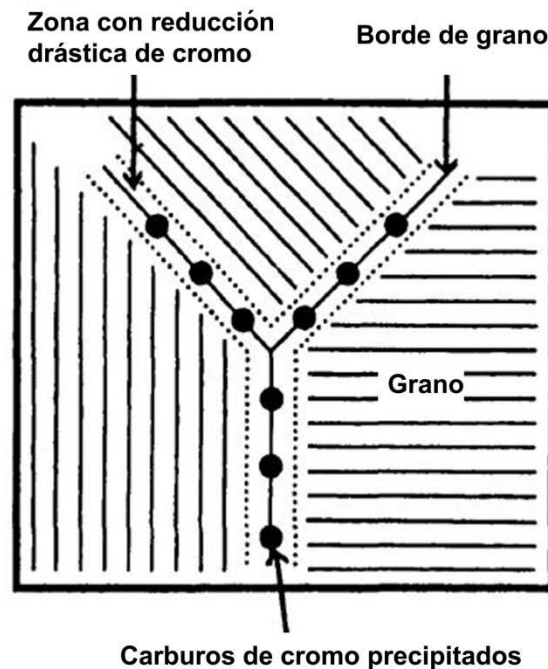


Figura 1. 17. Esquema del efecto de la sensibilización de los aceros inoxidable austeníticos.<sup>17</sup>

El área con bajo contenido cromo alrededor de los bordes de grano se comporta como una zona anódica, lo que ocasiona al metal estar susceptible al ataque de la corrosión. La tasa de formación de carburos es más rápida en el rango de temperatura de 600 a 850°C, a lo que se conoce como el rango de sensibilización.

La sensibilización es más severa cuando:

- Los aceros inoxidable austeníticos contienen altos contenidos de carbono.
- La cantidad de calor suministrado durante la soldadura es alto.
- El metal ha sido conformado o trabajado en frío antes de ser soldado.

- Que no existan aleantes adicionales con gran afinidad por el carbono que por el cromo.

La sensibilización ocurre en un rango pequeño tanto de temperatura como del metal en la zona afectada por el calor. La figura 1.18 muestra el rango de sensibilización como la zona rayada, donde la zona superior (a) no permite la precipitación de carburos porque el tiempo disponible es muy pequeño y esta fuera del rango de temperatura, al igual que la zona (c) en donde no se produce la nucleación.

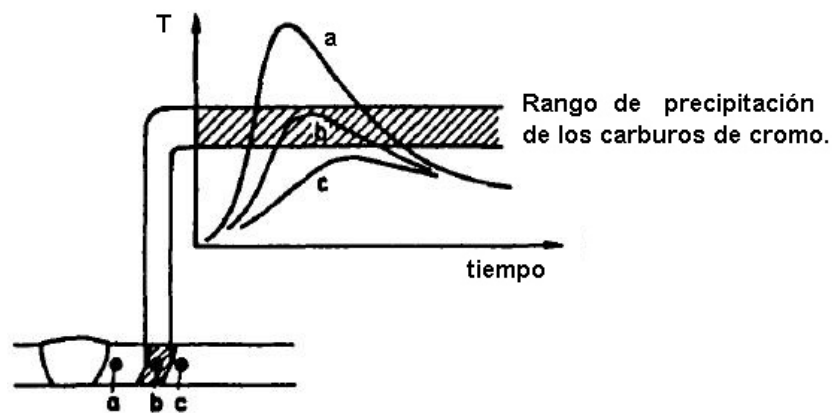


Figura 1. 18. Muestra esquemática de la zona de sensibilización.<sup>17</sup>

La sensibilización en la soldadura debe ser evitada y existen tres formas:

- Se deberá añadir una pequeña cantidad de un elemento que tenga más afinidad por el carbono que por el cromo. Por ejemplo al añadir titanio al acero tipo 304 se transforma en tipo 321, y al Anadir niobio al acero tipo 304 se transforma en tipo 347 debido a la formación de carburos de titanio y niobio antes que la formación de carburos de cromo y hierro que su formación sensibiliza al acero.
- Se debe reducir el contenido de carbono para evitar la formación de carburos de hierro y cromo.
- Se deberá realizar un tratamiento térmico de post soldadura con el objeto de disolver los carburos precipitados, mediante un proceso de solubilización. La

solubilización se realiza calentando el metal entre 1000 y 1100 °C por 1 hora por pulgada de espesor, seguido por un temple rápido para retener el cromo en solución<sup>17</sup>.

#### **1.9.1.8. Fisuración inducida por hidrogeno (HIC).<sup>12</sup>**

Este fenómeno ocurre cuando el hidrogeno atómico se difunde a través de la estructura cristalina del acero debido a su pequeño diámetro atómico recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones. El hidrogeno reacciona con el carbono de los carburos produciendo burbujas o ampollas de metano de hasta un metro de diámetro en chapas relativamente finas.

Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando en las dislocaciones, reduciendo la ductilidad del acero o peor aún puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros.

Esta recombinación acumula moléculas de hidrógeno en forma gaseosa desarrollando presiones suficientemente altas para romper enlaces atómicos y generar fisuras si la microestructura del acero no es plástica como la FCC. Las presiones generadas por el hidrogeno en forma gaseosa se calculan teóricamente y llegan a valores de  $10^5$  Atm, de allí surge la peligrosidad del hidrógeno ya que cantidades tan pequeñas como 0,0001 % en peso pueden producir fisuras en el acero.

Este tipo de fisuración tiene lugar si se presentan simultáneamente las siguientes condiciones:

- Una concentración de hidrógeno crítica.
- Tensiones de tracción elevadas.
- Una microestructura susceptible como la BCC.
- Una temperatura de servicio entre -100°C y +200°C.

La soldadura de los inoxidables austeníticos se realiza a menudo con gases protectores como argón con pequeños agregados de hidrogeno, no obstante si se realiza el mismo procedimiento en los aceros inoxidables ferríticos se debe hacer un recocido de deshidrogenación inmediatamente después de la soldadura para

evitar fisuración. Un recocido a 150°C luego de la soldadura restaura totalmente la ductilidad mostrando que la fragilización es reversible.

#### 1.9.1.9. Ataque de las líneas de cuchillo. (Knife line attack).<sup>13</sup>

Al soldar un acero inoxidable como los de grado 347 y 321, puede ocurrir un ataque intergranular cerca de la zona de fusión. Este ataque se presenta como una franja delgada similar a líneas producidas por el corte de un cuchillo.

Este tipo de ataque ocurre cuando los carburos estabilizados (NbC o TiC) se disuelven a elevadas temperaturas justo en la región adyacente a la zona de fusión. Luego del enfriamiento, los carburos ricos en Cr se formarán más rápido que los NbC o TiC, resultando una franja delgada sensibilizada, la que se muestra en la figura

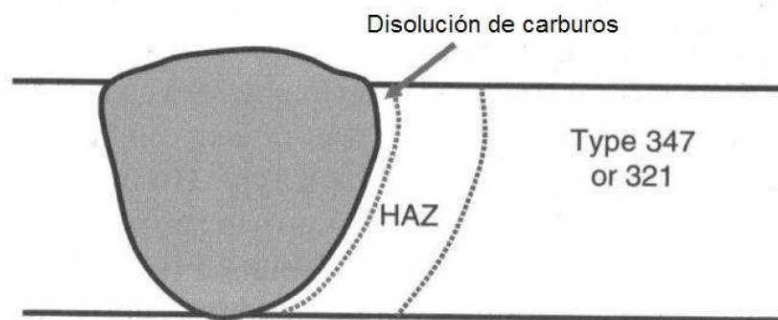


Figura 1. 19. Zona donde se produce la sensibilización, el ataque KLA.<sup>13</sup>

El KLA puede evitarse simplemente calentando a la zona afectada a una temperatura superior a 815°C e inferior a 1050 °C, en la cual los carburos de Cr comienzan a disolverse y luego se debe enfriar lentamente.

#### 1.9.1.10. Precipitación de las fases intermetálicas.<sup>6</sup>

Los aceros inoxidables austeníticos a la temperatura de 550 °C y cuando el enfriamiento no es muy rápido se presentan precipitados de carburos, nitruros y fases intermetálicas.

La precipitación de los carburos depende de la aleación química de los aceros. La probabilidad de la precipitación de carburos  $M_{23}C_6$  puede ocurrir cuando los aceros inoxidables austeníticos presentan contenidos de hasta el 15% de

carbono; Mientras que la precipitación de carburos del tipo  $M_7C_3$  se presenta cuando el contenido de carbono es mayor a 0.15%.

El enfriamiento rápido de los aceros inoxidable austeníticos desde la temperatura de solución y cuando el acero se encuentra térmicamente envejecido ocurre la precipitación de los carburos. En los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300 y en ausencia de los elementos estabilizadores como el Nb y el Ti se produce la formación de los carburos  $M_{23}C_6$ .

La precipitación ocurre rápidamente en las interfaces ferrita-austenita, continuando en otros límites no coherentes incluyendo inclusiones, maclas, granos o matriz y sobre dislocaciones.

Tabla 1. 5. Estructuras cristalinas y precipitados de los aceros inoxidable austeníticos.<sup>6</sup>

Fase	Estructura	Parámetro reticular (nm)	Composición
Austenita	FCC	a=0.598	-----
Ferrita	BCC	a=0.285	FeCrMo
Carburos			
$M_{23}C_6$	FCC	a=1.057	$(Cr_{16}Fe_5Mo_2)C_6$ ; $(FeCr)_{23}C_6$ ; $(Cr_{17}Fe_{4.5}Mo_{1.5})C_6$
$M_7C_3$	HC	a=0.692 c=0.454	$(Cr_7C_3)$ ; $(FeCr)_7C_3$ ; $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_7C_3$
NbC	FCC	a= 0.447	NbC
TiC	FCC	a=0.433	TiC
Nitruros			
$M_2N$	HC	a=0.478 c=0.444	$BCr_2N$
NbN	FCC	a=0.440	NbN
TiN	FCC	a=0.424	TiN
Intermetálicos			
Sigma $\sigma$	BCC tetragonal	a=0.870 c=0.454	$(FeNi)_x(CrMo)_yFeCr$ ; $(FeNi)_x(CrMo)_y$
Laves $\eta$	hexagonal	a=0.473 c=0.772	$Fe_2Mo$ ; $Fe_2Ti$ ; $Fe_2Nb$
Chi X	BCC	a=0.880	$(FeNi)_{63}Cr_{18}Mo_4$ ; $Cr_{16}Fe_{18}Mo_5$ ; $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{16}$
Fase Z	tetragonal	a=0.303 c=0.739	CrNbN
Fase G	FCC	a=1.120	$Ni_{16}Nb_6Si_7$ . $Ni_{16}Ti_6Si_7$
Impurezas menores			
Sulfuros MS	FCC	a=0.524	MnS
Carburo de silicio	hexagonal	a=0.307 c=0.504	SiC

Los carburos  $Cr_{23}C_6$ , tienen una estructura cúbica centrada en las caras con un parámetro reticular de 1.065 nm. El hierro, níquel y molibdeno puede sustituir parcialmente al cromo y la cantidad existente está es función del tiempo, temperatura de envejecido y pureza.

#### **1.9.1.11. Precipitación de nitruros $M_2N$ .<sup>6</sup>**

El nitrógeno forma nitruros de cromo del tipo  $Cr_2N$ . Además, se sabe que el nitrógeno se disuelve intersticialmente en el acero y es un gran estabilizador de la austenita en la misma medida que el carbono. La mayoría de nitrógeno esta en solución solida y reduce la difusividad del cromo; por consiguiente disminuye la precipitación de  $M_{23}C_6$ .

En ausencia de los elementos formadores de carburos como el aluminio, vanadio, titanio y niobio. Los nitruros precipitan fácilmente a temperaturas altas aproximadamente a 800 °C. Por lo tanto el equilibrio está entre la austenita y nitruros de cromo  $Cr_2C_6$

#### **1.9.2. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.<sup>13</sup>**

Se denominan aceros inoxidable ferríticos porque la fase metalúrgica predominante es la ferrita. Esta fase pose buena resistencia la corrosión, por lo que son utilizados en grandes aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es más importante que las mismas propiedades mecánicas del material como la resistencia mecánica, dureza y ductilidad.

Los aceros inoxidable ferríticos presentan diferentes grados, de acuerdo al porcentaje de cromo que contienen, entre ellos se tiene lo de bajo contenido de cromo de 10.5 al 12.5 % en peso, son usados en aplicaciones como sistemas de gases de escape en automóviles, donde la resistencia a la corrosión es superior al acero al carbono. Los de mediano contenido de cromo son usados en ambientes muy corrosivos, además existen aleaciones superferríticas que se usan en los procesos químicos, en despulpe e industria del papel, donde la resistencia a la corrosión es requerida debido a los medios severos de oxidación existentes,



finalmente los aceros inoxidable ferríticos de alto contenido de carbono son usados en hornos de alta eficiencia.

### **1.9.3. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.<sup>13</sup>**

Estos aceros son magnéticos y contienen entre 11.5% a 18% de cromo, como su principal elemento de aleación. Algunos ejemplos de este grupo son los aceros martensíticos AISI 410, 416, 420, 431, 501, y 502. En la soldadura de los aceros martensíticos se pueden producir tensiones y por consiguiente grietas, si no se adoptan las precauciones convenientes. Siempre que sea posible debe emplearse como metal de aporte aleaciones austeníticas (como la AISI 309 y 310) para absorber las tensiones en las zonas cercanas al cordón y así evitar grietas.

Es conveniente precalentar entre 300 y 350°C las piezas a ser soldadas. Después de la soldadura y una vez enfriadas las piezas se recomienda un revenido de 600 a 700 °C.

La mejor resistencia a la corrosión para estos aceros se obtiene efectuando tratamientos térmicos de temple y revenido a las temperaturas recomendadas. La resistencia a la corrosión en estos aceros, no es tan buena como en los aceros austeníticos o los ferríticos.

Son utilizados principalmente, en piezas que van a estar sometidas a corrosión y que requieren de cierta resistencia mecánica. Algunos usos son: aletas para turbinas, rodetes de turbinas hidráulicas, fundiciones resistentes a la corrosión, cuchillería, piezas de válvula, etc.

### **1.9.4. ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX.<sup>13</sup>**

Los aceros inoxidable dúplex, hacen honor a su nombre debido a que en su estructura a temperatura ambiente se encuentra ferrita y austenita en iguales proporciones.

Los aceros inoxidable dúplex se usan en aplicaciones en donde se requiere una buena resistencia tanto mecánica como a la corrosión, superior a los grados austeníticos y ferríticos, esto es posible ya que el contenido de ferrita es mayor

que los grados austeníticos. Son más ferromagnéticos, tienen una alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmico.

Los aceros inoxidable dúplex tienen mayor contenido de cromo para mejorar la resistencia a la corrosión en comparación con los aceros austeníticos, pero con menor contenido de níquel para aumentar el contenido de ferrita con el objeto de aumentar la resistencia a la corrosión bajo tensión en medios con cloruros a alta temperatura, pero no son totalmente inmunes ya que son atacados por la corrosión por fisura; Existe la limitación de la temperatura de servicio que oscila en el rango de -40 a 280 °C.

#### **1.9.5. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN<sup>13</sup>**

Pueden ser austeníticos, semiausteníticos o martensíticos y tienen un contenido de carbono muy bajo y por esta razón el endurecimiento primario será el endurecimiento por precipitación, inclusive en el caso de los martensíticos.

Los elementos aleantes que se emplean en los aceros inoxidable endurecidos por precipitación (PH por sus siglas en inglés) son el aluminio, titanio, niobio y cobre. Estos aceros tienen buena resistencia a la corrosión, además tienen buena ductilidad y tenacidad.

Estos aceros presentan alto esfuerzo de fluencia en tensión, de hasta 1,700 MPa (250 ksi). El trabajo en frío antes de envejecer puede aumentar aún más el esfuerzo a la fluencia. Por esta razón su aplicación está destinada a aplicaciones de alta tecnología como la aeroespacial.

## **CAPITULO 2**

### **2. ESTUDIO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA DE PUNTOS Y LA SOLDABILIDAD EN EL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO.**

La soldadura por resistencia de puntos (RSW) es uno de los procesos de soldadura eléctrica muy utilizados hoy en día en la industria debido a su rapidez en la ejecución, ayudando así a optimizar recursos en comparación con los otros procesos de soldadura en donde se requiera unir chapas metálicas sin hermeticidad y que no requieran volver a ser separadas.

El proceso de la soldadura por resistencia es muy aplicado en las industrias de campo, de ensamble y mantenimiento; Entre las que se tiene la industria automotriz, aeroespacial, nuclear, eléctrica y electrónica.

#### **2.1. PRINCIPIO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA**

Este proceso se realiza mediante la combinación de calor, presión y tiempo; La RSW en su operación tiene implícito la resistencia que presenta el material al paso de un flujo de corriente, que genera un incremento de calor localizado en la zona a soldar. La presión ejercida por las tenazas y el electrodo durante el paso de corriente, sujeta las partes a soldar en un contacto íntimo antes durante y después de la soldadura. La cantidad de los ciclos y la intensidad de corriente en la junta son determinadas por el espesor y tipo del material.

#### **2.2. PARAMETROS DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA POR PUNTOS (RSW).**

Los parámetros principales que intervienen en la soldadura por resistencia son:

- Presión (fuerza/área en los electrodos)
- Amperaje
- Tiempo

### 2.2.1. PRESIÓN (FUERZA/AREA EN LOS ELECTRODOS)

Es uno de los parámetros más importante de la RSW y se trata de la fuerza que ejercen los electrodos sobre el material a ser soldado (Figura 2.1); Esta fuerza es necesaria para asegurar un buen contacto eléctrico entre las partes a ser soldadas y además sirve para mantener las partes fijas hasta que el metal fundido se solidifique. La fuerza es accionada por cilindros neumáticos o hidráulicos, dependiendo del tamaño de la maquina.

La fuerza no debe ser muy grande ya que podría causar daños en la soldadura como son las perforaciones.

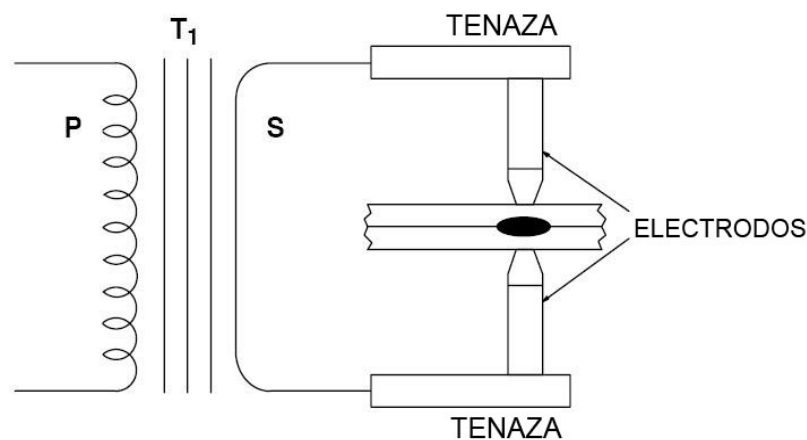


Figura 2. 1. Esquema de una máquina de RSW.

### 2.2.2. CORRIENTE DE SOLDADURA

Es el flujo de corriente necesario para producir la fusión de los materiales a ser soldados. Un exceso de corriente sobrecalentará el metal base y producirá depresiones profundas en las piezas, provocando además el sobrecalentamiento y el rápido deterioro de los electrodos; mientras que un déficit en el flujo de corriente, no producirá fusión completa en el metal base y consecuentemente la soldadura será de mala calidad.

#### 2.2.2.1. Calor generado

Cuando un flujo de corriente atraviesa un conductor eléctrico genera calor y la ecuación que gobierna este efecto es:

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

Donde

$Q$ : Es el calor generado [J]

$I$ : Es la corriente [A]

$R$ : Es la resistencia eléctrica del circuito [ $\Omega$ ]

$t$ : Tiempo del paso de corriente al circuito. [s]

En la ecuación 2.1, se observa que el calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente de soldadura y directamente proporcional a la resistencia y al tiempo, de lo que se puede deducir que la corriente necesaria para producir una soldadura es muy alta debido al corto tiempo de ejecución de la soldadura. Parte del calor generado se utiliza para realizar la soldadura y parte se disipa en los alrededores ya sea en el metal circundante y/o en los sistemas de enfriamiento.

### **2.2.3. TIEMPO DE SOLDADURA**

Es el período de tiempo necesario para realizar un punto de soldadura, debido a que es muy corto, requiere gran cantidad de energía para llevar al material base a su punto de fusión, es decir el valor de amperaje requerido es del orden de los kilo amperios.

Si el tiempo de soldadura es demasiado corto, no llega a formarse el punto de soldadura debido a que el material no llegó a fundirse, por lo tanto la soldadura será de baja calidad y deberá desecharse.

Si el tiempo de soldadura es demasiado largo, la temperatura en el punto de soldadura excederá a la temperatura de fusión del material base y puede causar los siguientes efectos:

- Expulsión del material debido a las altas presiones internas.
- Incremento de la zona afectada por el calor (HAZ).
- Expulsión de gases o de vapor metálico, generados en el interior del punto de soldadura.

### 2.3. CICLO DE SOLDADURA EN RSW.

La figura 2.2 muestra un ciclo básico de soldadura por resistencia de puntos, el cual está compuesto por las siguientes fases:

1) Tiempo de acercamiento (Squeeze time "SQT")

Tiempo en el cual se incrementa gradualmente la fuerza en los electrodos y estos a su vez toman la posición de trabajo, logrando así un contacto íntimo entre el electrodo y las chapas.

2) Tiempo de soldadura (Welding Time "WT")

Tiempo en el cual se hace pasar un flujo de corriente eléctrica a través de las chapas metálicas a soldar, logrando así que se genere una zona de fusión en medio de las chapas metálicas.

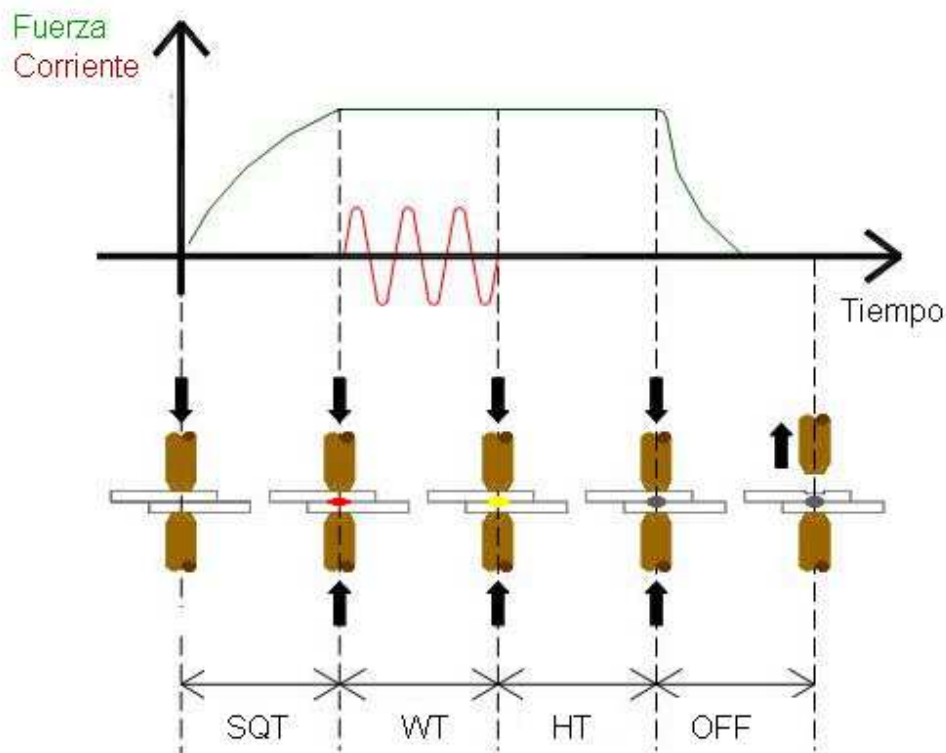


Figura 2. 2. Parámetros de soldadura por resistencia.

3) Tiempo de fragua o retención (Hold Time "HT")

Tiempo en el cual se mantiene la fuerza en los electrodos, logrando así que la zona de fusión se solidifique y se forme así el punto de soldadura.

4) Tiempo inactivo (OFF)

Es la operación final del proceso, en la que se quita la presión de los electrodos sobre las chapas ya soldadas, permitiendo además el retiro de las chapas soldadas.

Dentro del proceso de soldadura por resistencia de puntos y dependiendo del tipo y espesor del material a soldar pueden existir un número mayor fases como el tiempo de precalentamiento, tiempo de enfriamiento y doble pulso de soldadura.

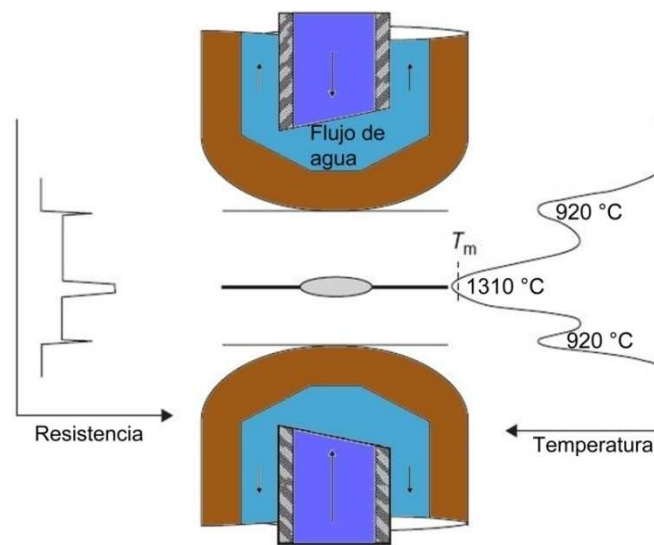


Figura 2. 3. Sistema de enfriamiento de los electrodos.

La figura 2.3 muestra el sistema de enfriamiento de los electrodos en una máquina de soldadura por resistencia de puntos. Este sistema es de gran importancia ya que ayuda a evitar la formación de discontinuidades en el punto de soldadura.

## 2.4. EQUIPO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA

Los equipos utilizados en la soldadura por resistencia de puntos, pueden ser simples y económicos o complejos y costosos, dependiendo del grado de automatización que dispongan.

Los equipos de RSW, están compuestos de 3 elementos principales:

**CIRCUITO ELECTRICO:** Está compuesto de un transformador de soldadura, conmutador de derivaciones y circuito secundario.

**CIRCUITO DE CONTROL:** Encargado de iniciar y controlar los tiempos de flujo de corriente, controla además la corriente de soldadura.

**SISTEMA MECANICO:** Consiste en los elementos, componentes y otros dispositivos que ayudan a sujetar y aplican la fuerza al metal a soldar.

Las especificaciones de los equipos fueron estandarizadas por la asociación de soldadores y fabricantes de soldadura por resistencia (RWMA) y son controladas y reportadas por la Asociación Nacional de fabricantes eléctricos (NEMA).<sup>18</sup>

#### **2.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE SOLDADURA POR RESISTENCIA**

Desde el punto de vista eléctrico las máquinas de soldadura por resistencia se clasifican en equipos de energía directa y equipo de energía almacenada.

Los equipos de energía directa como su nombre lo indica obtienen la energía eléctrica de la red; Este tipo de equipos son los más utilizados debido a su menor costo inicial, son de fácil instalación y mantenimiento.

El principio de un equipo de energía almacenada se basa en acumular y almacenar energía eléctrica en un banco de condensadores y luego descargarla para realizar la soldadura.

Desde el punto de vista mecánico funcional, los equipos de soldadura por resistencia se clasifican en equipos portátiles y de pedestal.

##### **2.4.1.1. Equipos portátiles**

Los equipos de soldadura portátiles son utilizados en lugares donde la estructura a soldar no puede ser movida debido a su tamaño o peso. Este tipo de equipos son muy utilizadas en el área de ensamble de automóviles.

Una máquina de soldadura portátil consiste en un armazón, accionado por un cilindro neumático o hidráulico, dependiendo de la fuerza que se requiera.

Existen dos tipos de equipos de soldadura portátiles, la tipo X o tijera (Figura 2.4) y la tipo C (Figura 2.5).



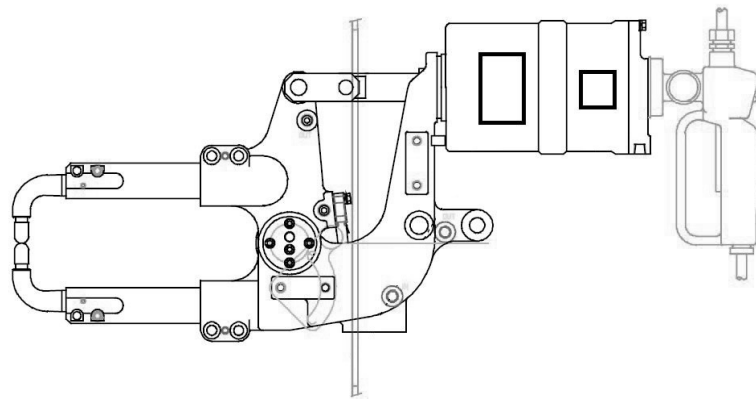


Figura 2. 4. Equipo de soldadura por puntos portátil tipo X .

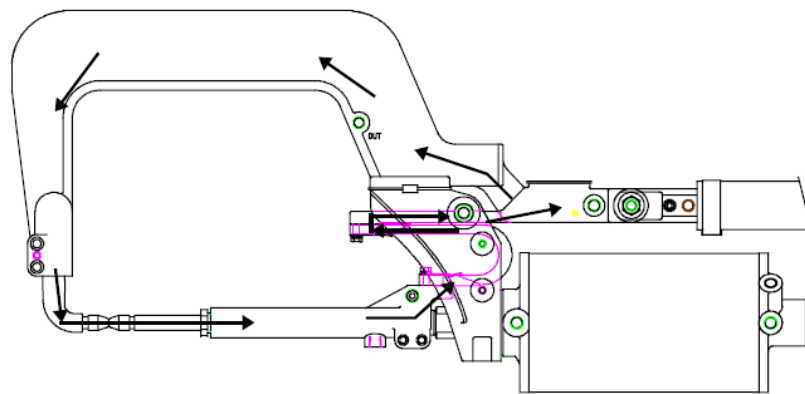


Figura 2. 5. Equipo de soldadura por puntos portátil tipo C.

Entre las principales características de los equipos portátiles se encuentra que: Los transformadores de los equipos portátiles deben producir voltajes de circuito abierto de dos a cuatro veces mayores que las máquinas de pedestal, debido a que se añaden los cables entre el transformador y la pistola.

La impedancia en un equipo de soldadura portátil aumenta, por lo cual requiere un voltaje en el secundario más alto en relación a un equipo de pedestal para producir la misma corriente.

#### 2.4.1.2. Equipos de pedestal

Los equipos de soldadura de pedestal son equipos más robustos en comparación con que los equipos de soldadura portátil. Este tipo de equipos son muy versátiles ya que pueden utilizarse como equipos para soldadura por puntos o equipos para soldadura por proyección.

Existen dos tipos básico de equipos de soldadura de pedestal entre ellas se tiene las tipo balancín, tipo prensa (Ver anexo 4).

## **2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE RSW.<sup>18</sup>**

Entres las principales ventajas y desventajas se tiene:

### **2.5.1. VENTAJAS**

- Altas tasas de soldadura en relación al resto de procesos.
- Muy poca generación de humos.
- Es de fácil automatización.
- No requiere de materiales de aporte.
- Muy poca distorsión.
- El operario no necesita tener una alta capacitación.

### **2.5.2. DESVENTAJAS**

- Alto costo inicial de los equipos en comparación con los otros procesos.
- Se puede soldar espesores de hasta 6mm.
- El traslapo de las uniones del material a soldar añaden peso y costo a la estructura.
- Tienen baja resistencia mecánica a la tensión y a la fatiga debido a la muesca alrededor del punto de soldadura entre las láminas.
- Requieren alta amperajes y voltajes.

## **2.6. EFECTO SHUNT.<sup>24</sup>**

El efecto Shunt, se presenta cuando se realizan puntos de soldadura muy cercanos unos con otros, es decir el flujo de corriente se desvía de su trayectoria hacia los puntos de soldadura realizados anteriormente; En consecuencia los nuevos puntos de soldadura tendrán un diámetro pequeño y de menor calidad. Este efecto se muestra en la figura 2.6.

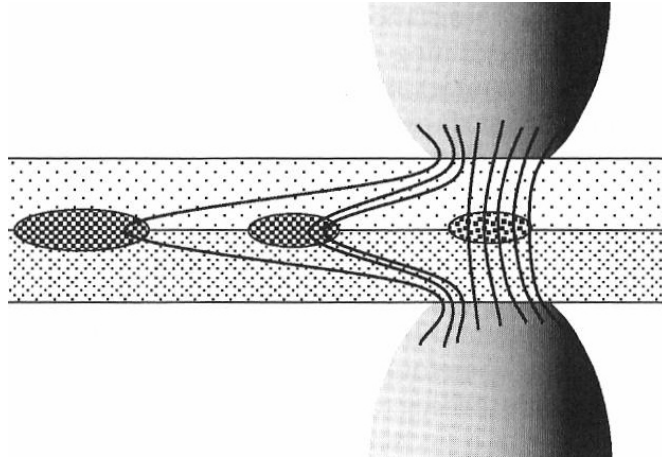


Figura 2. 6. Efecto Shunt. <sup>24</sup>

Para soldar materiales con alta conductividad térmica como el aluminio, el espaciamiento entre los puntos deberá ser mayor respecto al acero al carbono.

## 2.7. PRUEBAS MECANICAS.<sup>24</sup>

Las pruebas mecánicas son un aspecto importante en el estudio de la soldadura por resistencia de puntos de los aceros inoxidable austeníticos, ya que revelan las características de la soldadura como el tamaño del punto de soldadura, el comportamiento de la soldadura ya sea dúctil ó frágil.

Las pruebas mecánicas se clasifican en estáticas o dinámicas, y dichos resultados pueden ser cuantificables o simplemente apreciables (Análisis visual). El tipo y la cantidad de pruebas a realizar en una estructura soldada, depende de las sollicitaciones mecánicas a la que esté sometida la estructura soldada.

### 2.7.1. PRUEBAS ESTÁTICAS.

En las pruebas estáticas existen dos formas de aplicación de la carga: a tracción o con esfuerzo cortante; Dependiendo de los requerimientos ingenieriles una junta soldada puede ser cargada con una de ellas o con la combinación de las dos. Pero debido a la naturaleza asimétrica de las juntas soldadas, mediante el proceso de soldadura por resistencia de puntos, al aplicar la carga se puede observar una deformación con rotación incluida en el área cercana al punto de

soldadura, consecuentemente el modo de ensayo de tracción a carga pura rara vez se cumple.

#### **2.7.1.1. Prueba de tracción (Tension test)**

Esta prueba se realiza para obtener las características mecánicas de la estructura soldada como es la resistencia mecánica y la ductilidad. La probeta que se utiliza en este ensayo se muestra en la figura 2.7 y consta de dos partes de material soldadas por un solo punto de soldadura.

Los resultados de esta prueba se tabulan en una curva esfuerzo vs deformación, la cual ayuda a determinar las propiedades del material como el modulo de Young, limite de fluencia y la ductilidad.

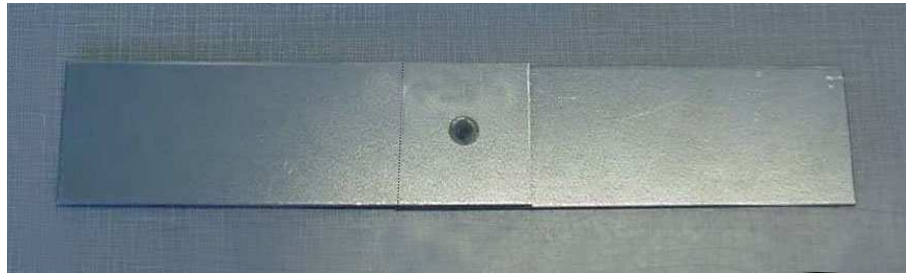


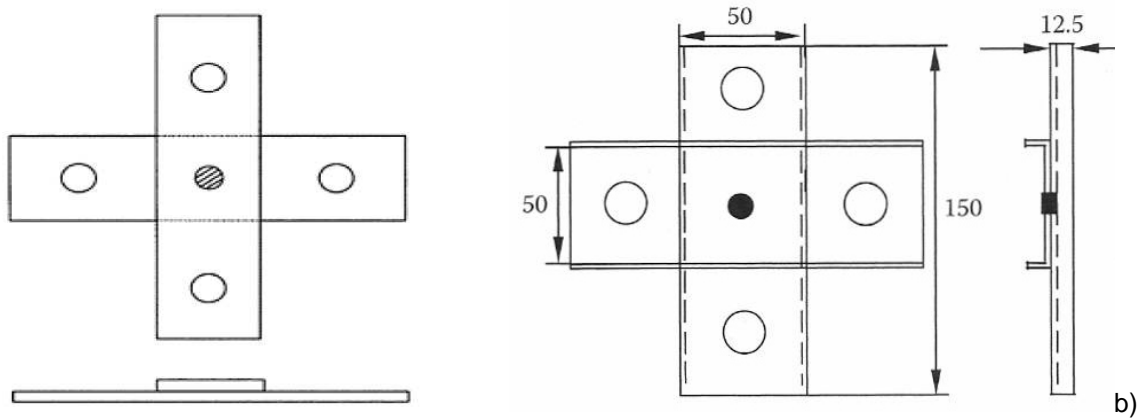
Figura 2. 7. Probeta utilizada para el ensayo de tracción

Existen dos variaciones de esta prueba como son la prueba de la tracción en cruz y la prueba de tracción en U.

##### *2.7.1.1.1. Prueba de la tracción en cruz*

Esta prueba se ha diseñado para simular el comportamiento de una estructura soldada, cuando esta se encuentra soportando cargas en la dirección normal al plano de la soldadura. Las dos probetas son unidas con un solo punto de soldadura y además presentan perforaciones en sus extremos que servirán para la sujeción de las mismas en la máquina de ensayo.

La figura 2.8a muestra la probeta de tracción en cruz simple, mientras que la figura 2.8b muestra la probeta de tracción en cruz con pestaña con el objeto de incrementar la rigidez de la estructura.



a)

Figura 2. 8. Probetas para ensayo de tracción en cruz simple(a), en cruz con pestaña (b).<sup>24</sup>

#### 2.7.1.1.2. Prueba de tracción en U.

Este tipo de prueba tiene el mismo principio que la prueba de tracción en cruz, pero con otro tipo de probeta. La probeta tiene la forma de U y es sujeta en la máquina de ensayo mediante las perforaciones en sus extremos, para luego aplicar la fuerza en la dirección de las flechas de la figura 2.9

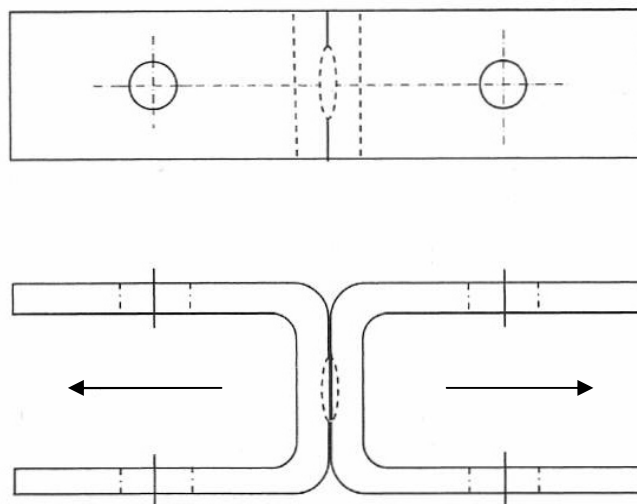


Figura 2. 9. Probetas para tracción en U.<sup>24</sup>

### 2.7.2. PRUEBAS DINÁMICAS

Las pruebas dinámicas se realizan cuando la estructura soldada va a ser sometida a grandes esfuerzos dinámicos. Estas pruebas desempeñan un papel importante en la seguridad, fiabilidad e integridad de las estructuras soldadas.

Las pruebas dinámicas se clasifican en prueba de fatiga y prueba de impacto.

### 2.7.2.1. Prueba de fatiga.<sup>24</sup>

Casi todas las estructuras soldadas están sometidas a vibraciones en mayor o menor proporción. La prueba dinámica de fatiga se lleva a cabo in situ, es decir con estructuras soldadas en trabajo o también con prototipos a escala.

La prueba de fatiga tienen las siguientes características:

- La falla ocurre solo después de una gran cantidad de ciclos de carga, si la carga es baja.
- Las cargas de falla son significativamente bajas, respecto a las cargas de diseño a las cargas estáticas límites.
- La superficie de fractura tiene una apariencia frágil, aunque una soldadura de similares características calificadas bajo las pruebas estáticas dará una apariencia dúctil.

En la prueba de fatiga se registra el número de ciclos que soporta la estructura, en un rango determinado de carga antes de que llegue a fallar.

### 2.7.2.2. Prueba de impacto.<sup>24</sup>

La prueba de impacto en la soldadura por resistencia de puntos de ciertos materiales es la principal preocupación, debido a la seguridad, fiabilidad e integridad de las estructuras soldadas. Sin embargo la complejidad relacionada con la baja fiabilidad y la excesiva repetitibilidad, implican altos costos en el desarrollo de esta prueba y consecuentemente la abstención de su realización.

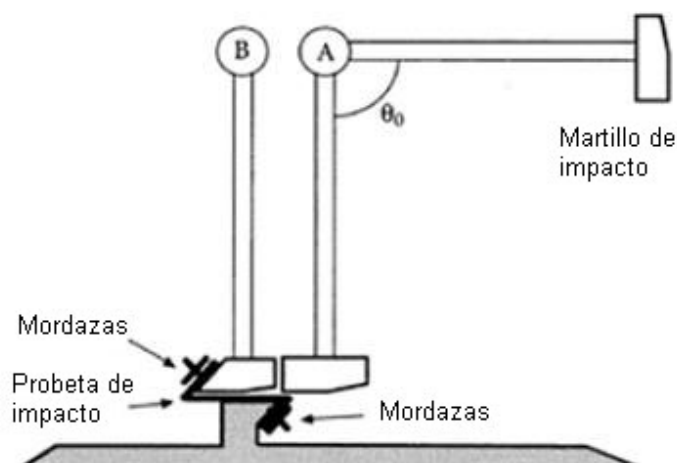


Figura 2. 10. Esquema de la prueba de impacto.<sup>24</sup>

La figura 2.10 muestra el esquema de la prueba de impacto, con su correspondiente probeta de ensayo.

### **2.7.3. PRUEBAS DE TORSION**

Aunque este ensayo no es muy común en relación a las pruebas anteriores, es aplicable a la soldadura por resistencia de puntos. Existen dos tipos de pruebas de torsión.

#### **2.7.3.1. Torsión simple.<sup>24</sup>**

Esta sirve para determinar el ángulo de torsión en el cual se produce de falla y sirve además para medir el diámetro del punto de soldadura; Las probetas utilizadas para este ensayo son las mismas probetas normalizadas que se usan en tracción simple.

#### **2.7.3.2. Prueba torsional cortante.<sup>24</sup>**

Este ensayo es utilizado cuando se requiere medir la resistencia mecánica y la ductilidad del punto de soldadura. La prueba torsional cortante se aplica la soldadura de probetas cuadradas que se encuentran sujetas a dos placas que son parte de la máquina. Una de las placas se encuentra rígida a la máquina, mientras que la otra es un disco que transmite el torque proveniente de un elemento motriz a la probeta soldada.

Los parámetros que se registran mediante esta prueba son:

- El ultimo torque aplicado para la destrucción de la soldadura.
- El ángulo de torsión medido en el último torque, respecto al ángulo de rotación a la máxima carga.
- El diámetro del punto de soldadura después del ensayo.

### **2.7.4. PRUEBAS DE TALLER**

En lugar de las pruebas mecánicas mencionadas en los ítems anteriores, existen otras pruebas prácticas denominadas pruebas de taller, que han sido desarrolladas y normadas durante varios años con la colaboración de operarios de amplia experiencia.

Las pruebas de taller se clasifican en la prueba del cincel y la prueba de desgarre.

#### 2.7.4.1. Prueba del cincel (Chisel test)

Esta prueba se usa para medir la ductilidad de la estructura soldada mediante el proceso de soldadura por resistencia. El objetivo es detectar si el punto de soldadura llegó a conformarse o no y que característica posee ya sea dúctil o frágil.

Para realizar esta prueba se utiliza un cincel que es martillado en medio de dos puntos de suelda, como se muestra en la figura 2.11. Si el cincel ingresa en medio de dos puntos de soldadura sin llegar estos a zafarse, entonces se deduce que la soldadura se realizó correctamente. El operador basado en su experiencia podrá deducir el tipo de soldadura que se obtuvo.

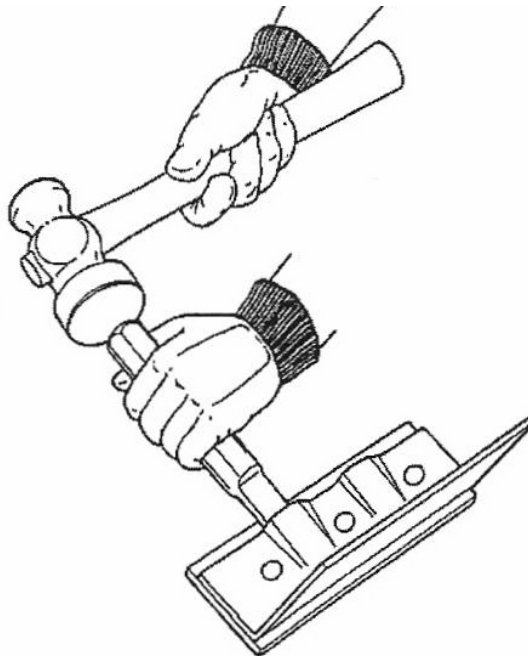


Figura 2. 11. Prueba del cincel.<sup>24</sup>

Esta prueba muy utilizada para el control de las líneas de fabricación ya que proporciona una rápida información de las características de la soldadura.

#### 2.7.4.2. Prueba de desgarre (Peel-roller test)

Esta prueba se puede realizar con una herramienta manual (alicate) como se muestra en la figura 2.12, o con un rodillo como se muestra en la figura 2.13.

Esta prueba se realiza separando los extremos de las placas, uno de los cuales será sujeto en una mordaza y la otra será sujeto con el rodillo o con un alicate.





Figura 2. 12. Prueba de desgarre con alicate.

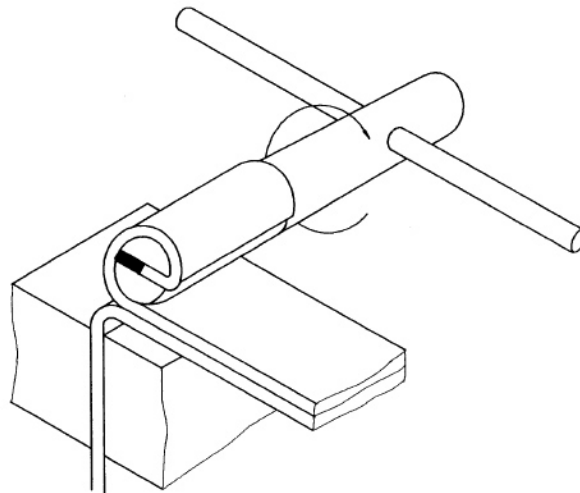


Figura 2. 13. Prueba de desgarre con rodillo.

Al realizar la prueba de desgarre se tiene dos condiciones:

1. Si el punto de soldadura se desprende de la placa en la cual se está haciendo el efecto desgarre, para quedarse unido a la placa que está sujeta con las mordazas de la entenalla, implica que el punto de soldadura es bueno y tiene un comportamiento dúctil.
2. Si el punto de soldadura desprende de la placa sujeta con la entenalla sin haber realizado un esfuerzo considerable, implica que la soldadura es frágil y no es aceptable.

Esta prueba se debe realizar cuando equipo de soldadura se encuentre calibrado y realice puntos de suelda homogéneos. Se deberá desistir de esta prueba cuando existan puntos de soldadura con explosiones de metal fundido.

La prueba del desgarre en un punto de soldadura bueno, deberá mostrar en la una placa el punto de soldadura integro y la otra placa muestra un orifico.

Las pruebas de desgarre y del cincel se deben realizar bajo la norma ISO 10447, la cual se muestra en el anexo 1.

### **2.7.5. ENSAYO METALOGRAFICO**

El ensayo metalográfico se realiza con el fin de obtener toda la información que es posible encontrar en la estructura de los diferentes materiales. Este ensayo se realiza con la ayuda de un equipo de pulido y un microscopio en donde se observa la estructura de las muestras que permitirán concluir que tipo de aleación que se tiene, el contenido de aproximado de carbono y el tamaño de grano, dependiendo de la aleación.

## **2.8. DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA**

La selección incorrecta de los parámetros de soldadura o la incorrecta operación del equipo puede crear discontinuidades en la soldadura. Algunas de ellas pueden solamente afectar la apariencia o el carácter estético de la soldadura, mientras que otras pueden ser perjudiciales para la estructura interna la soldadura o las estructuras soldadas.

### **2.8.1. CLASIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES**

Las discontinuidades se clasifican en internas y externas

#### **2.8.1.1. Discontinuidades internas.**<sup>24</sup>

Las discontinuidades internas son observadas únicamente con la ayuda de la metalografía o por métodos de ensayos no destructivos como el ultrasonido o rayos x y se clasifican en porosidades y fisuras.

a) Las porosidades se forman el núcleo del punto de soldadura a causa de la generación de los gases metálicos provenientes del metal fundido a causa de la soldadura, para luego producirse la contracción, la figura 2.14a muestra un poro generado en el centro del punto de soldadura.

b) Las fisuras se forman por debido a la composición química del material y la geometría del electrodo. En ocasiones las fisuras se generan en el HAZ, debido a

licuación del material en los bordes de grano o por el estrés térmico; Las fisuras no pueden afectar la resistencia de la estructura soldada si están confinadas en el núcleo del punto de soldadura, pero si no están confinadas en el punto de soldadura, pueden llegar a propagarse en forma de ramificaciones causando que la estructura soldada falle. La figura 2.14b muestra las fisuras originadas en la zona afectada por el calor.

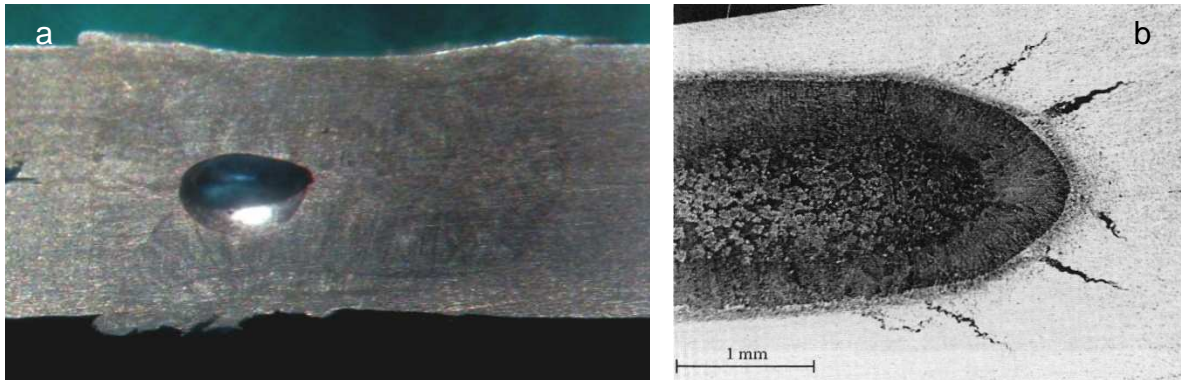


Figura 2. 14. Típicas discontinuidades internas producidas en el punto de soldadura.

### 2.8.1.2. Discontinuidades externas.<sup>24</sup>

Las discontinuidades externas son aquellas que se encuentran en las superficies y/o bordes externos de la soldadura, pueden ser detectados a simple vista o con la ayuda de calibradores y lentes de aumento, entre las más comunes se encuentran:

#### a) Expulsión de material fundido por los bordes

Los bordes del metal base no restringen la formación del punto de soldadura y puede presentarse la expulsión de metal fundido debido a la presión interna del punto de soldadura a causa del metal fundido. Entre las principales causas que producen este defecto son:

- 1.- Cuando se realiza el punto de soldadura muy cerca del borde de las placas y parte de la cara electrodo queda fuera del área de trabajo, la figura 2.15 muestra este defecto.
- 2.- Insuficiente traslape de las placas a soldar (A causa del ahorro de material).
- 3.- Desalineamiento de las placas y/o los electrodos.

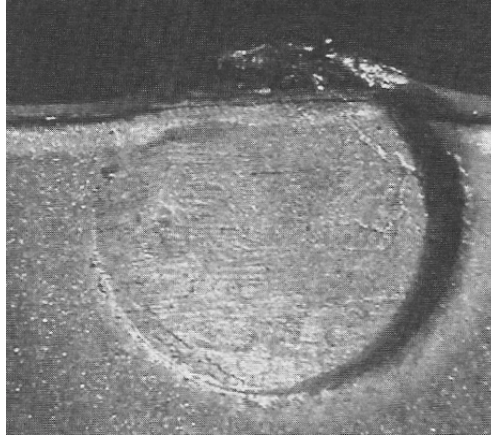


Figura 2. 15. Expulsión de material fundido por los bordes de las placas.

**b) Puntos de soldadura fuera de lugar.**

Estas fallas se presentan cuando el punto de soldadura se realiza fuera del lugar que fuera designado en el diseño, entre las principales causas se tiene el errores en programación (máquinas automáticas) o manipulación errónea por parte del operador, estas fallas se muestran figura 2.16 a y b.

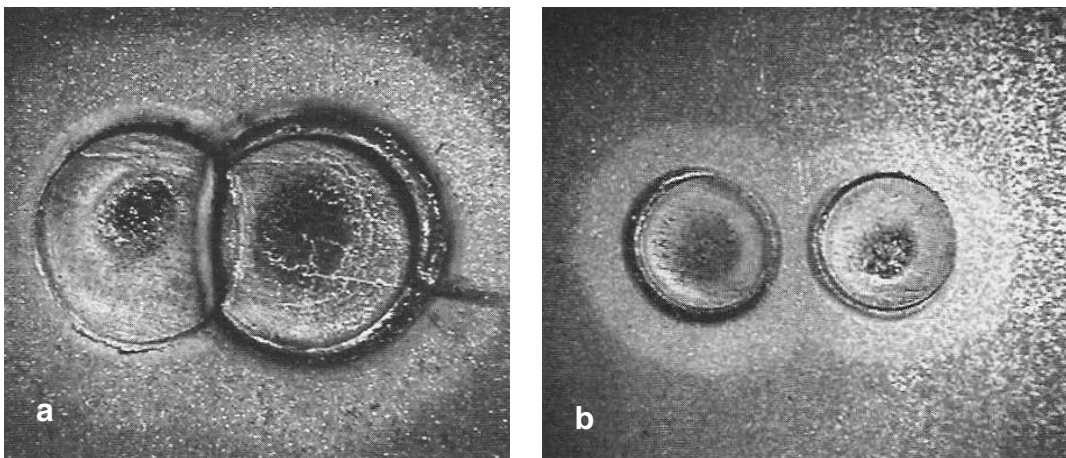


Figura 2. 16. Discontinuidades debido a la soldadura fuera de lugar.<sup>24</sup>

La figura 2.14 muestra dos fallas típicas, producidas por una falta de espacio entre los dos puntos de soldadura.

**c) Sobreindentación**

Una marca de indentación indica que las láminas metálicas pueden estar soldadas, pero en ocasiones estas láminas pueden estar sobreindentadas lo que puede dar como resultado una falla en el punto de soldadura e incluso debilitar la

zona del punto de soldadura debido a la reducción de sección. La sobreindentación puede inclusive llevar a la separación de las láminas a soldar, este efecto se muestra en la figura 2.17

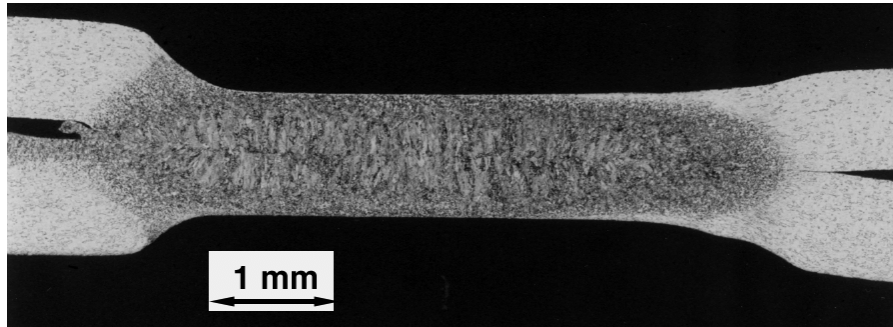


Figura 2. 17 Placas separadas a causa de la sobreindentación.

#### d) Expulsiones

Las expulsiones se presentan cuando el metal fundido es expelido de la zona de fusión del metal y su origen está relacionado con la excesiva indentación, el desgaste del electrodo, la separación entre las láminas metálicas a soldar y la incorrecta calibración de los parámetros de soldadura.

Las expulsiones se clasifican en internas y superficiales.

##### *d.1) Explosiones internas*

Las principales causas de las expulsiones internas son la excesiva indentación y la separación considerable entre las láminas metálicas a soldar, es decir no existe una correcta sujeción de las piezas a soldar; La figura 2.18 muestra un ejemplo de este efecto.



Figura 2. 18. Explosión interna en placas

Estas expulsiones afectan gravemente la calidad del punto de soldadura, debido a que el material expulsado de la zona de fusión es remplazado por los gases metálicos generados en la soldadura y consecuentemente se da origen a la creación de poros.

*d.2) Expulsión superficial.*

La causa principal de la expulsión superficial es la incorrecta calibración del tiempo de acercamiento (SQT), es decir la corriente de soldadura es enviada a los electrodos antes que el electrodo este correctamente posicionado llegando a fundir la parte externa del metal como se muestra en la figura 2.19; Esta discontinuidad se puede presentar además cuando las placas a soldar presentan discontinuidades internas.

La expulsión superficial afecta a la calidad de la superficie soldada y a la vida del electrodo, debido a que se produce fusión de los metales en contacto. La resistencia mecánica de la soldadura no se verá afectada si la expulsión superficial es pequeña y no llegue a producir perforaciones en el punto de soldadura.

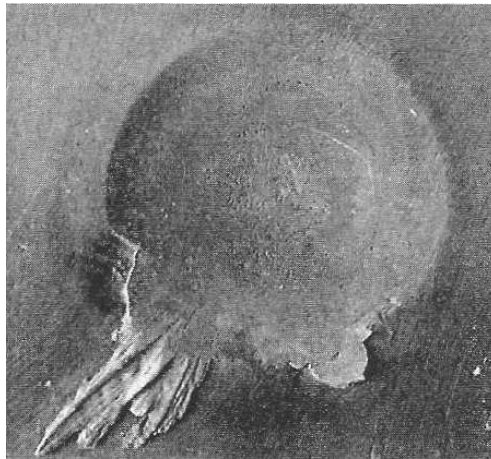


Figura 2. 19. Expulsión en la superficie.<sup>24</sup>

**e) Fisuras en la superficie de suelda.**

Ocurre principalmente cuando se suelda bajo parámetros incorrectos de soldadura y se presenta cuando el metal fundido ataca la susceptibilidad de acero, se presenta principalmente en aceros con altos componentes de aleantes (Aceros inoxidables, HSLA, etc.), estas fisuras son difíciles de detectar con simple

inspección visual, por lo que es necesario realizar la prueba de tracción o la prueba de desgarre. La figura 2.20 muestra un ejemplo de un punto de soldadura con fisuras en la superficie.

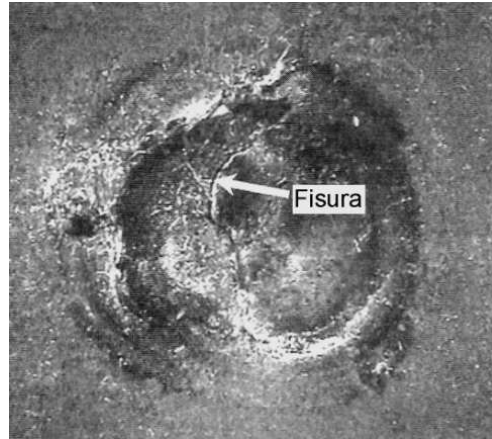


Figura 2. 20. Fisura en la superficie de soldadura.<sup>24</sup>

#### f) Angulo de distorsión.

Otro tipo de discontinuidad es la distorsión excesiva de las placas metálicas después de la soldadura. Este efecto puede ocurrir por el inapropiado apriete de los electrodos a las placas metálicas (Figura 2.21a), o la incorrecta alineación angular o axial de los electrodos y durante la soldadura. Cuantificar una distorsión es difícil, pero es fácilmente detectable.

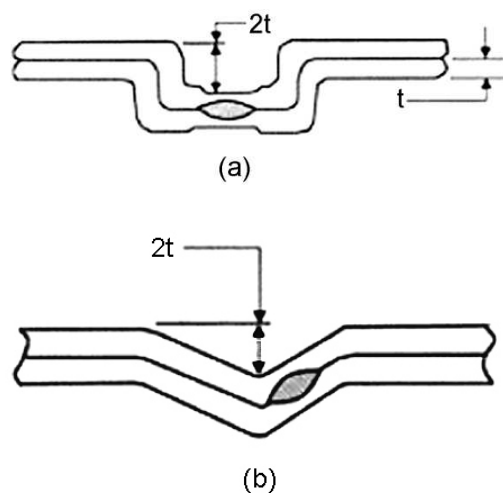


Figura 2. 21. Distorsiones producidas durante la soldadura  
a) Posicionamiento incorrecto de las placas; b) Electrodo desalineado.<sup>24</sup>

Para evitar las distorsiones de deberá alinear los electrodos, revisar su estado, el estado de los adaptadores y si es necesario remplazarlos.

## **2.9. SOLIDIFICACIÓN DEL MATERIAL BASE EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA**

Durante la soldadura, la solidificación del punto de soldadura es similar a la solidificación de un metal en el proceso de fundición, el cual consiste en dos etapas: la nucleación de la fase sólida y el subsecuente crecimiento de los cristales.

El proceso de cristalización es controlado por la disipación de calor, ya sea por los electrodos o por el metal base. La dirección de enfriamiento, la tasa de enfriamiento y la composición del metal base afectan el tipo, tamaño y orientación de los cristales formados. Durante la solidificación del punto de soldadura se presenta un cambio en la composición del metal base, justo en donde empiezan a precipitar los cristales.

Cuando existe un rápido enfriamiento en la zona de soldadura, se presenta el fenómeno de la microsegregación, es decir la tasa de difusión en los cristales precipitados no es lo suficientemente amplia, como para lograr una composición homogénea por lo cual se forman capas de diferente composición química y el cristal que núcleo primero será rico en unos componentes y pobre en otros, mientras que en las capas externas sucederá lo contrario.

Entre los cristales que se forman están las dendritas, los cristales globulares y celulares que se forman por la composición del material base y la transferencia de calor a través de la interface líquido sólido, bajo condiciones adecuadas de soldadura el enfriamiento por agua de los electrodos actúan como un sumidero de calor absorbiendo la mayor cantidad de calor y el resto se disipa por el material base.



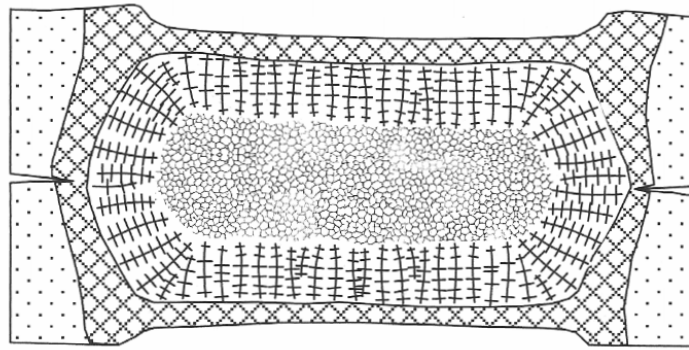


Figura 2. 22. Estructura esquemática de un punto de soldadura ideal<sup>24</sup>

La figura 2.22 muestra un punto de soldadura ideal, el cual es realizado con parámetros de soldadura adecuados y un correcto sistema de enfriamiento.

Cuando el enfriamiento no es el óptimo en el proceso de soldadura por resistencia de puntos, es decir los parámetros de soldadura son erróneos o existen barreras térmicas indeseables pueden generarse defectos en la soldadura como poros o fisuras, especialmente cuando el volumen que se contrae durante la soldadura es muy grande (chapas metálicas de espesores grandes). La figura 2.23 muestra este efecto en donde se aprecia un crecimiento de grano columnar en la dirección de los electrodos causado por el enfriamiento rápido en la dirección los electrodos.

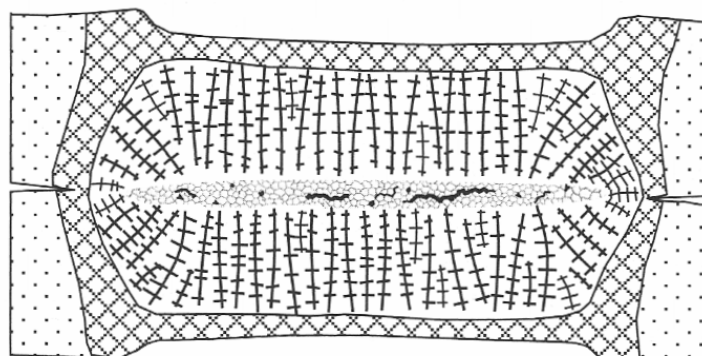


Figura 2. 23. Estructura esquemática de un punto de soldadura, con enfriamiento más rápido en los electrodos que en el metal base.<sup>24</sup>

Existe otro efecto y se presenta cuando el enfriamiento de los electrodos no es el adecuado y las causas principales pueden ser: los electrodos no disponen de

sistema de enfriamiento, la velocidad de circulación del agua es muy baja, los electrodos están en mal estado o el área de contacto entre el electrodo y el metal base es muy pequeña, por lo tanto gran parte del calor será disipado por el material base y la última porción de líquido solidificará en el centro del punto de soldadura, como se muestra en la figura 2.24.

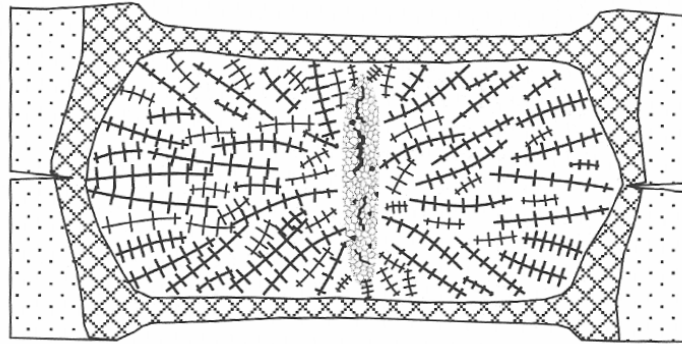


Figura 2. 24. Estructura esquemática de un punto de soldadura con enfriamiento rápido a través del metal base y deficiente en los electrodos.<sup>24</sup>

El efecto de esta discontinuidad afecta muy poco en la resistencia mecánica de la junta soldada ya que se originan lejos de los bordes del punto de soldadura, pero en ocasiones las fisuras se propagan hacia los bordes del punto de soldadura provocando fallas en la soldadura.<sup>24</sup>

## **2.10. SOLDADURA POR RESISTENCIA DE ACEROS INOXIDABLES AUTENITICOS.**

Los aceros inoxidable austeníticos tienen alta resistencia a la conductividad eléctrica y son fácilmente soldados por soldadura por resistencia de puntos. La consideración de gran importancia que se debe tener, es el enfriamiento rápido en el rango crítico de 427°C (800°F) a 760 °C (1400°F).

La rápida evacuación de calor en la soldadura por resistencia de puntos es ideal para reducir la posibilidad de la precipitación de los carburos de cromo en los bordes de grano.

Otra consideración de gran importancia es que las partes a soldar deberán estar libres de óxidos, costras, pintura, grasas y aceites.

## 2.11. DIAGRAMA LOBE.<sup>24</sup>

Los diagramas lobe son diagramas tiempo de soldadura vs corriente de soldadura con la fuerza en los electrodos como parámetro fijo y ayudan a la selección de los parámetros de soldadura.

Estos diagramas se dividen en 3 regiones como se muestra en la figura 2.25

1. Región donde no se ha producido el punto de soldadura (no existe fusión).
2. Punto de soldadura aceptable.
3. Punto de soldadura con expulsión.

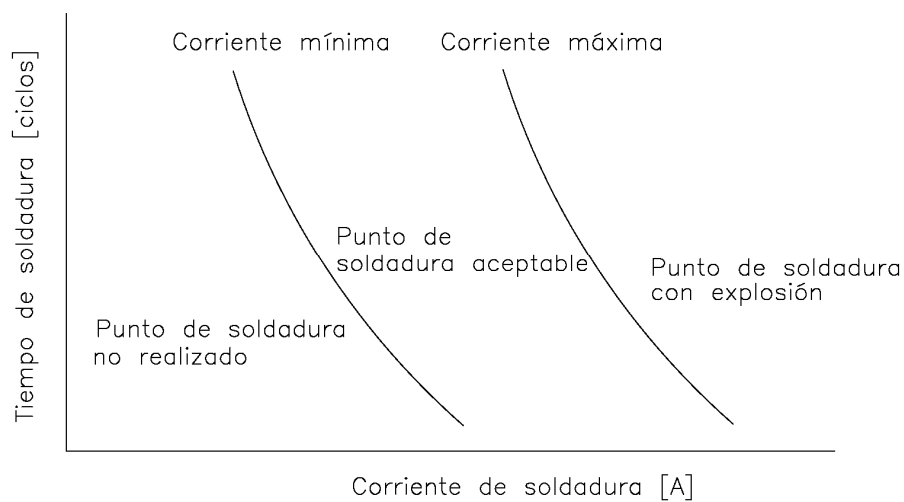


Figura 2. 25. Diagrama lobe

Los diagramas lobe se desarrollan generalmente en los laboratorios para obtener los parámetros de soldadura. Existen normas y procedimientos su desarrollo, entre las normas recomendadas se encuentra la norma de AWS/SAE D8.9M.

## 2.12. INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS EQUIPOS DE SOLDADURA RSW, EN LA CALIDAD DE SOLDADURA.

Muchos investigadores han dedicado gran parte de sus estudios, al análisis de la influencia de los equipos de soldadura por resistencia en la calidad de la soldadura, para ello dividen al equipo de soldadura por resistencia en dos sistemas eléctrico y mecánico.

### **2.12.1. El sistema eléctrico y electrónico**

Este sistema provee y controla la energía eléctrica necesaria para soldar y accionar los componentes del equipo RSW.

En operación el equipo de soldadura, debe producir por lo menos dos señales de control; Una para encender y apagar los SCR (corriente de control de soldadura) y otra para encender y apagar las válvulas eléctricas de aire para la fuerza del electrodo y de agua para el control del enfriamiento.

### **2.12.2. El sistema mecánico**

Las características del sistema mecánico son la maniobrabilidad de la máquina, la fricción la masa, tienen un rol muy importante en la soldadura por resistencia y consecuentemente en la calidad de la soldadura.

Un desplazamiento largo de los electrodos influye en la variación del contacto que tendrá el electrodo con las chapas a soldar y como resultado final será la baja calidad de la soldadura.

## **2.13. CONDICIONES SUPERFICIALES DE LOS METALES A SOLDAR**

Las superficies de los metales a soldar deberán estar limpias, libre de óxidos, químicos compuestos y deben tener una superficie lisa.

Los aceros inoxidable no se corroen y por lo regular no requieren una limpieza minuciosa antes de someterlos a soldadura por resistencia. <sup>[13]</sup>

## **2.14. CALIDAD DE LA SOLDADURA.<sup>3</sup>**

La calidad de la soldadura a obtener, depende principalmente de la aplicación que esta vaya a desempeñar. Por ejemplo en aviones y equipos espaciales la calidad de la soldadura debe cumplir con varias especificaciones muy estrictas, mientras que en otras aplicaciones, como automóviles las especificaciones son menos rígidas. En general la calidad de los puntos de soldadura se determinan en base a los siguientes criterios:

- Aspecto de la superficie.
- Tamaño del punto de la soldadura.
- Indentación de los electrodos.

- Resistencia mecánica y ductilidad.
- Discontinuidades internas.
- Separación de las láminas y expulsión de metal.

## **2.15. CUIDADOS A TENER EN RSW**

Es necesario tener cuidados cuando se está trabajando con equipos de soldadura por resistencia ya que los accidentes pueden ocurrir cuando el equipo es manejado de forma incorrecta o por personal no capacitado.

Cuando se coloquen, replacen ó alineen los electrodos, se debe cortar el suministro de energía, cerrar las válvulas de aire comprimido, de entrada y de salida del agua de refrigeración.

Durante la soldadura de punto se debe usar el equipo de seguridad como casco, gafas, tapones auditivos, guates, zapatos aislantes y overol. Equipo necesario para evitar lesiones de quemaduras por las chispas generadas o expulsión del metal.

No insertar las manos, dedos, brazos u otra parte del cuerpo entre los electrodos, ya que podrían ser atrapados en la máquina causando lesiones serias.

No tocar ninguna parte desnuda de la máquina ya que existe peligro de riesgo eléctrico.

## CAPITULO 3

### 3. PROCESO EXPERIMENTAL

El procedimiento a seguir en el desarrollo del proceso experimental del presente trabajo se muestra en la figura 3.1.

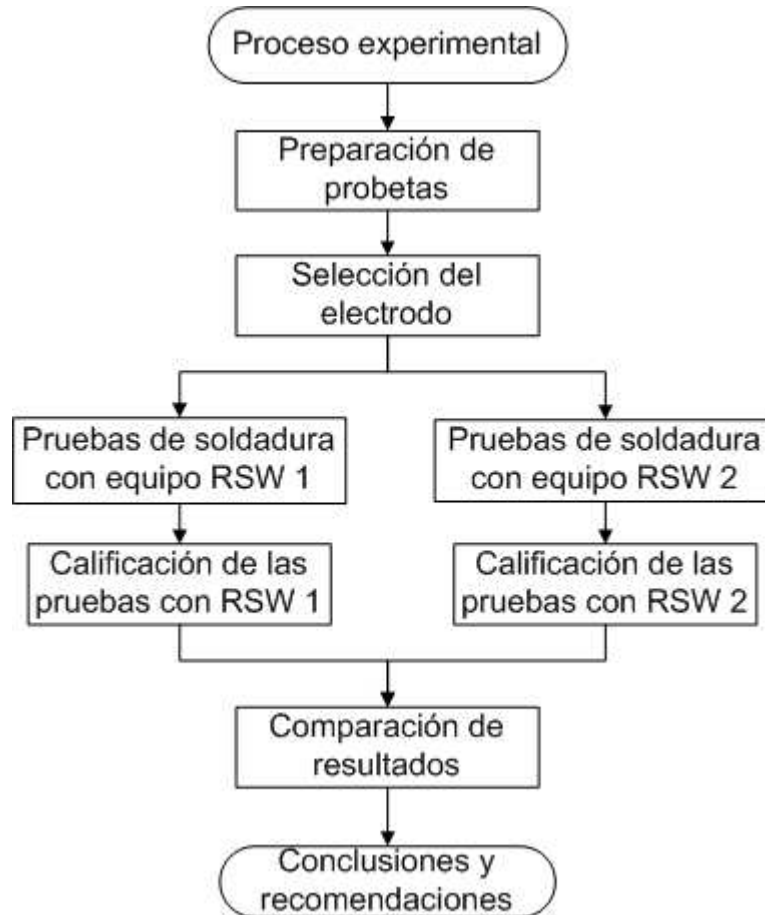


Figura 3. 1. Procedimiento del desarrollo experimental.

La figura 3.1 muestra las diferentes etapas del proceso experimental del presente trabajo, empezando con la selección del material que servirá para la preparación de las probetas; Luego la selección del electrodo y búsqueda de proveedores tanto locales como extranjeros. Una vez solventados los pasos anteriores se procede a la realización de las pruebas con dos equipos de soldadura RSW1 y RSW2; Finalmente se procede a la calificación de las pruebas de soldadura, para posteriormente realizar una comparación entre los dos resultados obtenidos.

### 3.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

El acero inoxidable tipo 304 es seleccionado para la extracción de las probetas, debido a las facilidades que presta para el proceso de soldadura en estudio y su disponibilidad en el mercado.

Las propiedades y composición química de esta aleación se muestran en las tablas 1.3 y 1.4.

#### 3.1.1. TAMAÑO DE LAS PROBETAS.

Las dimensiones de las probetas de ensayo para soldadura por resistencia de puntos no han sido unificadas, lo que puede causar confusión en la realización de las pruebas de soldadura como en su interpretación <sup>24</sup>.

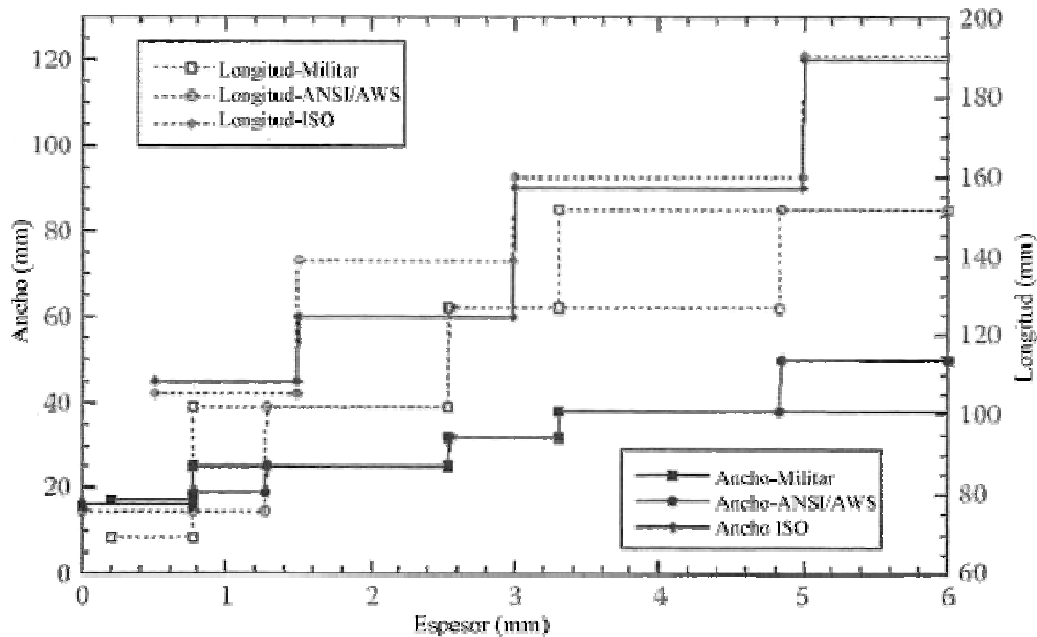


Figura 3. 2. Dimensiones de las probetas en base a diferentes normas.<sup>24</sup>

La figura 3.2 muestra la variación drástica de longitud y ancho entre las normas ISO, ANSI/AWS y militares, para un mismo espesor de probeta.

Por lo tanto el tamaño de la probeta seleccionado para los espesores de 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm y 2.5 mm, será un promedio de las dimensiones encontradas en las bibliografías consultadas y se muestran en la figura 3.3. Mientras que en las probetas de 3.0 mm de espesor se incremento la longitud en 10 mm.

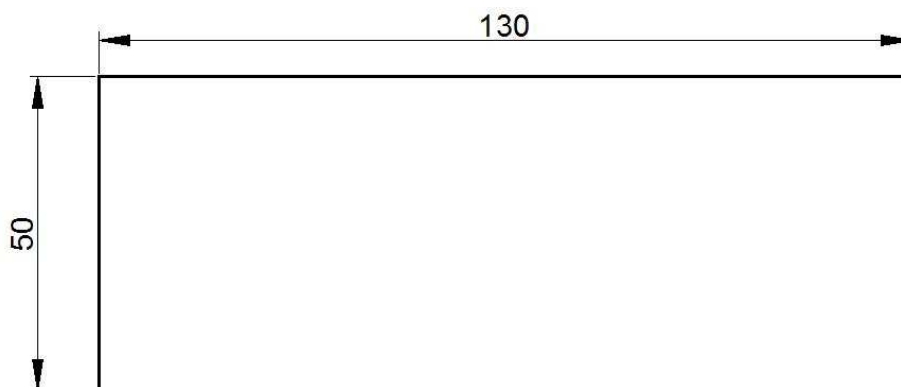


Figura 3. 3. Tamaño de probeta seleccionado para realizar las pruebas.

## 3.2. SELECCIÓN DEL ELECTRODO

La selección del electrodo depende de varios factores como son el tipo y espesor de material a soldar, la facilidad de acceso a soldar y la forma de la huella requerida causada por la indentación; Estos factores permiten seleccionar la composición química y geometría del electrodo.

### 3.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ELECTRODO.

Existe una gran variedad de electros para la soldadura por resistencia de puntos, razón por la cual, la asociación de fabricantes y soldadores de soldadura por resistencia (RWMA por sus siglas en ingles) han clasificado a los electrodos de acuerdo a su composición química en tres grupos.

Tabla 3. 1. Clasificación de los electrodos para soldadura por resistencia mediante su composición química.<sup>4</sup>

<b>Grupo</b>	<b>Características</b>
A	En base a aleaciones de Cobre.
B	Metal refractario y componentes de metal refractario.
C	Materiales especiales.

La tabla 3.1 muestra la clasificación en grupos de los electrodos para soldadura por resistencia de acuerdo a la composición química.



### **3.2.1.1. GRUPO A: ALEACIONES A BASE DE COBRE.<sup>3</sup>**

Las aleaciones en base de cobre se dividen en cinco clases.

Las aleaciones de clase 1 son materiales de propósito general para aplicaciones de soldadura por resistencia. Puede usarse para electrodos de soldadura de puntos y de costura cuando las conductividades eléctrica y térmica son más importantes que las propiedades mecánicas, ya que tienen altas conductividades eléctrica y térmica.

Las aleaciones de clase 2 tienen mejores propiedades mecánicas pero conductividades eléctrica y térmica un poco más bajas que las aleaciones de clase 1. Las aleaciones de clase 2 presentan una buena resistencia a la deformación bajo presiones moderadamente altas y son las mejores aleaciones para propósito general. Esta clase de aleación es adecuada para la soldadura de puntos y de costura de aceros de baja y moderada aleación, aceros inoxidable, aleaciones de baja conductividad a base de cobre y aleaciones de níquel.

Las aleaciones de clase 3, tienen mejores propiedades mecánicas que sus antecesoras pero baja conductividad térmica y eléctrica que las anteriores. La principal aplicación de los electrodos con este tipo de aleación es en la soldadura de materiales resistentes al calor que conservan propiedades de resistencia mecánica a altas temperaturas. Para soldar dichos materiales se requiere elevadas fuerzas en los electrodos, por lo tanto una buena resistencia mecánica de ellos.

Las aleaciones del tipo 4 son endurecibles mediante el envejecimiento, alcanzando la mayor dureza y resistencia mecánica de todas las aleaciones de grupo A con el pasar de tiempo. Su baja conductividad térmica y eléctrica y la tendencia a la friabilidad en caliente las hace inapropiadas para electrodos de soldadura por puntos o de costura. Se recomienda su uso en componentes que tengan una gran área de contacto.

Las aleaciones de clase 5 se encuentran en elementos mecánicos de conformación por medio del colado y con alta resistencia mecánica con conductividad eléctrica y térmica moderada. Se recomienda su uso para electrodos grandes de soldadura por destello, material de respaldo para otras aleaciones de electrodos y muchos otros tipos de miembros estructurales portadores de corrientes de máquinas y accesorios de soldadura por resistencia.

### **3.2.1.2. GRUPO B: METAL REFRACTARIO Y COMPONENTES DE METAL REFRACTARIO.<sup>3</sup>**

Los electrodos conformados con este tipo de aleación contienen un metal en forma de polvo, por lo regular tungsteno o molibdeno, y se fabrican por el método de metalurgia de los polvos. Su característica principal es la resistencia a la deformación en servicio.

Las aleaciones de clase 10, 11 y 12 son mezclas de cobre y tungsteno, con lo que se logra que la dureza, la resistencia mecánica y la densidad aumenten, mientras que la conductividad eléctrica disminuye al aumentar el contenido de tungsteno.

Las clases 13 y 14 son de tungsteno y molibdeno respectivamente son comercialmente puros y se consideran los únicos materiales para electrodos que tienen buen desempeño en la soldadura de metales no ferrosos de alta conductividad eléctrica.

### **3.2.1.3. GRUPO C: MATERIALES ESPECIALES.<sup>3</sup>**

Son aleaciones de cobre no clasificadas y otros materiales.

El cobre reforzado por dispersión es un material no clasificado que puede usarse para electrodos de soldadura por resistencia.

El cobre de alta pureza que contienen pequeñas cantidades de óxido de aluminio submicroscópico distribuido de manera uniforme en la matriz, el óxido de aluminio refuerza de manera significativa la matriz de cobre y eleva la temperatura de recristalización del material trabajado en frío. Las propiedades mecánicas y la conductividad eléctrica de las barras de cobre reforzado por dispersión satisfacen los requisitos de las aleaciones clase 1 y clase 2 del grupo A de la RWA, pero no se clasifican como tales.

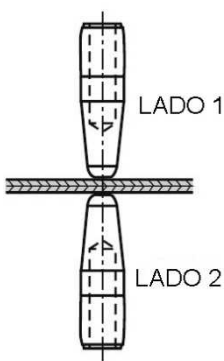
La tabla 3.3 muestra recomendaciones prácticas, para la selección correcta de electrodos cuando se requiera soldar chapas metálicas de materiales similares como el acero inoxidable, acero galvanizado, etc.

Tabla 3. 2. Materiales recomendados para la soldadura de materiales similares.<sup>4</sup>

METALES FERROSOS SIMILARES														
	ACERO INOXIDABLE		ACERO GALVANIZADO		CHAPA DE ESTAÑO		CHAPA PLOMO ESTAÑO		CHAPA DE CADMIO		CHAPA DE CROMO		ACERO LAMINADO EN FRIO	
LADO 1	A	2,3 <sup>a</sup>	A	1,2,20	B	1,2,20	B	1,2,20	A	1,2,20	A	2	A	2
LADO 2	2,3		2,3		2,3		2,3		2,3		2,3		2,3	

La interpretación de la tabla 3.3 se realiza con la ayuda de la tabla 3.4.

Tabla 3. 3. Tabla de interpretación.<sup>4</sup>

CUADRO DE INTERPRETACIÓN		
	SOLDABILIDAD	Electrodo clase
	A= Excelente. B= Bueno. C= Malo.	RWMA, para el lado 1 (Ver anexo 2)
	Electrodo clase RWMA, para el lado 2 (Ver anexo 2)	

### 3.2.2. TIPOS DE ELECTRODOS PARA SOLDADURA POR RESISTENCIA POR PUNTOS.<sup>4</sup>

Existen seis tipos de electrodos para la soldadura por resistencia por puntos:

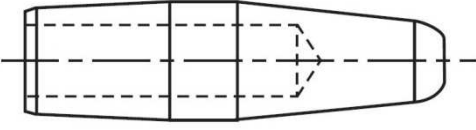
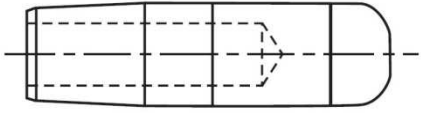
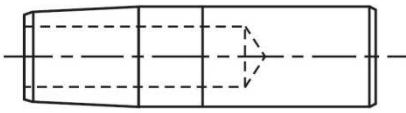
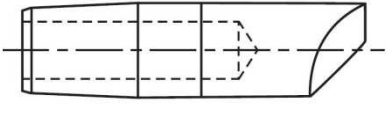
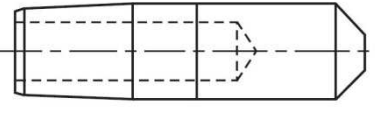
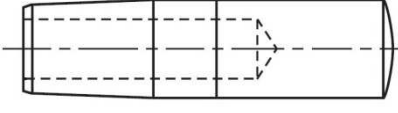
1. Electrodos rectos con punta ahusada.
2. Electrodos rectos con punta recta.
3. Capsula de electrodos y adaptadores para las capsulas.
4. Electrodos con un doblez.
5. Electrodos con doble doblez.
6. Electrodos con punta especial.

Los electrodos pueden ser de un solo elemento o compuestos por una capsula y por su correspondiente extensión, los que se muestra en el anexo 2 paginas 7-9.

### 3.2.3. TIPO DE PUNTA O NARIZ

La tabla 3.4 muestra 5 configuraciones de la punta o nariz de los electrodos de soldadura por resistencia.

Tabla 3. 4. Configuraciones de la puntas de los electrodos.

Tipo	Denominación	Gráfico
A	Agudo	
B	Domo	
C	Recto	
D	Excéntrico	
E	Cono truncado	
F	Radial	

#### 1) Agudo (A-Pointed)

Su forma es cónica pronunciada con cara plana, es utilizado ya que mantiene su forma durante el trabajo y se puede regular el tamaño de la cara plana. Es difícil colocar o retirar de la maquina por lo que requiere una herramienta apropiada.

#### 2) Domo (B-Dome)

Esta configuración se utiliza para trabajos donde no se requiera gran precisión, los esfuerzos que soporta es mayor en relación al resto de configuraciones, es fácil colocar y extraer de la maquina.

### 3) Recto (C-Flat)

Debido gran área de contacto es de muy poco uso y se utiliza solo cuando se vaya a soldar espesores considerables.

### 4) Excéntrico (D-Offset)

Su uso está destinado cuando se requiera hacer puntos de soldadura cerca de paredes verticales o lugares en donde es imposible el ingreso de electrodos de punta recta.

### 5) Cono truncado (E-Truncated)

Es una variación de la forma agudo (A-Pointed)

### 6) Radial (F-Radius)

Es usado en la soldadura de aluminio y en aplicaciones donde se requiera buena precisión, soporta altas presiones sin llegar a deformarse y es de fácil alineación; La superficie radial es fácil de limpiar sin ser retirado de la maquina.

## **3.2.4. DESIGNACIÓN DE LOS ELECTRODOS**

Los electrodos utilizados en soldadura por resistencia de puntos se designan de acuerdo a su tipo de punta o cara, grupo al que pertenece, clase RWMA y número de dobleces.

Por ejemplo cuando los electrodos rectos se designan con una letra mayúscula que va desde la A hasta la F la cual indica el tipo de punta del electrodo; Le sigue un número que el grupo y la clase de material; El segundo número consiste el tipo de adaptador que utiliza. El anexo 2, pagina 7 muestra las nominaciones de los electrodos de soldadura por resistencia de puntos.

## **3.2.5. ELECTRODO SELECCIONADO**

De acuerdo a la tabla 3.2 y 3.3, el electrodo requerido deberá ser de clase 2 o 3, aleación recomendada para soldadura de aceros inoxidable.

La figura 3.4 muestra la capsula macho de clase 2 facilitada por la empresa privada y utilizada en las pruebas de soldadura con el equipo RSW2 proporcionado por la empresa privada.



Figura 3. 4. Capsula MA25Z00 utilizadas en las pruebas.

Donde:

- M o W: Capsula tipo macho (Male Cap)
- A: Tipo de punta de forma aguda (A-Pointed)
- 2: Electrodo Clase 2 (RWMA), Grupo A
- 5: Adaptador #5 RW
- Z: Con contenido de Circonio
- 00: No contiene aleantes adicionales

### 3.2.6. ALINEACION DE LOS ELECTRODOS.<sup>24</sup>

Es necesario tener alineados los electrodos para obtener superficies bien definidas y que sean paralelas a las caras de los electrodos, estas condiciones ayudan a obtener un punto de soldadura de buenas características.

La figura 3.5a muestra la alineación correcta de los electrodos, donde las dos caras de los electrodos deben ponerse en contacto en toda su superficie cuando se encuentren realizando la soldadura y así poder evitar la pérdida de densidad de corriente.

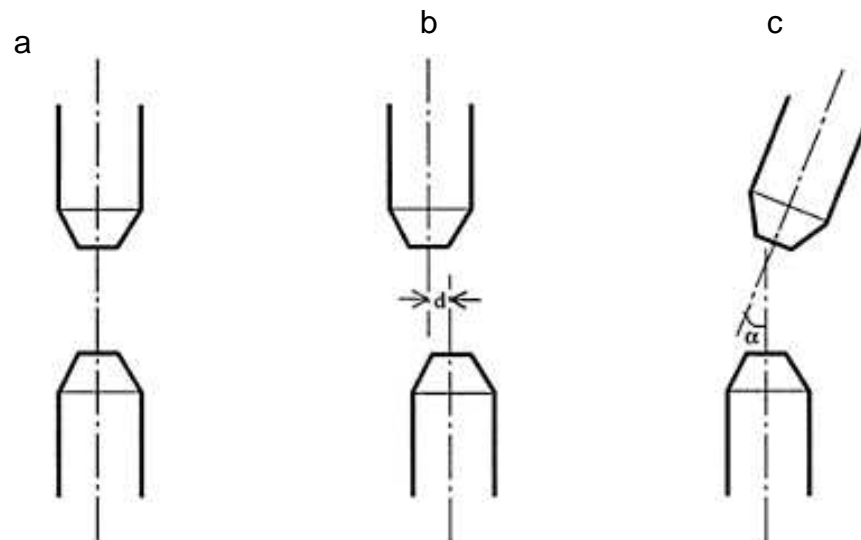


Figura 3. 5. Alineación de los electrodos.<sup>24</sup>

- a) Alineación axial correcta, b) Electrodo desalineado axialmente  
c) Electrodo con desalineamiento angular.

La figura 3.5b muestra un electrodo desalineado axialmente una distancia  $b$ , en el cual existirá pérdida de densidad de corriente durante la soldadura y un punto de soldadura elíptico, como se muestra en la figura 3.6.

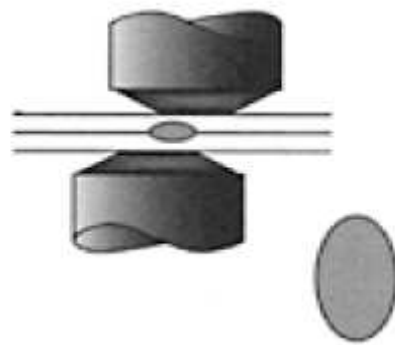


Figura 3. 6. Punto de soldadura elíptico producido por un electrodo desalineado axialmente una distancia  $b$ .

La figura 3.5c, muestra un electrodo con desalineamiento angular, en el cual el punto de soldadura formado será una media luna, es decir el punto de soldadura será deficiente por lo cual la resistencia mecánica de la soldadura se verá reducida, este efecto se muestra en la figura 3.7.

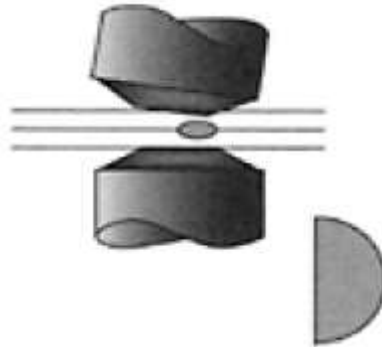


Figura 3. 7. Punto de soldadura producido por electrodos desalineados angularmente.

El alineamiento de electrodos se debe verificar con el método de las huellas en papel carbón. Las huellas se deben tomar al inicio de operación, luego a los 200 puntos de soldadura, a los 500 puntos de soldadura y así sucesivamente. Si los electrodos se encuentran desalineados se debe realinear los adaptadores de los electrodos hasta obtener las huellas aceptables.<sup>21</sup>

### **3.2.7. EMPRESAS PROVEEDORAS DE ELECTRODOS PARA RSW**

Entre las empresas proveedoras de electrodos para RSW, se tiene a CENTERLINE, CONTACTS METAL WELDING y NRSW.

CENTERLINE es una empresa Estadounidense con sede en Canadá y con quien se estuvo en contacto. Las capsulas de electrodo requeridas para el desarrollo de las pruebas tiene un precio en Canadá de 7.70 USD por 50 capsulas, las que se muestran en el anexo 3.

### **3.2.8. FUNCIONES PRINCIPALES DE UN ELECTRODO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA**

Las funciones principales de un electrodo de soldadura por resistencia son:

- Conducir la corriente de soldadura a los elementos a soldar.
- Transmitir la fuerza a la unión.
- Fijar o colocar las piezas en alineación correcta.
- Eliminar calor de la soldadura o la parte adyacente.



### 3.2.9. LA VIDA DEL ELECTRODO.

Un electrodo en el proceso de soldadura por resistencia se desgasta debido a los calentamientos e impactos repetitivos que sufre la cara durante la soldadura, por lo tanto la vida del electrodo (número de puntos capaz de realizar) y su correspondiente desgaste, está determinado tanto por los procesos eléctricos y térmicos inmersos en este proceso de soldadura.



Figura 3. 8. Electrodo con vida útil cumplida.

La figura 3.8 muestra tres capsulas de electrodos, que ya han cumplido la vida útil. Durante la soldadura es posible que se presente una interacción metalúrgica entre los electrodos y las placas metálicas debido al efecto Joule originado en la resistencia eléctrica de contacto entre la cara del electrodo y la placa, esta resistencia eléctrica depende de la condición superficial de estos elementos y es la que determina la generación de calor y las reacciones metalúrgicas.

Por ejemplo al soldar placas de acero galvanizado, se tiene una resistencia eléctrica de contacto baja debido a la alta conductividad del cinc, por lo tanto se requiere una cantidad de corriente mayor en relación al acero convencional (sin recubrimiento) con el mismo espesor. El cinc liberado durante la soldadura forma bronce que cubren la cara del electrodo e incrementa su resistividad, por lo tanto el electrodo incrementará su temperatura durante la soldadura y por lo tanto reducirá la vida útil, este efecto se puede apreciar cuando en la superficie del metal soldado se observa anillos de color dorado oscuro.

### 3.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO

Las pruebas de soldadura se realizarán en dos equipos diferentes para su posterior comparación.

El primero equipo será proporcionado por el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional (RSW 1), mientras que el segundo equipo será proporcionado por la empresa General Motors OBB (RSW 2).

#### 3.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE RSW DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE SOLDADURA DE INGENIERIA MECÁNICA.

La tabla 3.5, muestra las características del equipo de RSW disponible en el laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Tabla 3. 5. Características del equipo RSW del laboratorio de Soldadura.

Marca: KYWY	Voltaje primario: 220 V	Corriente en el secundario: 900 A
Tipo: 200	Presión máx.: 250 kg	Peso total: 151 kg.
Input máx.: 3 kVA	Rango de uso: 4x4 m/m	Nº 08731
Capacidad: 20 kVA	Tasa de uso: 10%	Año: 1979.
Ciclo: 50/60 Hz		

Como información adicional se tiene que este equipo carece de un sistema de enfriamiento en los electrodos y su estado actual no permite la configuración de los parámetros de soldadura tales como la fuerza en los electrodos, tiempo de acercamiento, ciclos de soldadura y tiempo de sujeción o fragua, que son de gran importancia e influyen directamente en la calidad de la soldadura.

#### 3.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE RSW PROPORCIONADO POR LA EMPRESA PRIVADA

Las características del equipo proporcionado por la empresa privada se muestran en el anexo 4.

### **3.4. PRUEBAS DE SOLDADURA**

Para encontrar los parámetros de soldadura por resistencia en aceros inoxidables austeníticos se utilizará el método de prueba y error.

La configuración de los parámetros de la soldadura para realizar las pruebas de soldadura se realizó tomando como base parámetros encontrados en la literatura, los proporcionados por la empresa ATEK (Anexo 5) y los utilizados por General Motors para el acero al carbono.

### **3.5. PARAMETROS DE CALIFICACION PARA LA SOLDADURA**

#### **3.5.1. INSPECCIÓN VISUAL.**

La inspección visual ayuda a controlar de forma rápida la calidad del punto de soldadura. Existen varias condiciones indeseables que se pueden examinar mediante la inspección visual.

##### **1. Sobreindentación de los electrodos.**

Existen varias causas que producen este efecto, entre las más importantes se tiene: el mantenimiento incorrecto y/o rectificación de las puntas de los electrodos, la falta de control en la fuerza del electrodo, las que conlleva a la pérdida de la resistencia mecánica de la soldadura debido a la reducción del metal en el punto de la soldadura.

##### **2. Fusión y expulsión superficial.**

Este efecto se presenta cuando el metal a soldar está contaminado o no se realiza una correcta limpieza antes de ser soldado, otra causa es también la falta de alineación de los electrodos. La expulsión superficial reduce la resistencia mecánica de la estructura soldada ya que parte del material es desprendido del metal base.

##### **3. Soldadura de forma irregular.**

Existen varias causas que contribuyen a la generación de esta condición entre las principales se tiene:

Incorrecta alineación de los electrodos y los elementos a soldar.

Deslizamiento de los elementos a soldar.

Desgaste excesivo del electrodo a causa de la mala selección del electrodo y/o el incorrecto rectificado de las puntas.

Embonamiento deficiente de los elementos que trabajan a presión.

Estas causas generan puntos de soldadura con menor resistencia mecánica debido a la alteración del área de contacto en la zona interior y a la expulsión del metal fundido.

#### 4. Depósito del electrodo sobre los elementos de trabajo.

Las causas que generan este defecto son:

El material a soldar se encuentra con incrustaciones o no se realizó una limpieza adecuada.

Fuerza deficiente en los electrodos.

Baja corriente de soldadura.

Selección incorrecta del electrodo.

Las causas anteriormente mencionadas hacen que el punto de soldadura presente mal aspecto, menor resistencia a la corrosión y la reducción de la vida útil del electrodo.

#### 5. Grietas, cavidades profundas o agujeros diminutos.

Este efecto se produce por el retiro anticipado de la fuerza en los electrodos, por lo cual el punto de soldadura no llega a realizarse. Como consecuencia se tiene la reducción de la resistencia a la fatiga de la estructura soldada.

### 3.5.2. ANGULO DE DISTORSIÓN.<sup>5</sup>

Placas metálicas con un ángulo de distorsión mayor a  $25^\circ$  respecto al plano normal no serán aceptadas. Deben modificarse los parámetros para mantener el ángulo de distorsión por debajo de los  $25^\circ$ . La figura 3.9 muestra la forma de medición del ángulo de distorsión.



Figura 3. 9. Angulo de distorsión permitido.<sup>5</sup>

### 3.5.3. PRUEBAS DESTRUCTIVAS

En la calificación de la soldadura es necesario realizar las pruebas destructivas, las cuales se clasifican en las pruebas de taller y el ensayo metalográfico.

Las herramientas necesarias para realizar las pruebas de taller se muestran en la figura 3.10.

- Cincel.
- Rodillo para desgarre.
- Martillo.
- Entenalla.
- Calibrador.



Figura 3. 10. Herramientas necesarias para los ensayos de taller.

#### 3.5.3.1. Prueba de desgarre

La prueba de desgarre se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- Con los mejores parámetros seleccionados, obtener una probeta soldada con tres puntos de soldadura.
- Separar los extremos de las placas metálicas.
- Sujetar uno de los extremos en la mordaza de la entenalla.
- Colocar el rodillo de desgarre en el otro extremo de la placa, como se muestra en la figura 3.11.<sup>10</sup>
- Girar el rodillo de desgarre hasta que se produzca el desgarre, como se muestra en la figura 3.12.<sup>10</sup>

Durante la realización de la prueba de desgarre, el operador debe analizar el comportamiento del material si es dúctil o frágil.



Figura 3. 11. Forma de realizar la prueba de desgarre.



Figura 3. 12. Resultado de la prueba de desgarre.

### 3.5.3.2. Prueba del cincel

La prueba del cincel se realiza mediante el siguiente procedimiento.

- Con los mismos parámetros seleccionados para la prueba de desgarre soldar una probeta con tres puntos de soldadura.
- Sujetar la probeta en la entenalla.
- Colocar el cincel en entre las placas soldadas en medio de dos puntos de soldadura.
- Martillar el cincel hasta que este ingrese hasta la altura de los puntos de soldadura, como se muestra en la figura 3.13.

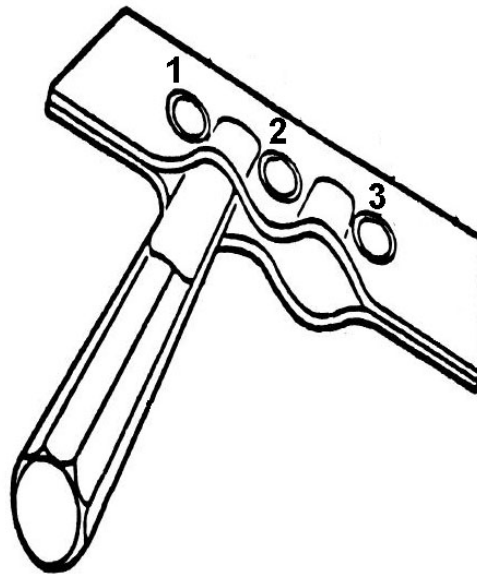


Figura 3. 13. Prueba del cincel.<sup>21</sup>

La prueba de cincel generalmente se desarrolla in situ, es decir los operarios de producción son los encargados de ejecutarla.

### 3.5.3.3. ENSAYO METALOGRAFICO

El ensayo metalográfico ayuda a obtener las micrografías o macrografías dependiendo del requerimiento. Para el presente trabajo se obtendrá las macrografías con el fin de analizar las discontinuidades internas de las probetas soldadas.

### 3.5.4. TAMAÑO DEL PUNTO SOLDADURA.

Existen normas corporativas desarrolladas para determinar el tamaño de los puntos de soldadura, entre ellas se tiene las normas desarrolladas por Ford y

General Motors con la colaboración de la AWS e ISO. El tamaño del punto de soldadura debe estar dentro de los rangos  $3\sqrt{t}$  a  $6\sqrt{t}$ , donde  $t$  es el menor espesor de las placas a soldar.<sup>24</sup>

El punto de soldadura se puede medir de dos formas, la primera es medir después de haber realizado el ensayo metalográfico y la segunda es medir después de haber realizar el ensayo de desgarre.

Para medir el punto de soldadura después de realizado el ensayo de desgarre, se mide la superficie de soldadura como se muestra en la figura 3.14 y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Diámetro de la pepita} = \frac{D + d}{2}$$

Donde:

$D, d$ : son diámetros de soldadura.

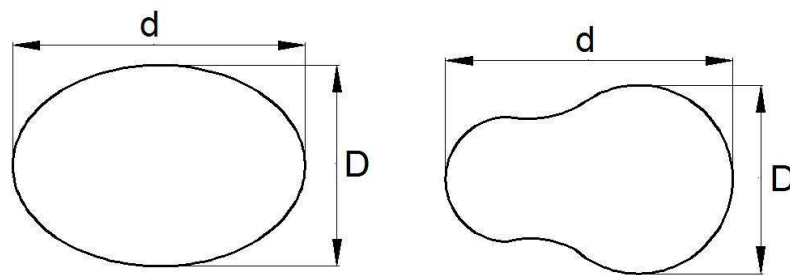


Figura 3. 14. Formas de medir el diámetro del punto de soldadura.<sup>5</sup>

La tabla 3.6, muestra los diámetros de los puntos de soldadura recomendados por GM. Tabla 3.6. Diámetros recomendados para puntos de soldadura.<sup>22</sup>

Espesor del metal [mm].	Diámetro del punto [mm].
0.40 - 0.59	3.0
0.60 - 0.79	3.5
0.80 - 1.39	4.0
1.40 - 1.99	4.5
2.00 - 2.49	5.0
2.50 - 2.99	5.5
3.00 - 3.49	6.0
3.50 - 3.99	6.5



4.00 - 4.50	7.0
-------------	-----

### 3.5.5. PORCENTAJE DE INDENTACIÓN.<sup>5</sup>

Un punto de soldadura cuya profundidad de indentación exceda el 50% de una placa no será aceptado. Se deberá ajustar los parámetros para reducir la indentación.

El porcentaje de indentación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ indentación} = \frac{A}{B} \times 100 = \frac{C}{D} \times 100 \quad (3.1)$$

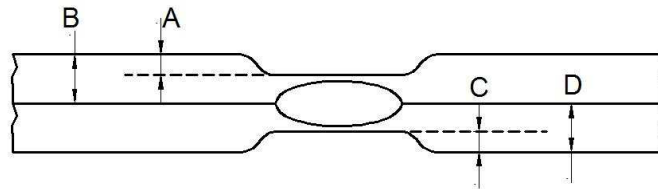


Figura 3. 15. Indentación en un punto de soldadura.<sup>5</sup>

La figura 3.15 muestra la forma de medir las variables que intervienen en el cálculo del porcentaje de indentación.

### 3.6. PUNTO DE SOLDADURA IDEAL

Un punto de soldadura ideal es aquel que está conformado por una fusión completa en la interface de contacto entre las placas. Tiene un diámetro de punto de soldadura adecuado, que se encuentra bajo norma y no presenta discontinuidades.

## **CAPITULO 4**

### **4. ENSAYOS REALIZADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.**

Luego de efectuadas las pruebas tanto en el Laboratorio de Soldadura como en el taller de la empresa privada, se tiene dos grupos de resultados. El primer grupo corresponde a los resultados obtenidos con el equipo de soldadura por resistencia de puntos disponible en el Laboratorio de Soldadura de Ingeniería Mecánica y el segundo grupo corresponde a los resultados obtenidos con el equipo de soldadura por resistencia de puntos de la empresa privada.

#### **4.1. CRITERIO DE CALIFICACIÓN**

La figura 4.1 muestra los pasos seguir en la calificación de las pruebas de soldadura que se realizaron con los dos equipos mencionados anteriormente, dichos pasos se detalla a continuación.

##### **4.1.1. INSPECCIÓN VISUAL**

La inspección visual del punto de soldadura consiste en revisar si el punto de soldadura presenta discontinuidades externas como las expulsiones de material, fisuras, distorsiones, desalineación de los electrodos y del material.

Si el material posee al menos una de las discontinuidades externas mencionadas en el ítem 2.8.1.2, el punto de soldadura será desechado y se deberá ajustar los parámetros de soldadura.

##### **4.1.2. MEDICION DEL ANGULO DE DISTORCION**

Una vez que el punto de soldadura supera la inspección visual, se procede a medir el ángulo de distorsión producido al realizar el punto de soldadura; Este ángulo debe ser menor a 25° como se muestra en el ítem 3.5.2.

Si el ángulo de distorsión es mayor a 25°, el punto de soldadura se desecha y se deberá ajustar los parámetros de soldadura.

#### **4.1.3. ENSAYO DE DESGARRE Y DEL CINCEL**

Si el punto de soldadura ha superado las pruebas anteriores, se procede a realizar el ensayo de desgarre y el ensayo de cincel, el primero de ellos se realiza con un rodillo para su efecto como se muestra en las figuras 3.11 y 3.12, mientras que el segundo utilizo un cincel y un martillo.

Si las placas soldadas no se desprenden durante estas pruebas y el tipo de desgarre tiene comportamiento dúctil, implica que el punto de soldadura es aceptable, caso contrario el punto de soldadura se desecha y se deberá ajustar los parámetros de soldadura.

#### **4.1.4. ENSAYO METALOGRAFICO**

Si el punto de soldadura supera las pruebas anteriores, se procede a cortar el punto de soldadura en la mitad para obtener una probeta metalográfica.

Esta probeta se debe desbastar para eliminar los excesos de material debido al corte y luego se pulir con lijas de 250, 320 400 y 600 granos por pulgada cuadrada.

Luego se debe realizar el ataque químico con el objetivo de revelar la zona fundida que revelará las posibles discontinuidades existentes.

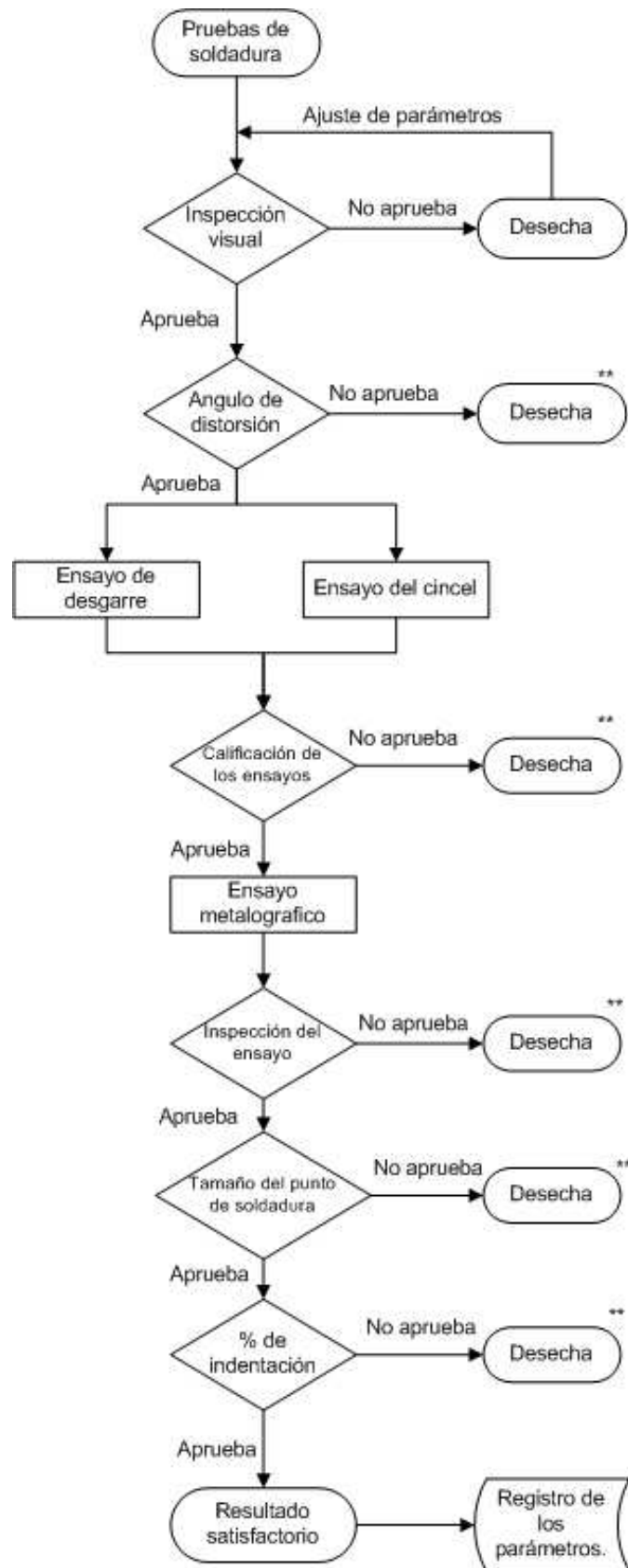
#### **4.1.5. TAMAÑO DEL PUNTO DE SOLDADURA**

El tamaño del punto de soldadura se debe medir después de haber realizado el ensayo metalográfico. Este ensayo se realiza con la ayuda de un microscopio disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional. Los diámetros del punto de soldadura recomendados se muestran en la tabla 3.6.

#### **4.1.6. PORCENTAJE DE INDENTACIÓN**

La medición de las variables requeridas para el cálculo del porcentaje de indentación se realiza con la ayuda del microscopio disponible en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

El porcentaje de indentación no deberá ser mayor que el 50% y se debe calcular como se muestra en el ítem 3.4.5.



\*\* Los resultados desechados, implican que se deberán ajustar los parámetros de soldadura.

Figura 4. 1. Proceso seguido en la calificación de las pruebas de soldadura.

## **4.2. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL EQUIPO DE RSW DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE SOLDADURA DE INGENIERIA MECÁNICA.**

### **4.2.1. PROBETAS UTILIZADAS.**

La figura 4.2 muestra las probetas de acero inoxidable austenítico tipo 304, utilizadas en las pruebas de soldadura con el equipo de soldadura por resistencia de puntos disponible en el laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica (RSW 1), cuyos espesores son de 1, 1.5, 2 y 3 mm.

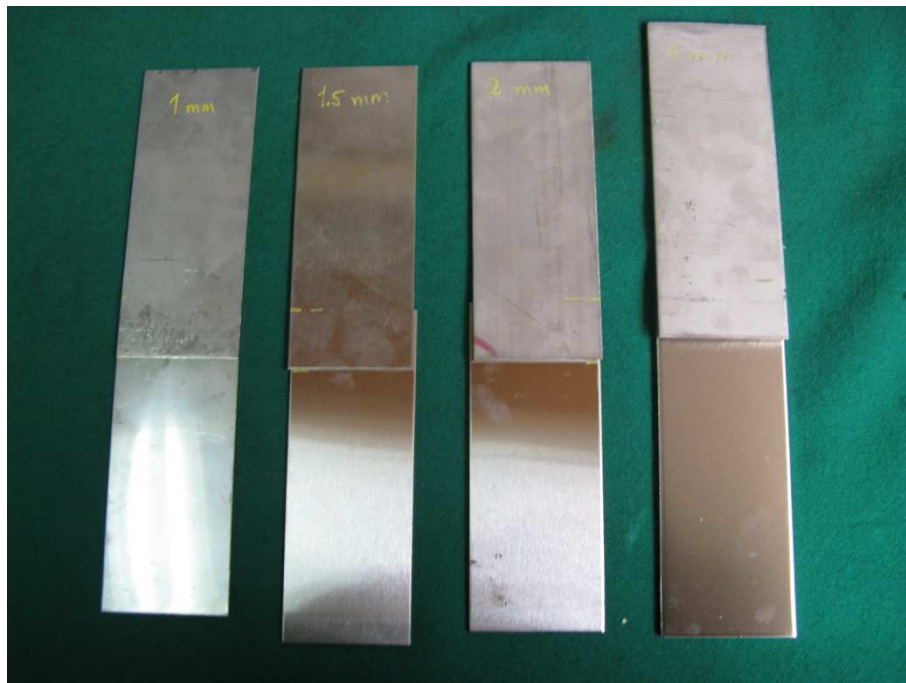


Figura 4. 2. Probetas utilizadas en las pruebas de soldadura por resistencia de puntos con el equipo RSW 1.

### **4.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLDADURA.**

La tabla 4.1 muestra los parámetros utilizados en la soldadura de las probetas que se indican en la figura 4.2.

El electrodo utilizado en el equipo RSW 1 es conformado de varilla sólida de cobre puro con la punta tipo A y diámetro de cara de 6.35 mm.

Tabla 4. 1. Parámetros utilizados en la soldadura de las probetas que se muestran en la figura 4.2.

Espesor [mm]	Amperaje [A]	Numeró de ciclos	Fuerza de los electrodos
1.0	3972	20	NA
1.5	4965	20	NA
2.0	6954	20	NA
3.0	6954	20	NA

Las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 muestran los resultados obtenidos en las pruebas de soldadura realizadas con el equipo RSW 1.

En cada una de las tablas se analiza los parámetros de medición entre los que se tiene la inspección visual, el ángulo de distorsión, el tamaño del punto de soldadura, el ensayo desgarre, el ensayo del cincel y el ensayo metalográfico.

Tabla 4. 2. Resultados obtenidos en la probeta de 1.0 mm de espesor.

<b>Probeta de 1.0 mm de espesor</b>			
<b>Parámetros de medición</b>	<b>Resultado</b>	<b>Cumpli- miento</b>	<b>Referencia</b>
Inspección visual	Explosión superficial. Contaminación debido a la presencia de cobre (CPC).	NO	Figura 4.3
Angulo de distorsión	3°	SI	Figura 4.5
Ensayo de desgarre	No aplica.	-	
Ensayo del cincel	No aplica.	-	
Ensayo metalográfico	Buena fusión	SI	Figura 4.5
Tamaño del punto de soldadura	3.5 mm	NO	Tabla 3.6
% de indentación	10 %	SI	Ec. 3.1

La tabla 4.2 muestra que la probeta de 1.0 mm de espesor cumple solo con dos parámetros de medición el ángulo de distorsión y el ensayo metalográfico; Mientras que la inspección visual, los ensayos de desgarre, de cincel, el tamaño del punto de soldadura y el porcentaje de indentación, no cumplen los requerimientos, por lo tanto es punto de soldadura es desechado. Un análisis similar es aplicado a los resultados obtenidos para las demás probetas.

Tabla 4. 3. Resultados obtenidos en la probeta de 1.5 mm de espesor.

<b>Probeta de 1.5 mm de espesor</b>			
<b>Parámetros de medición</b>	<b>Resultado</b>	<b>Cumplimiento</b>	<b>Referencia</b>
Inspección visual	Explosión superficial. Contaminación debido a la presencia de cobre (CPC).	NO	Figura 4.7
Angulo de distorsión.	3°	SI	Figura 4.8
Ensayo de desgarre.	No aplica.	-	
Ensayo del cincel.	No aplica.	-	
Ensayo metalográfico.	Existe un poro en el centro de punto de soldadura.	NO	Figura 4.8.
Tamaño del punto de soldadura.	5.5 mm	NO	Tabla 3.6.
% de indentación	15 %	SI	Ec. 3.1

Tabla 4. 4. Resultados obtenidos en la probeta de 2.0 mm de espesor.

<b>Probeta de 2.0 mm de espesor</b>			
<b>Parámetros de medición</b>	<b>Resultado</b>	<b>Cumplimiento</b>	<b>Referencia</b>
Inspección visual	Existe explosión superficial. Contaminación debido a la presencia de cobre (CPC). Perforación del punto de soldadura.	NO	Figura 4.10
Angulo de distorsión	3°	SI	Figura 4.11
Ensayo de desgarre.	No aplica.	-	
Ensayo del cincel	No aplica.	-	
Ensayo metalográfico	Existe un socavamiento en el centro del punto de la soldadura.	NO	Figura 4.11
Tamaño del punto de soldadura.	5.5 mm	NO	Tabla 3.6
% de indentación	10 %	SI	Ec. 3.1



Tabla 4. 5. Resultados obtenidos en la probeta de 3.0 mm de espesor.

<b>Probeta de 3.0 mm de espesor</b>			
<b>Parámetros de medición</b>	<b>Resultado</b>	<b>Cumpli- miento</b>	<b>Comentario</b>
Inspección visual	No existe punto de soldadura.	NO	No se realizo el punto de soldadura, por falta de cumplimiento de parámetros.
Angulo de distorsión	N/A	NO	
Ensayo de desgarre.	N/A	NO	
Ensayo del cincel	N/A	NO	
Ensayo metalográfico	N/A	NO	
Tamaño del punto de soldadura.	N/A	NO	
% de indentación	N/A	NO	

Los resultados de la tabla 4.5 muestran que la probeta de espesor de 3.0 mm, no cumple con ninguno de los parámetros de medición, debido a que no llego a fundirse el material y consecuentemente no se realizo el punto de soldadura.

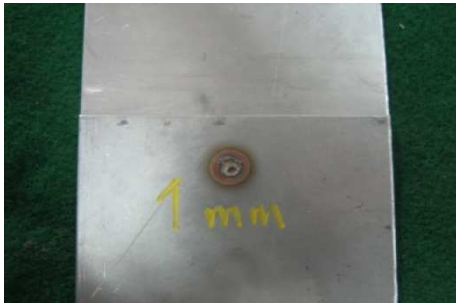


Figura 4. 3. Punto de soldadura en la probeta de 1 mm.

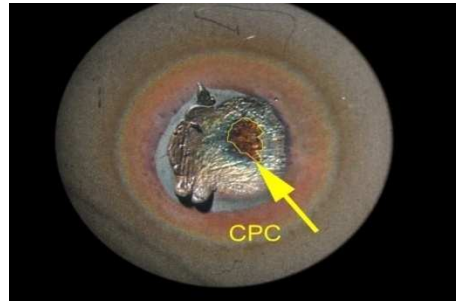


Figura 4. 4. Punto de soldadura en la Probeta de 1 mm a 5x.



Figura 4. 5. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1 mm a 10x.



Figura 4. 6. Punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm.

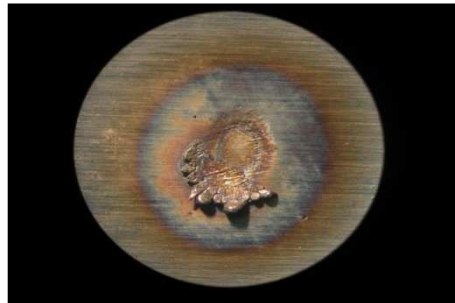


Figura 4. 7. Punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm a 5x.

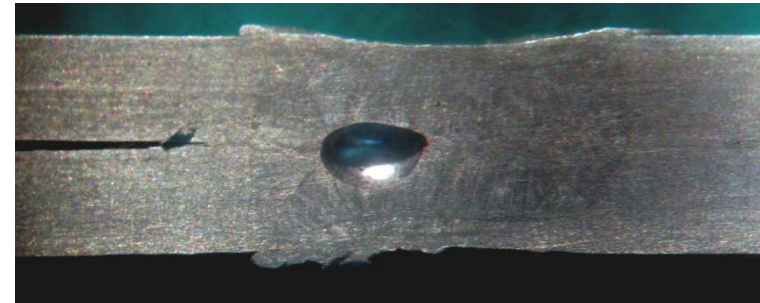


Figura 4. 8. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1 mm a 10x.



Figura 4. 9. Punto de soldadura en la probeta de 2 mm.

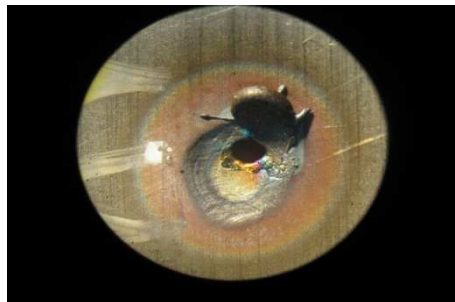


Figura 4. 10. Punto de soldadura en la probeta de 2 mm a 5x.

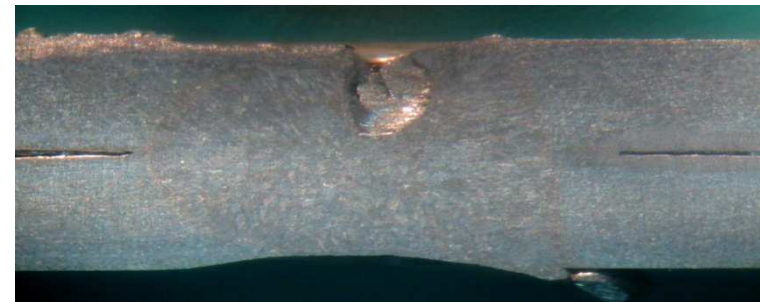


Figura 4. 11. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2 mm a 10x.

### 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL EQUIPO DE RSW DE LA EMPRESA PRIVADA.

#### 4.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 1.0 MM DE ESPESOR

La tabla 4.6 muestra seis combinaciones diferentes de parámetros de soldadura por resistencia de puntos para las probetas de 1.0 mm de espesor, cuyos puntos de soldadura se observan en la figura 4.12

Tabla 4. 6. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 1.0 mm

N°	SQT	Fuerza [kN]	Ciclos (1/60)	Tt de soldadura	Corriente [kA]	HT	Observaciones
1	50	2.13	7	7	8.0	2	Punto de soldadura seleccionado.
2	50	2.13	9	9	8.0	2	Explosión superficial.
3	50	2.13	8	8	8.0	2	Excesiva indentación.
4*	50	3.30	6	6	6.0	2	Indentación considerable.
5	50	2.10	7	7	9.0	2	Explosión interna y superficial.
6	50	2.30	7	7	9.0	2	Explosión interna y superficial.

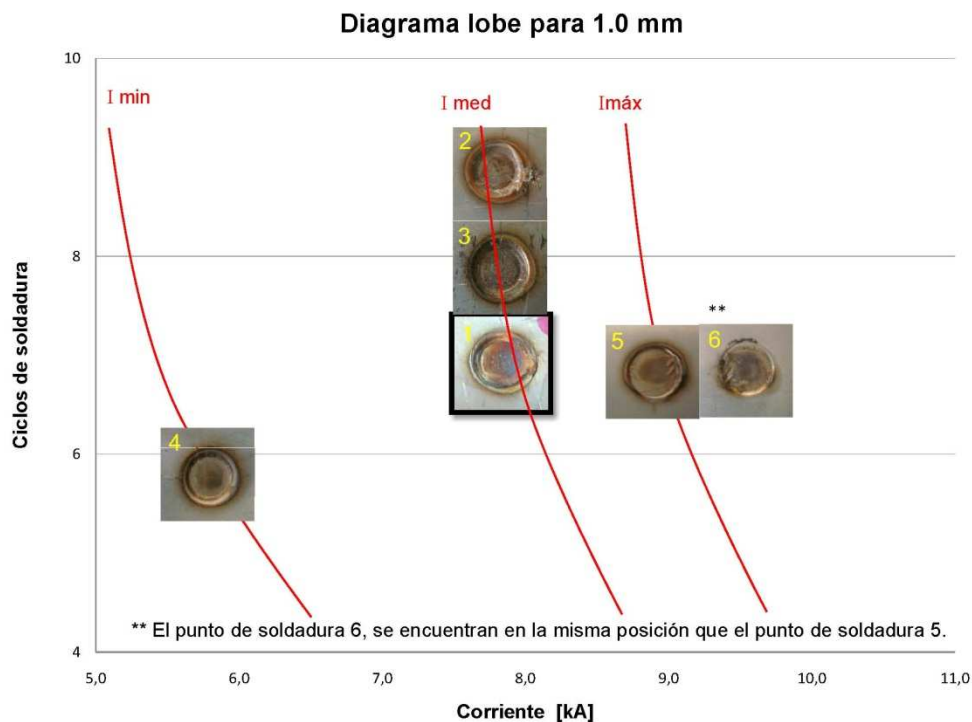


Figura 4. 12. Diagrama lobe para 1.0 mm de espesor.

La figura 4.12 muestra como punto optimo el número 1 y los resultados del las pruebas destructivas se muestran en la tabla 4.7 y figuras 4.13 y 4.14.

Tabla 4. 7. Resultados obtenidos en la probeta de 1.0 mm de espesor

Parámetros de medición	Resultado	Cumplimiento	Referencia
Inspección visual	No existe explosión en la superficie.	SI	Ver punto de soldadura 1, figura 4.12.
Angulo de distorsión	< a 30°	SI	Figura 4.14
Ensayo de desgarre	Bueno	SI	Figura 4.13.
Ensayo del cincel	Bueno	SI	Figura 4.13.
Ensayo metalográfico	Buena fusión. No existen discontinuidades internas.	SI	Figura 4.14.
Tamaño de punto de soldadura.	5.5 mm	SI	Tabla 3.6.
% de indentación	30 %	SI	Ec. 3.1



Figura 4. 13. Probetas de 1.0 mm, después de haber realizado el ensayo de desgarre y cincel.



Figura 4. 14. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1.0 mm (10x)

La figura 4.15 muestra el tiempo de acercamiento (SQT), El tiempo de soldadura (WT), El tiempo de sujeción o fragua (HT), la intensidad y la fuerza en los electrodos, parámetros seleccionados para la probeta de 1.0 mm de espesor.

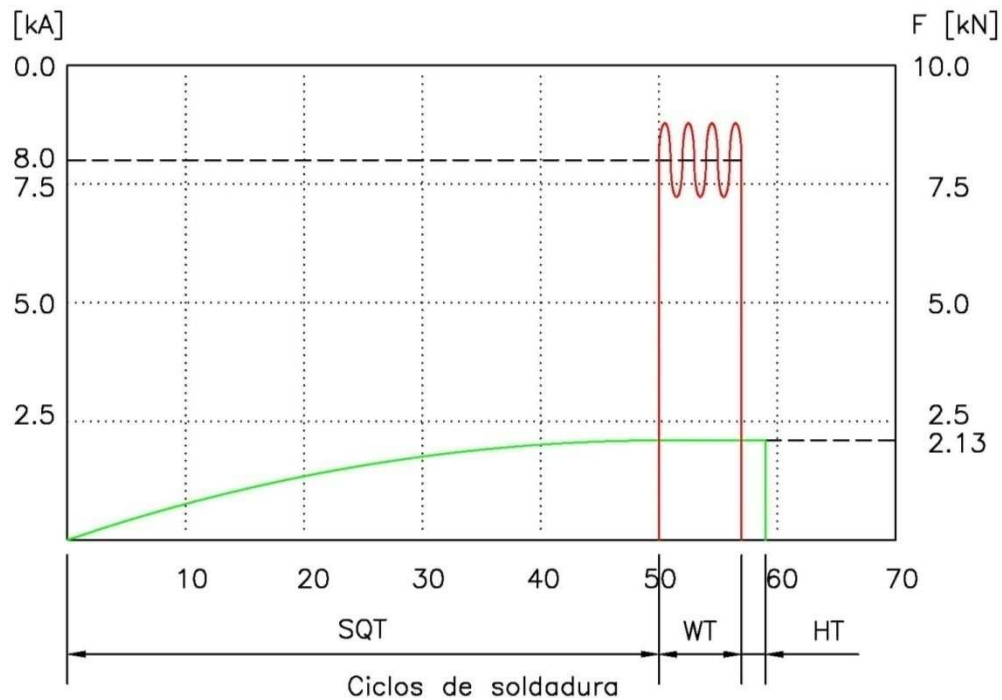


Figura 4. 15. Parámetros seleccionados para la probeta de 1.0 mm

#### 4.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 1.5 MM DE ESPESOR

La tabla 4.8 muestra siete combinaciones diferentes de parámetros de soldadura por resistencia por puntos para las probetas de 1.5 mm de espesor, cuyos puntos de soldadura observan en la figura 4.16.

Tabla 4. 8. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 1.5 mm

N°	SQT	Fuerza [kN]	Ciclos (1/60)	TTS	Corriente [kA]	HT	Observaciones
1	50	4.22	12	12	9.0	2	Exceso de indentación
2	50	2.13	12	12	9.0	2	Punto de soldadura desalineado.
3	50	2.98	12	12	9.0	2	Punto quemado. Excesiva indentación
<b>4</b>	<b>50</b>	<b>2.98</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9.0</b>	<b>2</b>	<b>Punto de soldadura seleccionado.</b>
5* <sup>1</sup>	50	6.30	10	10	9.0	2	Explosión superficial.
6	50	3.20	7	7	10.0	2	Indentación excesiva
7	50	4.20	9	9	10.0	2	Punto desalineado.

\*<sup>1</sup> Parámetros de soldadura para aceros inoxidables de la empresa Atek, Ver anexo 5.

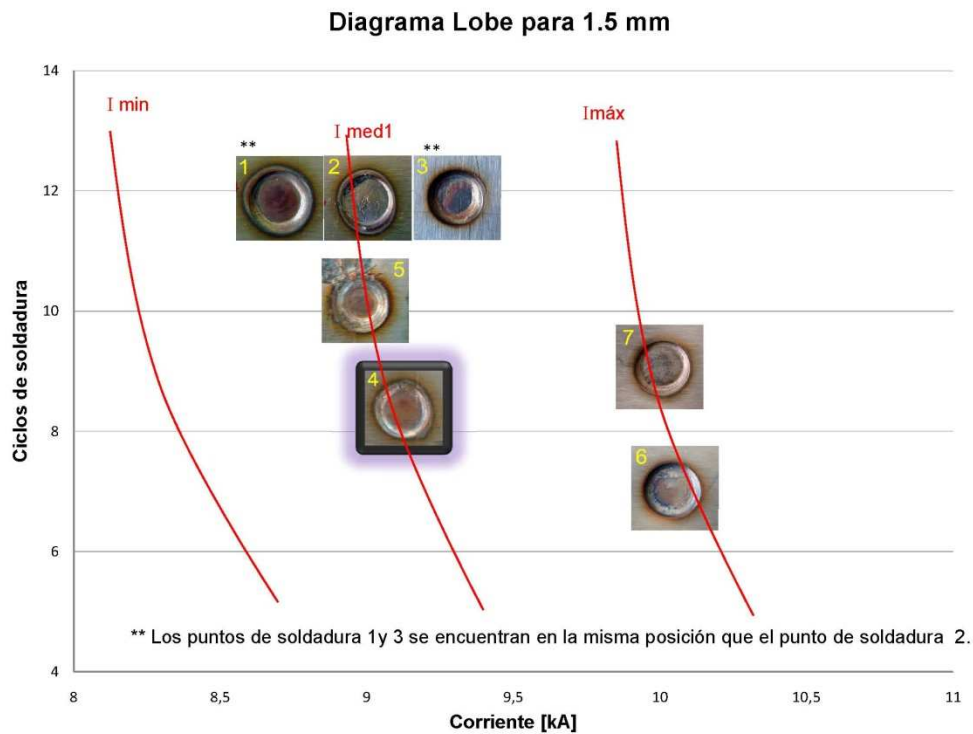


Figura 4. 16. Diagrama lobe para 1.5mm de espesor

La figura 4.16 muestra como punto optimo el numero 4 y los resultados del las pruebas destructivas se muestran en la tabla 4.9 y figuras 4.17 y 4.18.

Tabla 4. 9. Resultados obtenidos en la probeta de 1.5 mm de espesor

Parámetros de medición	Resultado	Cumplimiento	Referencia
Inspección visual	No existe explosión superficial.	SI	Ver punto de soldadura 4, figura 4.16.
Angulo de distorsión	3°	SI	Figura 4. 18
Ensayo de desgarre	Bueno	SI	Figura 4.17
Ensayo del cincel	Bueno	SI	Figura 4.17
Ensayo metalográfico	Buena fusión	SI	Figura 4.18
Tamaño de punto de soldadura.	5.5 mm	SI	Tabla 3.6
% de indentación	30 %	SI	Ec. 3.1



Figura 4. 17. Probetas de 1.5 mm, después de realizado el ensayo de pelado y de cincel.



Figura 4. 18. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 1.5 mm (10x)

La figura 4.19 muestra el tiempo de acercamiento (SQT), El tiempo de soldadura (WT), El tiempo de sujeción o fragua (HT), la intensidad y la fuerza en los electrodos seleccionados para la probeta de 1.5 mm de espesor.

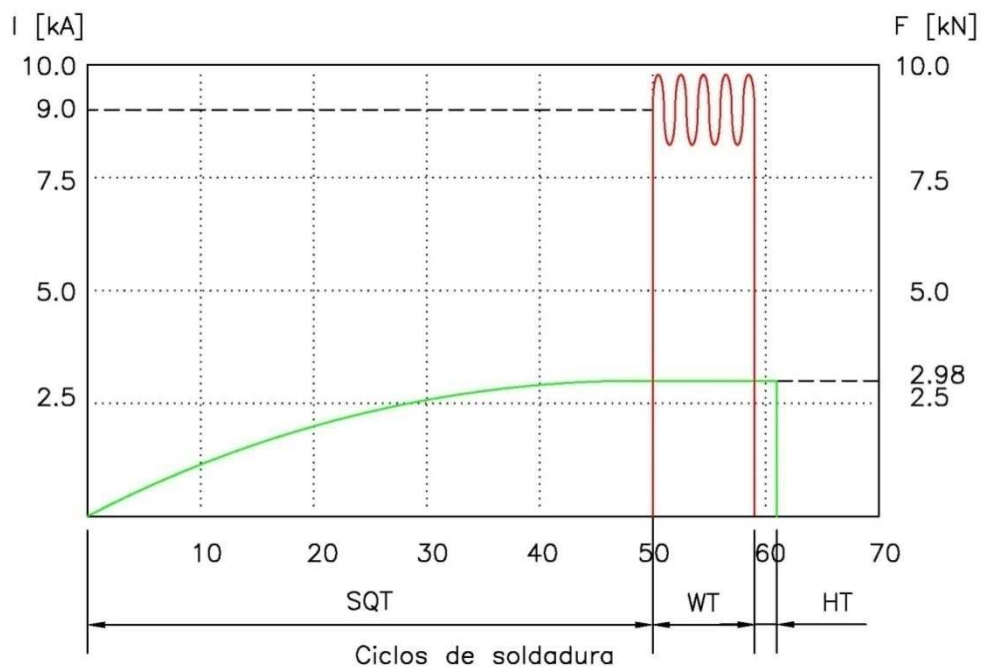


Figura 4. 19. Parámetros seleccionados para la probeta de 1.5 mm

### 4.3.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 2.0 MM DE ESPESOR

La tabla 4.10 muestra siete combinaciones de parámetros de soldadura por resistencia de puntos para las probetas de 2.0 mm de espesor, cuyos puntos de soldadura se pueden observar en la figura 4.20

Tabla 4. 10. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 2.0 mm

N°	SQT	Fuerza [kN]	Ciclo 1 (1/60)	Ciclo 2 (1/60)	TTS	Corriente [kA]	CT	HT	Observaciones
1	50	7.2	8	0	8	10.0	0	5	Explosión interna e indentación excesiva.
3	50	2.98	7	7	14	7.0	2	5	Presencia de poro.
4	50	2.98	9	9	18	9.0	2	5	Punto de soldadura quemado.
5	50	5.3	9	9	18	10.5	2	5	Excesiva indentación.
6	50	2.98	7	7	14	9.0	2	5	Explosión superficial e excesiva indentación.
7	50	2.98	7	7	14	7.0	3	5	Presencia de poro.

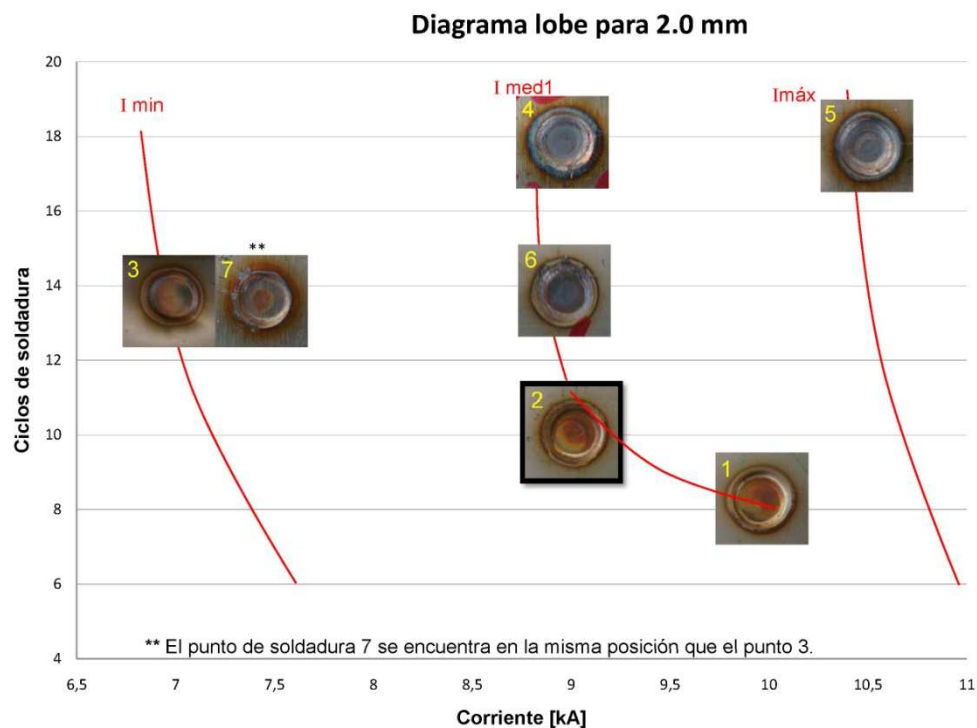


Figura 4. 20. Diagrama lobe para 2.0 mm de espesor



La figura 4.20 muestra como punto optimo el numero 2, cuyos resultados del las pruebas destructivas se muestran en la tabla 4.11, figuras 4.21 y 4.22.

Tabla 4. 11. Resultados obtenidos en la probeta de 2.0 mm de espesor

Parámetros de medición	Resultado	Cumplimiento	Referencia
Inspección visual	No existe explosión superficial.	SI	Ver punto de soldadura 2, figura 4.20.
Angulo de distorsión	3°	SI	Figura 4. 22
Ensayo de pelado	Bueno	SI	Figura 4.21
Ensayo del cincel	Bueno	SI	Figura 4.21
Ensayo metalográfico	Buena fusión	SI	Figura 4.22
Tamaño de punto de soldadura.	7.0 mm	SI	Tabla 3.6
% de indentación	25 %	SI	Ec. 3.1



Figura 4. 21. Probetas de 2.0 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel.

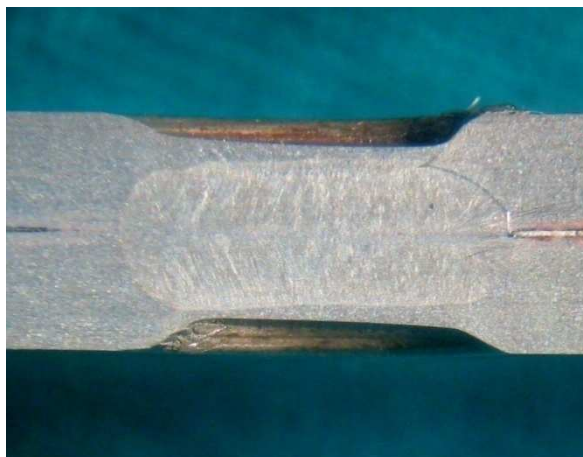


Figura 4. 22. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2.0 mm (10x)

La figura 4.23 muestra el tiempo de acercamiento (SQT), El tiempo de soldadura (WT), El tiempo de sujeción o fragua (HT), la intensidad y la fuerza en los electrodos seleccionados para la probeta de 2.0 mm de espesor.

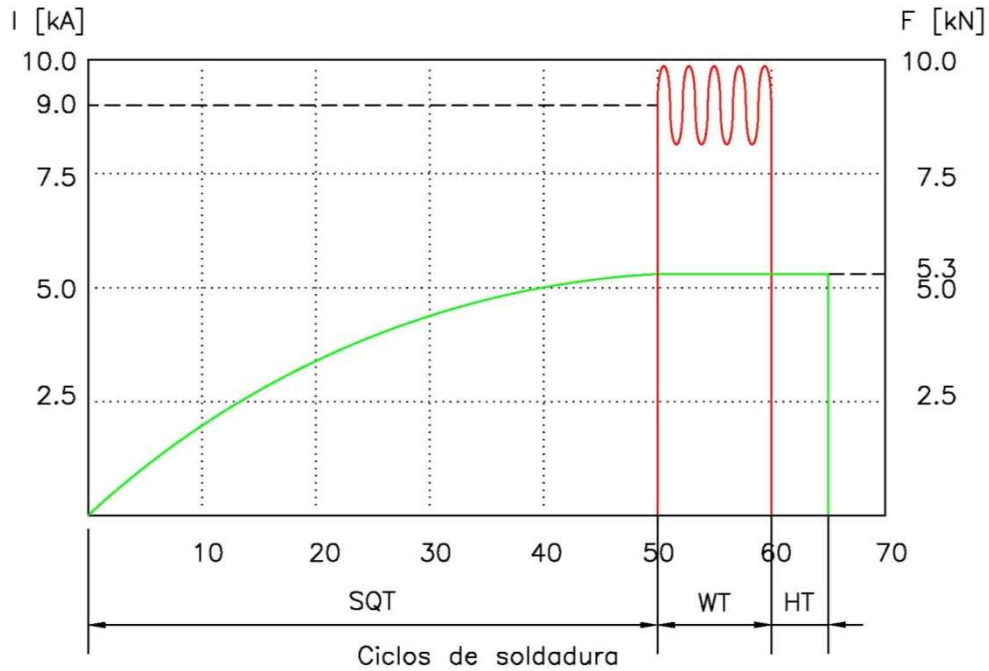


Figura 4. 23. Parámetros seleccionados para la probeta de 2.0 mm.

#### 4.3.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 2.5 MM DE ESPESOR

La tabla 4.12 muestra cinco combinaciones de parámetros de soldadura de resistencia por puntos para las probetas de 2.5 mm de espesor, cuyos puntos de soldadura se muestran en la figura 4.24

Tabla 4. 12. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 2.5 mm

N°	SQT	Fuerza [kN]	Ciclo 1 (1/60)	Ciclo 2 (1/60)	TTS	Corriente [kA]	CT	HT	Observaciones
1	50	2.98	9	9	18	9	4	10	Perforación.
2	50	3.10	8	8	16	8.5	4	5	Expulsión superficial. Presencia de poro.
3	50	2.98	9	9	18	9.0	3	5	Expulsión superficial. Presencia de poro.
5	50	2.98	9	9	18	9.0	4	5	Presencia de poro.

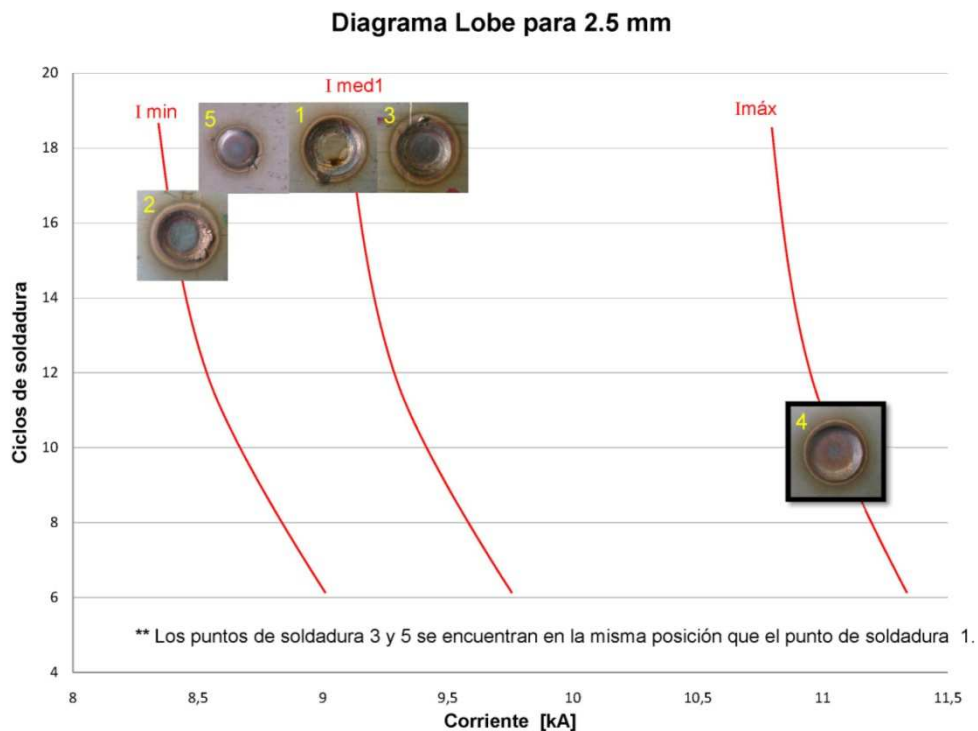


Figura 4. 24. Diagrama lobe para 2.5 mm de espesor

La figura 4.24 muestra como punto de soldadura optimo el numero 4 y cuyos resultados de las pruebas destructivas se muestran en la tabla 4.13, figuras 4.25 y 4.26.

Tabla 4. 13. Resultados obtenidos en la probeta de 2.5 mm de espesor

Parámetros de medición	Resultado	Cumplimiento	Referencia
Inspección visual	No existe explosión superficial.	SI	Ver punto de soldadura 4, figura 4.24.
Angulo de distorsión	2 °	SI	Figura 4. 26
Ensayo de desgarre	Bueno	SI	Figura 4.25
Ensayo del cincel	Bueno	SI	Figura 4.25
Ensayo metalográfico	Buena fusión	SI	Figura 4.26
Tamaño de punto de soldadura.	7.0 mm	SI	Tabla 3.6
% de indentación	48 %	SI	Ec. 3.1



Figura 4. 25. Probetas de 2.5 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel.

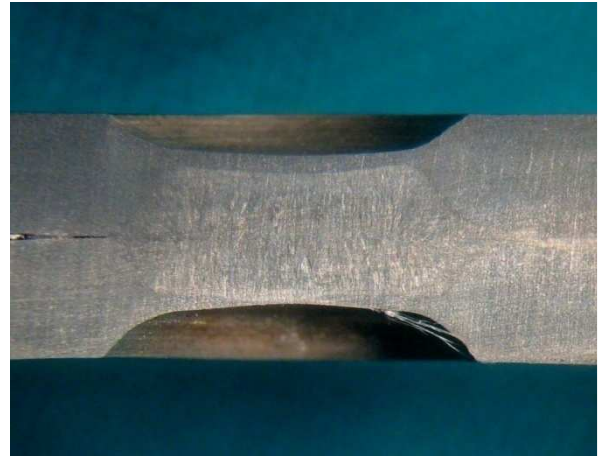


Figura 4. 26. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 2.5 mm (10x)

La figura 4.27 muestra el tiempo de acercamiento (SQT), El tiempo de soldadura (WT), El tiempo de sujeción o fragua (HT), la intensidad y la fuerza en los electrodos seleccionados para la probeta de 2.5 mm de espesor.

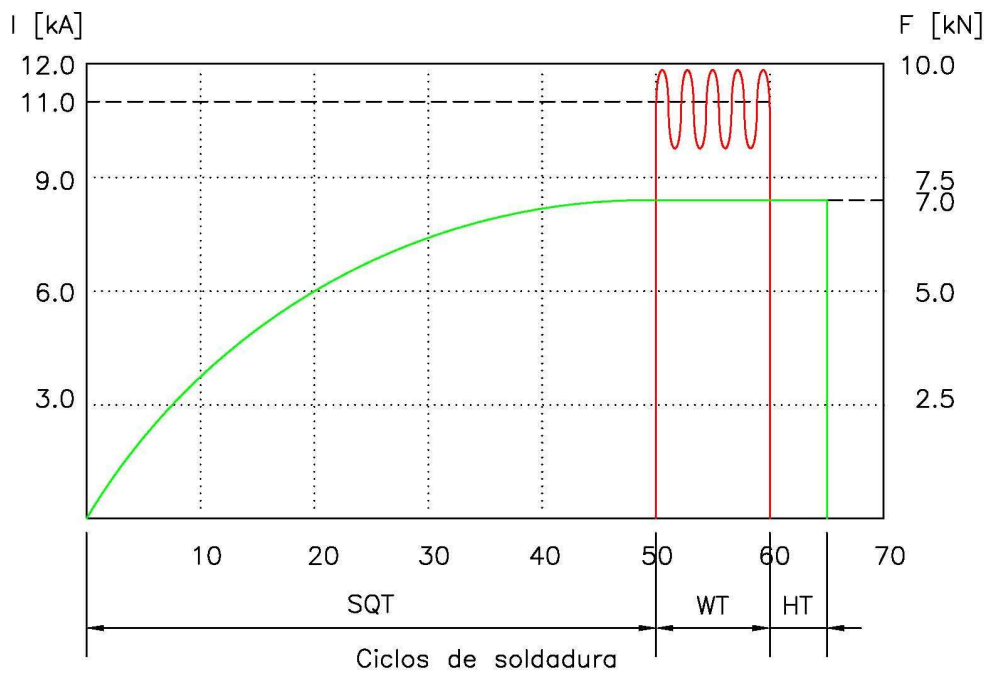


Figura 4. 27. Parámetros seleccionados para la probeta de 2.5 mm.

#### 4.3.5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE 3.0 MM DE ESPESOR

La tabla 4.19 muestra cuatro combinaciones diferentes de parámetros de soldadura de resistencia por puntos para las probetas de 3.0 mm de espesor, cuyos puntos de soldadura se pueden observar en la figura 4.28.

Tabla 4. 14. Combinaciones de parámetros para la soldadura de probetas de 3.0 mm

N°	SQT	Fuerza [kN]	Ciclo 1 (1/60)	Ciclo 2 (1/60)	TTS	Corriente [kA]	CT	HT	Observaciones
1	50	5.3	8	8	16	9.5	5	4	Explosión superficial
2	50	5.3	8	8	16	9.5	4	4	Perforación
3	50	3.1	9	9	18	9.0	4	5	Explosión superficial

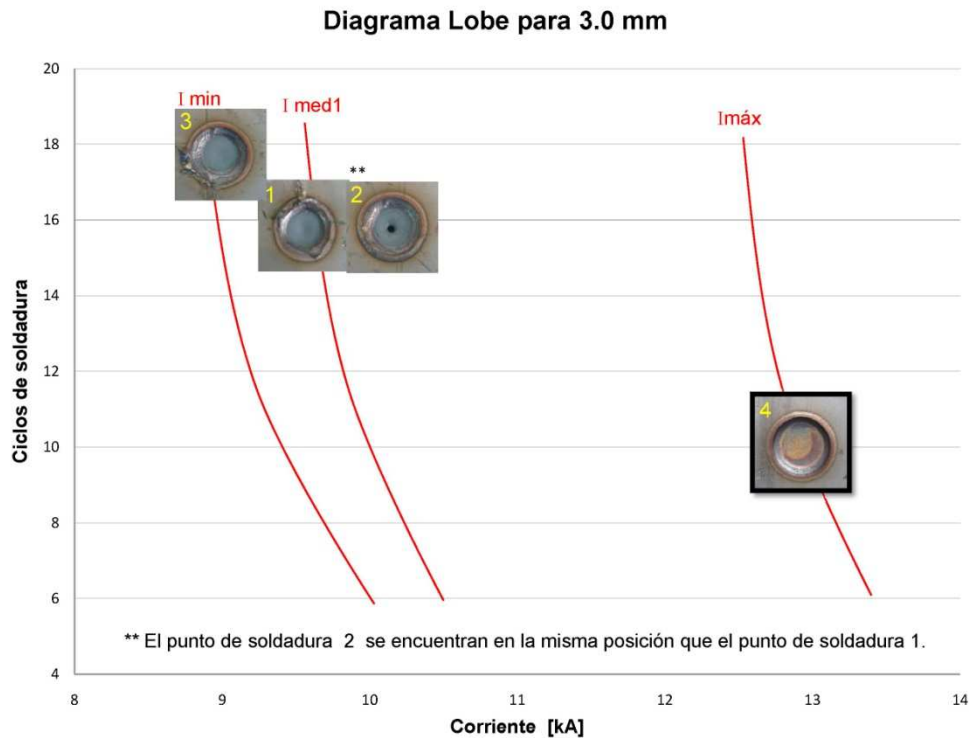


Figura 4. 28. Diagrama lobe para 3.0 mm de espesor

La figura 4.28 muestra como punto de soldadura óptimo el número 4 y sus resultados de las pruebas destructivas se muestran en la tabla 4.15, figuras 4.29 y 4.30.

Tabla 4. 15. Resultados obtenidos en la probeta de 3.0 mm de espesor

Parámetros de medición	Resultado	Cumplimiento	Referencia
Inspección visual	No existe explosión superficial.	SI	Ver punto de soldadura 4, figura 4.28.
Angulo de distorsión	2°	SI	Figura 4.30
Ensayo de desgarre	Bueno	SI	Figura 4.29
Ensayo del cincel	Bueno	SI	Figura 4.29
Ensayo metalográfico	Buena fusión	SI	Figura 4.30
Tamaño de punto de soldadura.	6.8 mm	SI	Tabla 3.6
% de indentación	30 %	SI	Ec. 3.1



Figura 4. 29. Probetas de 3.0 mm, después de realizado el ensayo de desgarre y cincel.

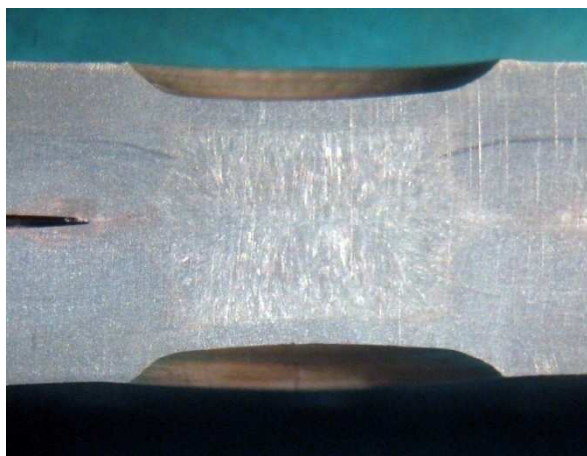


Figura 4. 30. Macrografía del punto de soldadura en la probeta de 3.0 mm (10x)

La figura 4.31 muestra el tiempo de acercamiento (SQT), El tiempo de soldadura (WT), El tiempo de sujeción o fragua (HT), la intensidad y la fuerza; Parámetros seleccionados para la probeta de 3.0 mm de espesor.

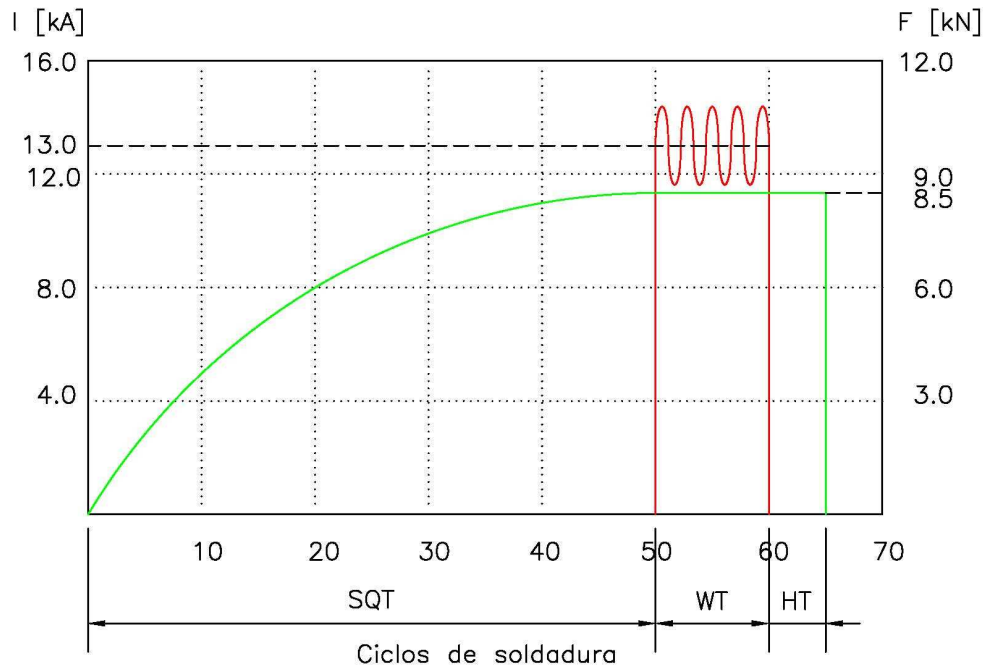


Figura 4. 31. Parámetros seleccionados para la probeta de 3.0 mm.

#### 4.4. ANALISIS DE RESULTADOS.

- Los puntos de soldadura realizados con el equipo de soldadura RW1, no son buena calidad, ya que en todos los puntos realizados existe discontinuidades.
- La soldadura de aceros inoxidable de chapas hasta 3.00 con doble pulso produce porosidades, este resultado se puede observar en las tablas 4.10, 4.12 y 4.14.
- Las explosiones internas se producen por la sujeción incorrecta de los elementos a soldar, razón por lo cual se deben sujetar con playos de presión a ambos lados del punto de soldadura a realizarse.
- Los puntos de soldadura realizados con los parámetros de soldadura para aceros inoxidable del anexo 5, producen explosiones externas; Este efecto se puede apreciar en el numeral 5 de la tabla 4.8.
- El equipo de de soldadura RSW1 permitió encontrar los parámetros de soldadura para aceros inoxidable austeníticos y se muestran en las tablas

## CAPITULO 5

### 5.1. CONCLUSIONES.

- El objetivo principal del presente proyecto de titulación ha sido cumplido, ya que se determinaron los parámetros de soldadura por resistencia para aceros inoxidables tipo 304 de hasta 3 mm de espesor, con lo que se demostró que si es posible realizar la soldadura por resistencia en este tipo de aceros.
- El equipo de soldadura por resistencia de puntos es uno de los factores principales que intervienen en la calidad de la soldadura; Estos equipos deben permitir la manipulación de los parámetros de soldadura como la intensidad, presión y tiempo soldadura, además deberán tener un sistema de enfriamiento en los electrodos
- Los ensayos de calificación de soldadura como el de desgarre y de cincel ayudan a evaluar rápidamente la calidad del punto de soldadura, además son fáciles de realizar y no se requiere de equipos sofisticados.
- El ensayo metalográfico ayuda a revelar las características internas del punto de soldadura con lo que se puede ratificar la calidad del punto soldadura.
- El proceso de optimización empleado en el desarrollo del presente proyecto de titulación, permite obtener puntos de soldadura de buena calidad.
- La calidad de los puntos de soldadura obtenidos es elevada, debido a que supero las pruebas destructivas y cumple con los parámetros establecidos en las normas.



- La soldadura de resistencia por puntos es uno de los procesos de fabricación más económicos y rápidos. El inconveniente se presenta en el costo de la inversión inicial.
- La soldadura por resistencia de puntos es uno de los procesos de fabricación más seguros, cuando se opere con personal idóneo, un equipo de protección adecuado y una correcta protección a tierra.
- Un punto de soldadura ideal, es aquel que está conformado por una fusión completa en la interface de contacto entre las placas, con un diámetro del punto de soldadura adecuado y no presente discontinuidades externas e internas.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

- Las chapas metálicas a soldar deben estar limpias, libres de óxidos y demás impurezas que pueden afectar la calidad de la soldadura.
- Con el presente proyecto de titulación se está en la capacidad de proporcionar a la industria Ecuatoriana parámetros de soldadura verdaderos y comprobados.
- Los parámetros de soldadura por resistencia de puntos para aceros inoxidables proporcionados por empresas vendedoras se encontró que no son 100% confiables.
- El acero inoxidable tipo 304 es de fácil adquisición en nuestro medio, además presta facilidades para ser soldador por el método de resistencia por puntos, por lo cual se recomienda su aplicación industrial.
- La Escuela Politécnica Nacional debería prestar facilidades para la adquisición de equipos e instrumentos necesarios para el desarrollo de este tipo de proyectos de titulación.

- La Escuela Politécnica Nacional debería proveer un equipo de soldadura por resistencia de tecnología actual, la cual sería de gran ayuda para investigaciones posteriores.
- Tomando como referencia los parámetros de soldadura encontrados el presente proyecto de titulación, se recomienda buscar los parámetros con otro tipo de geometría de electrodo para cada uno de los espesores.
- La empresa privada interesada en aplicar estos parámetros, deberá disponer de un equipo de similares características al facilitado por la empresa privada en el presente proyecto de investigación.
- Se debe utilizar un equipo de seguridad adecuado, mantener la concentración en lo que se está realizando y no operar los mandos del equipo si no se conoce su funcionamiento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] AGUIRRE, OSPINA, PARRA L, Soldabilidad En Aceros Inoxidables Y Aceros Disimiles, Scientia et Technica Año XIII, No 34; Universidad Tecnológica de Pereira. Mayo de 2007.
- [2] ARES CARAM JAIME; Solidificación y microestructura de un acero inoxidable austenítico; Anales AFA- Vol 17; Argentina; 2005.
- [3] AWS; Manual de Soldadura; Tomo III.
- [4] AWS D8.6:2005; Standard for Automotive Resistance Spot Welding Electrodes (2005).
- [5] GM4488M; General Motors Engineering Standards; August 1995.
- [6] GONZALEZ ROSALBA; Estudio de la precipitación en aceros inoxidables austeníticos y su efecto sobre la tenacidad a la fractura a temperaturas criogénicas; Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional; México; 2004.
- [7] GUALLICHICO JOSÉ LUIS; Análisis, implementación y validación de programas stepper en equipos de soldadura por resistencia críticos de la celda aveo de la planta de soldadura de GM-OBB S.A.; Tesis de tecnología, E.P.N.; QUITO / EPN / 2008.
- [8] GUERRA SALINAS IVÁN; Diseño y construcción de una maquina tipo pinza para soldar por puntos por resistencia; Se diseña y construye un equipo para soldadura por puntos por resistencia; Escuela Politécnica Nacional; Quito; 1993.
- [9] HIRSCH ROGER B; Making Resistance Spot Welding Safer; Welding journal No 31. 2007.

- [10] ISO 10447; Welding-Peel and chisel testing of resistance spot, projection and seam welds, International standard; First Edition; 1991.
- [11] KHATAK-BALDEV; Corrosion of austenitic stainless steels mechanism, mitigation and monitoring; Woohed publishing limited; Alpha Science international Ltd, 2002.
- [12] LAUFGANG SERGIO; Aceros Inoxidables; Telmo soldex S.A. Argentina; 2002.
- [13] LIPPOLD KOTECKI; Welding metallurgy and weldability of stainless steel, Wiley-Interscience; United States of America; 2005.
- [14] LLEWELLYN – HUDD; Steels Metallurgy & Applications; Butterworth Heinemann; Third Edition; England; 1998.
- [15] MANGONON PAT; Ciencia de materiales selección y diseño; Editorial Pearson Educación, Primera Edición; Año 2001.
- [16] MEDRANO CARVAJAL JORGE RODRIGO; Mejoramiento de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aceros inoxidables austeníticos mediante los tratamientos térmicos; Escuela Politécnica Nacional; Quito; 2006.
- [17] MESSLER ROBERT Jr; Principles of welding processes, physics, chemistry and metallurgy; Wilvy-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Singapore 2004. Pagina 553.
- [18] Metals Handbook; Welding Brazing & Soldering. Vol 06.
- [19] MILLER; Handbook for Resistance Spot Welding; July 2005.

- [20] OBARA CORP; Manual de Instrucciones de series de pistolas soldadoras de punto portátiles.
- [21] WS1-A; Welding Design Standards Resistance Spot Welding; General Motors Corporation; September 2007.
- [22] WS-4; Resistance Welding Verification Procedures (Section A); General Motors Corporation; May 1999.
- [23] ZABALA ADRIAN; Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor, Propiedades transformaciones y normas; Editorial Limusa; Mexico 1981.
- [24] ZHANG – SENKARA; Resistance welding fundamentals and applications; CRC Taylor & Francis; 2006.
- [25] [www.cntrline.com](http://www.cntrline.com).
- [26] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>
- [27] <http://www.soldaduradepunto.com/electrode/standardelectrode.htm>