UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA

TRABAJO DE TITULACIÓN

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LAS SOLDADURAS DISÍMILES CON MATERIAL DE APORTE ER 309L

Trabajo de titulación para optar al título profesional de INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Nombre del alumno:

GEORGE ESTEBAN GARRIDO CAÑETE

Profesor guía:

JUAN JOSÉ FIGUEROA COHN

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☑ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estudio de la calidad de las soldaduras disimiles con material de aporte ER 309L.

Nombre del candidato(a): George Esteban Garrido Cañete

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Sede Concepción **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Juan José Figueroa Cohn en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☑ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09-09-2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-09-2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a toda mi anhelada familia.

En especial a mi señora Valeska Osorio A.

A mis hijas Nicole Garrido O. y Catalina Garrido O.

Agradecimiento

Primero debo agradecer a dios por darme la salud e inteligencia durante mis 42 años.

Agradecer a todos mis compañeros y profesores de carrera, con los cuales he compartido gratos momentos durante los tres años que duro aquella carrera universitaria.

Reconocer a todos los docentes con gran vocación como aquel profesor guía, el Sr. Juan José Figueroa Concha por la orientación y la dedicatoria a mi desarrollo profesional, agradecer también a los docentes como; Don Víctor Valdevenito, Fabricio Cariñe, Guillermo Larzon, Ariel Zoñes, Marcelo Quiroz por la paciencia y dedicación que mantuvieron durante el desarrollo académico estando en aquella prestigiosa institución llamada Universidad Federico Santa María, con sede en Concepción.

Agradecimientos también para mi padre, mi madre, hermanos y junto a mi amada familia que han sido una base para llevar a cabo este aprendizaje como proyecto personal. Pues sin su apoyo costoso, quizás nada de esto hubiera sido posible.

A todos ellos se les agradece de manera infinita.

Gracias

Resumen

El presente Proyecto de Titulo tiene como propósito evaluar la calidad de las soldaduras disimiles realizadas entre acero al carbono ASTM A36 y Acero Inoxidable AISI 304, utilizando como material de aporte, el alambre ER 309 L de Ø1.6 mm. mediante el proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding).

La investigación surge de la necesidad de contar con procedimientos técnicamente fundamentados que permitan garantizar la calidad de las uniones soldadas empleadas en actividades de fabricación y mantenimiento industrial, considerando que las soldaduras disimiles presentan desafíos asociados a las diferencias metalúrgicas entre los materiales base.

El estudio contempla una revisión bibliográfica de los fundamentos de la soldadura disímil, las propiedades del material de aporte ER 309 L, las variables que intervienen en el proceso de soldadura y las principales normas internacionales aplicables.

Posteriormente, se desarrolla una metodología experimental que considera la preparación de probetas, la ejecución del procedimiento de soldadura bajo parámetros controlados y la evaluación de la calidad de las uniones mediante inspección visual y ensayos aplicables.

Los resultados obtenidos permitirán identificar los factores que influyen en la calidad de las soldaduras disimiles y establecer recomendaciones técnicas para optimizar los procedimientos de reparación y fabricación en el área del mantenimiento industrial.

Finalmente, el proyecto propone lineamiento para la implementación de procedimientos de soldadura estandarizados que contribuyan a incrementar la confiabilidad operacional, reducir costos asociados a fallas y fortalecer la gestión del mantenimiento en la industria.

Glosario

A : Indica que es un material ferroso.

ASTM: : Es la especificación estándar de la ASTM Internacional Sigla de la American Society for Testing and Materiales (organismo que redacta la norma) para el acero al carbono

Austenítico : Hace referencia a la estructura cristalina interna que posee el metal a nivel microscópico

Carbono : Es un elemento importante en los aceros. Ya que estos hacen aumentar la dureza y la resistencia mecánica, en cantidades elevadas puede disminuir la ductilidad y la soldabilidad. Carbono mezclándose con cromo forman carburos de cromo lo que reduce localmente la resistencia a la corrosión.

Carburos : Son compuestos formados por carbono unido a otro elemento, generalmente un metal. En los inoxidables, son especialmente importantes los Carburos de Cromo, cuya precipitación puede disminuir localmente la resistencia a la corrosión

Confiabilidad: capacidad de funcionar correctamente, sin fallar, durante un periodo determinado

Cromo : Es un elemento químico fundamental porque proporciona principalmente la resistencia a la corrosión

Dilución : Termino que se refiere a la cantidad de metal base (placas se están uniendo) que se derrite y se mezcla con el alambre de aporte para formar el cordón de soldadura.

Disimiles : Diferentes

Ductilidad : Es la propiedad mecánica que permite a un metal deformarse plásticamente bajo un esfuerzo de tracción sin romperse

Fragilidad : Tendencia de un material a romperse sin deformarse significativamente

Mitigar : Es el significado reducir, disminuir o hacer menos grave algo negativo

Precipitación: Formación de pequeñas partículas o fases solidas dentro de un material, debido a cambios de temperatura, composición o tratamientos térmicos

Promedio Típico: Valor representativo o habitual de alguna de sus propiedades, obtenido de mediciones o datos de referencia aproximado que normalmente presenta un material, pero que no necesita

ST : Solid Wire (Alambre Solido) un alambre macizo para soldadura de procesos MIG / MAG

T1 : Flux Cored Wire (Alambre Tubular) diseñado para soldar en todas las posiciones para la soldadura MIG / MAG

INDICE TEMATICO

Dedicatoria 3
Agradecimiento 4
Resumen 5
Glosario 6
Objetivo general 13
Objetivo específico 13
Alcances 14
Limitaciones 14

CAPITULO I:
MARCO TEORICO ESTUDIO DE LAS SOLDADURAS DISIMILES 15

1.0 Introducción al estudio de las soldaduras disimiles 16
1.1 Historia de la soldadura 17
1.2 Conceptos generales de soldaduras 20
1.3 Soldaduras disimiles 21
1.4 Proceso de soldadura GMAW 22
1.5 Material de aporte ER 309 L 27
1.6 Aplicaciones industriales del ER 309 L 28
1.7 Importancia de la calidad en la Soldadura 29
1.7.1 Misión 29
1.7.2 Vision 29

1.8 Clasificación de los aceros 30
1.8.1 Aceros al Carbono 30
1.8.1.1 Acero ASTM A36 31
1.8.1.2 Acero ASTM A53 33
1.8.1.3 Acero ASTM A106 36
1.8.1.4 Acero ASTM A516 40
1.8.2 Aceros de Baja Aleación (HSLA) 44
1.8.3 Aceros Inoxidables 45
1.8.3.1 Acero Inoxidable AISI 304 46
1.8.3.2 Acero Inoxidable AISI 304L 48
1.8.3.3 Acero Inoxidable AISI 316L 51
1.8.3.4 Acero Inoxidables AISI 309 55
1.8.3.5 Acero Inoxidable AISI 309L 57
1.8.4 Aceros Aliados 59
1.8.5 Clasificación según cantidad de carbono (C) 60

1.9 Metalurgia de la soldadura 61
1.9.1 Metalurgia de la unión soldada 61
1.9.2 Metal de soldadura 61
1.9.3 Zona de fusión 61
1.9.4 Zona afectada por el calor (ZAC) 61
1.9.5 Metal base 62
1.9.6 Ciclo térmico de la soldadura 62
1.9.7 Solidificación del metal de soldadura 63
1.9.8 Transformaciones metalúrgicas 63
1.9.9 Importancia de la metalurgia en soldaduras disimiles 64

CAPITULO II:
MARCO TEORICO DILUCION EN SOLDADURAS DISIMILES 65

2.0 Dilución en soldaduras Disimiles 66
2.0.1 Introducción 66
2.0.2 Definición de dilución 66
2.0.3 Factores que influyen en la dilución. 67
2.0.4 Dilución en soldaduras disimiles ASTM A36 – AISI 304 68
2.0.5 Influencia del material de aporte ER 309 L 68
2.0.6 Consecuencias de una dilución excesiva 69
2.0.7 Métodos para controlar la dilución 69
2.0.8 Importancia de la dilución en el presente proyecto 69

2.1 Defectología de la soldadura 70
2.1.1 Introducción 70
2.1.2 Clasificación de las discontinuidades 71
2.1.3 Porosidad 72
2.1.4 Falta de fusión 72
2.1.5 Falta de penetración 73
2.1.6 Inclusiones 73
2.1.7 Grietas 74
2.1.8 Socavado 74
2.1.9 Salpicaduras 75
2.1.10 Importancia del control de defectos en soldaduras disimiles 75

2.2 Ensayos destructivos y no destructivos 76
2.2.1 Ensayos destructivos (ED) 77
2.2.2 Ensayos no destructivos (END) 79
2.2.3 Ensayos aplicados en el proyecto 81

2.3 Normas y organismos aplicables 81

CAPITULO III:
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 84

3.0 Problema Industrial 85
3.1 Justificación 85
3.2 Diagrama de Ishikawa 86
3.3 Análisis Causa - Raíz 86
3.4 Árbol del problema 87

CAPITULO IV:
DESARROLLO DEL PROYECTO 88

4.0 Marco de la Ingeniería Mantenimiento Industrial 89
4.1 Materiales 89
4.2 Equipos 90
4.3 Elementos de protección personal 91
4.4 CHECK LIST de equipos y EPP a utilizar 94
4.5 PERMISO DE TRABAJO A REALIZAR 100
4.5.1 Análisis de trabajo seguro (ATS) 100
4.5.2 Permiso de trabajo en Caliente 101
4.6 Preparación de probetas 103
4.7 Parámetros de soldadura 105
4.8 Inspecciones 106
4.9 Ensayo 108

CAPITULO V:
ANÁLISIS Y RESULTADOS 109

5.0 Costos: En esta etapa de proyecto se consideran los siguientes pasos 110
5.1 Comparación con otros materiales de aporte 113
5.2 Resultados de inspección visual 114
5.2.1 Registro de inspección visual 114
5.2.2 Registro de ensayo de líquidos penetrantes 115
5.2.3 Imágenes del procedimiento realizado 116
5.2.4 Descripción visual de una unión 117
5.2.5 No se deben detectar anomalías superficiales visuales, ... 118
que determinen el rechazo de la soldadura 119
5.3 Beneficios 120
5.4 Viabilidad 121

CAPITULO VI:
CONCLUSION Y RECOMENDACIONES 124

6.0 Conclusión 125
6.1 Importancia de la clasificación de los aceros en las soldaduras disimiles ... 126
6.2 Recomendaciones 126

CAPITULO VII:
IMPLEMENTACION 127

7.0 Bibliografía 128
7.1 Anexos 130
7.1.0 WPS 130
7.1.1 PQR 131
7.1.2 WPQ 132

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1.1 Historia de la soldadura 17
Figura 2. 1.1 Historia de la soldadura 18
Figura 3. 1.2 Conceptos generales de soldaduras 20
Figura 4. 1.3 Soldaduras disimiles 21
Figura 5. 1.4 Proceso de soldadura GMAW 23
Figura 6.1.5 Excelente resistencia a la fisuración en caliente 27
Figura 7. 1.6 Aplicaciones industriales del ER 309 L 28
Figura 8. 1.8.1.1 Acero ASTM A36 32
Figura 9. 1.8.1.1 Acero ASTM A36 32
Figura 10. 1.8.1.2 Acero ASTM A36 34
Figura 11. 1.8.1.2 Acero ASTM A36 35
Figura 12. 1.8.1.3 Acero ASTM A106 38
Figura 13. 1.8.1.3 Acero ASTM A106 Schedule 40 y 80 39
Figura 14. 1.8.1.3 Acero ASTM A106 Schedule 160 39
Figura 15. 1.8.2 Aceros de Baja Aleación (HSLA) 44
Figura 16. 1.8.3 Aceros Inoxidables 45
Figura 17. 1.8.3 Acero Inoxidable AISI 304 45
Figura 18. 1.8.3.1 Aceros Inoxidables AISI 304 47
Figura 19. 1.8.3.2 Aceros Inoxidables AISI 304L 48
Figura 20. 1.8.3.2 Aceros Inoxidables AISI 304L 50
Figura 21. 1.8.3.3 Aceros Inoxidables AISI 316L 52
Figura 22. 1.8.3.4 Aporte E 309L 56
Figura 23. 1.8.4 Aceros aliados 59
Figura 24. 2.2.1 Ensayo destructivo (ED) Tracción 76
Figura 25. 2.2.1 Ensayo destructivo (ED) Doblado 76

Figura 26. 2.2.1 Ensayo destructivo (ED) Charpy 77
Figura 27. 2.2.1 Ensayo destructivo (ED) Dureza 77
Figura 28. 2.2.1 Ensayo destructivo (ED) Macrográfico 77
Figura 29. 2.2.2 Ensayo no destructivo (END) Inspección visual (VT) 78
Figura 30. 2.2.2 Ensayo no destructivo (END) Líquidos penetrantes (PT) 78
Figura 31. 2.2.2 Ensayo no destructivo (END) Partículas magnéticas (MT) 78
Figura 32. 2.2.2 Ensayo no destructivo (END) Ultrasonido (UT) 79
Figura 33. 2.2.2 Ensayo no destructivo (END) Radiografía industrial 79
Figura 34. 3.2 Diagrama de Ishikawa 85
Figura 35. 3.4 Árbol del problema 86
Figura 36. 4.1 Materiales 89
Figura 37. 4.2 Equipos 90
Figura 38. 4.3 Elementos de protección personal 91
Figura 39. 4.3 Elementos de protección personal 92
Figura 40. 4.3 Registro de entrega de elementos de protección personal 93
Figura 41. 4.4 Check List de Fuente de poder 94
Figura 42. 4.4 Check List de Esmeril angular 4 $^{1/2}$ 95
Figura 43. 4.4 CHECK LIST de Mascara de medio rostro 96
Figura 44. 4.4 CHECK LIST de Extensión de 220 Volt – 380 Volt 97
Figura 45. 4.4 CHECK LIST de Manos inspección y cuidado 98
Figura 46. 4.4 CHECK LIST de Extintor 99
Figura 47. 4.5 PERMISO DE TRABAJO A REALIZAR 100
Figura 48. 4.5 PERMISO DE TRABAJO EN CALIENTE 101
Figura 49. 4.6 Preparación de probetas – Identificación de material 102
Figura 50. 4.6 Preparación de probeta - Dimensionado 102
Figura 51. 4.6 Preparación de probetas - Emplantillado 103
Figura 52. 4.8 Lugar de trabajo seguro 106
Figura 53. 4.9 Ensayo 107
Figura 54. 4.9 Ensayo de líquidos penetrantes 108
Figura 55. 5.2 Registro de inspección visual de soldadura 114
Figura 56. 5.2 Resultado de inspección con tintas penetrantes 115
Figura 57. 5.2 Resultado de inspección 116
Figura 58. 5.2 Resultado de inspección 117
Figura 59. 5.2 Resultado de inspección no aceptables 118
Figura 60. 5.2 Resultado de inspección no aceptables 119
Figura 61. 5.3 Grafico de Schaeffler 120
Figura 62. 5.4 Diagrama de Schaeffler 121
Figura 63.5.4 Permite obtener una unión resistente y confiable en aplicaciones industriales 122

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limites máximo absolutos de su composición química Ac. ASTM A36. 31
Tabla 2. Composición química (Máximo %) en Acero al Carbono ASTM A53 33
Tabla 3. Composición química (Máximo %) en Acero al Carbono ASTM A106 36
Tabla 4. Composición química (Máximo %) en Acero al Carbono ASTM A516 40
Tabla 5. Propiedades mecánicas del Acero al Carbono ASTM A516 41
Tabla 6. Composición química del Acero Inoxidable AISI 304 (% en peso)..... 45
Tabla 7. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable AISI 304 47
Tabla 8. Composición química y función de elementos..... 49
Tabla 9. Composición química típica (Limites y Rangos) 51
Tabla 10. Propiedades mecánicas; Metal base v/s Electrodo 316L 52
Tabla 11. Composición química Nominal (ASTM A240)..... 55
Tabla 12. Composición química Típica (%) del Acero Inoxidable AISI 309L..... 57
Tabla 13. Clasificación de los Aceros según el contenido de Carbono..... 60
Tabla 14. Resumen de Normas 82
Tabla 15. Clasificación de los materiales utilizados en el proyecto 82
Tabla 16. Parámetros de soldadura (Espesor 10 mm)..... 104
Tabla 17. Parámetros de soldeo según posición GMAW (Espesor 10 mm) 104
Tabla 18. Valores de materiales e insumos 110
Tabla 19. Valores de materiales e insumos.....111
Tabla 20. Valores de materiales e insumos 112
Tabla 21. Distintos materiales de aporte.....113
Tabla 22. Valores según proceso de soldadura..... 120
Tabla 23. Distintos materiales de aporte..... 122

Objetivo general

Evaluar la calidad de las soldaduras disimiles entre aceros al carbono ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando material de aporte ER 309L, mediante el proceso de soldadura GMAW, analizando la influencia de las variables del proceso sobre la integridad de la unión soldada y su aplicación en actividades de mantenimiento industrial.

Objetivo especifico

1. Analizar los fundamentos teóricos de la soldadura disimiles y las propiedades del material de aporte ER 309L

2. Identificar las variables operacionales que influyen en la calidad de las soldaduras realizadas mediante el proceso GMAW.

3. Inspeccionar las uniones soldadas mediante métodos de evaluación apropiados para identificar posibles discontinuidades.

4. Analizar los resultados obtenidos y compararlos con los criterios establecidos en las normas aplicables.

5. Proponer recomendaciones técnicas para la utilización del material de aporte ER 309L en trabajos de mantenimiento industrial.

Alcances

El presente proyecto se enfoca en el estudio de la calidad de soldaduras disimiles entre acero al carbono ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304, utilizando material de alambre de aporte ER 309 L Ø 1.6, mediante el proceso GMAW. La investigación comprende la revisión bibliográfica, la preparación de probetas, la ejecución del procedimiento de soldadura, la evaluación de las uniones obtenidas y la formulación de recomendaciones técnicas para su aplicación en mantenimiento industrial.

Los resultados del estudio podrán servir como referencia para la elaboración de procedimientos de soldadura y para la selección de material de aporte en aplicaciones similares.

Limitaciones

El alcance del proyecto se limita al análisis de soldaduras realizadas con material de aporte ER-309 L y al proceso GMAW. Nos consideran otros procesos de soldadura ni otros materiales de aporte, salvo en análisis comparativo de carácter referencial.

Asimismo, la disponibilidad de equipos para realizar ensayos destructivos o metalográficos puede condicionar el nivel de análisis experimental. En consecuencia, algunas evaluaciones podrán basarse en inspección visual y en los recursos disponibles durante el desarrollo del proyecto.

CAPITULO I: MARCO TEORICO – ESTUDIO DE LAS SOLDADURAS DISIMILES

1.0 Introducción al estudio de las soldaduras disimiles

La soldadura constituye uno de los procesos de fabricación más importantes dentro de la industria metalmecánica, minera, petroquímica, energética y de mantenimiento industrial. Su principal objetivo es unir permanentemente dos o más materiales metálicos mediante la aplicación de calor, presión o una combinación de ambos, con o sin la utilización de un material de aporte, obteniendo una unión capaz de soportar esfuerzos mecánicos similares o superiores a los del metal base.

En la actualidad, el desarrollo tecnológico ha incrementado la necesidad de unir materiales de diferentes características metalúrgicas para aprovechar las propiedades individuales de cada uno. Este tipo de uniones recibe el nombre de soldaduras disimiles, las cuales representan uno de los mayores desafíos para la ingeniería de la soldadura debido a las diferencias existentes entre los materiales que participan en la unión.

Las soldaduras disimiles son ampliamente utilizadas en industrias donde se requiere combinar resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, comportamiento frente a altas temperaturas y optimización de costos. Entre sus aplicaciones destacan la fabricación de tuberías industriales, intercambiadores de calor, estructuras metálicas, plantas químicas, centrales termoeléctricas, minería, industria alimentaria y mantenimiento de equipos industriales.

Uno de los materiales de aporte más utilizados para este tipo de aplicaciones es el Acero Inoxidable ER 309 L, debido a su excelente capacidad para unir aceros al carbono con aceros inoxidables, minimizando la aparición de grietas por solidificación, reduciendo la dilución entre materiales y proporcionando una adecuada resistencia mecánica y química.

El presente proyecto tiene como finalidad estudiar la calidad de las soldaduras disimiles utilizando material de aporte ER 309 L, evaluando las variables que influyen en la calidad del cordón de soldadura, las propiedades metalúrgicas obtenidas y los métodos de inspección empleados para verificar la integridad de la unión soldada.

1.1 Historia de la soldadura

- **Origen de la soldadura**

  La soldadura surge como una necesidad de unir materiales metálicos de manera permanente. Su evolución ha estado estrechamente relacionada con el desarrollo industrial y tecnológico. Desde la perspectiva de la ingeniería en mantenimiento industrial, la soldadura a adquirido especial importancia como técnica de reparación y recuperación de componentes, permitiendo prolongar su vida útil, reducir tiempos de detención y disminuir costos asociados al reemplazo de piezas.

- **Evolución de la soldadura**

Edad de bronce y Hierro	**=>** Unión de metales mediante forja y calentamiento
Edad media	**=>** Desarrollo de la soldadura por forja para herramientas y estructuras metálicas
Edad de 1800	**=>** Descubrimiento del arco eléctrico, base para futuros procesos de soldadura
Siglo XIX	**=>** Desarrollo de la soldadura por arco eléctrico y soldadura con gas
Siglo XX	**=>** Aparición y perfeccionamiento de procesos como SMAW – GMAW – GTAW
Actualidad	=> Soldadura aplicada a Fabricación, Reparación y Mantenimiento Industrial, con mayor control de parámetros, inspecciones y ensayos no destructivos.

Esta evolución permite utilizar la soldadura no solo como método de unión sino también como una herramienta estratégica para la recuperación de componentes, prevención de fallas, reducción de costos y continuidad operacional.





Figura 1. 1.1 Historia de la soldadura

- **Evolución de los procesos MI/MAG (GMAW)**

Los procesos MIG (Metal Inert Gas) y MAG (Metal Active Gas) surgieron durante el desarrollo de la soldadura por arco eléctrico con alimentación continua de alambre. Su evolución permitió aumentar la productividad y mejorar el control de las uniones soldadas, reemplazando progresivamente métodos que requieren mayor intervención manual.

Línea de Tiempo:

Década de 1920 – 1930 => Desarrollo de los primeros procesos de la soldadura con electrodo continuo.

Década de 1940 => Se desarrolla la soldadura MIG, utilizando gases inertes como Argón y Helio, principalmente para aluminio y otros metales no ferrosos.

Década de 1950 => Se desarrolla y consolida la Soldadura MAG, utilizando gases activos, principalmente CO_2 y posteriormente mezclas de Argon – CO_2. Aumentando su aplicación en aceros

Década de 1960 – 1980 => Se perfeccionan las fuentes de poder, sistemas de alimentación y modos de transferencia de metal: Cortocircuito, Globular y Spray.

Actualidad => Los procesos MIG/MAG se integran con sistemas electrónicos de control, automatización y Robótica, permitiendo mayor precisión, productividad y repetibilidad.

Desde la perspectiva de la Ingeniería en Mantenimiento Industrial, la evolución de MIG/MAG ha permitido utilizar estos procesos de manera eficiente en reparación, recuperación y fabricación de componentes, reduciendo tiempos de intervención, costos de reemplazo y periodos de detención de los equipos.

Además, el control de parámetros como amperaje, voltaje, velocidad de alimentación y gas protector permite obtener uniones más confiables y facilitar el control de calidad durante las actividades de mantenimiento





Figura 2. 1.1 Historia de la soldadura

- **Importancia de la soldadura en la industria moderna**

  En la industria moderna acompañada con la ingeniería de mantenimiento industrial, la soldadura es vital para asegurar la disponibilidad de los equipos, reducir los tiempos de inactividad y ejecutar las reparaciones de manera confiables.

  Requiere definir procedimientos, seleccionar materiales de aporte compatibles, controlar distorsiones térmicas y verificar la calidad de las uniones.

  En el contexto moderno, además, impacta directamente en la rentabilidad, en la confiabilidad, en la seguridad operativa y en la industria como; la minería, energía, manufactura y transporte. Es una competencia técnica que conecta el día a día del taller con la estrategia global de activos de una organización.

- **Relación con el mantenimiento industrial**

  Desde la perspectiva del mantenimiento, la correcta selección del proceso de soldadura, material de aporte y parámetros de operación contribuye a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los equipos, en este contexto, las uniones soldadas disimiles representa una alternativa de interés para recuperar componentes fabricados con diferentes materiales, permitiendo optimizar los recursos disponibles y favorecer la continuidad operacional de los procesos industriales.

1.2 Conceptos generales de soldaduras

La American Welding Society (AWS) define la soldadura como un proceso mediante el cual se produce la unión localizada de materiales metálicos por medio del calentamiento hasta alcanzar la temperatura de fusión, con o sin aplicación de presión y con o sin material de aporte. Esta definición establece las bases para comprender la importancia de la soldadura como uno de los principales procesos de fabricación y mantenimiento industrial.

La unión soldada se obtiene mediante la formación de un baño de fusión compuesto por el metal base y, cuando corresponde, por el material de aporte. Durante el enfriamiento ocurre la solidificación del metal líquido, originándose una unión metalúrgica permanente.

La calidad de una soldadura depende de múltiples variables, entre ellas:

- Selección adecuada del material de aporte
- Compatibilidad metalúrgica entre materiales
- Parámetros eléctricos de soldadura
- Energía de aporte
- Posición de soldadura
- Preparación de juntas
- Limpieza superficial
- Protección gaseosa
- Habilidad del soldador

Cuando alguno de estos factores no es controlado correctamente pueden aparecer discontinuidades como porosidad, grietas, falta de penetración, inclusiones de escoria o deformaciones, afectando el desempeño estructural de la unión.



Figura 3. 1.2 Conceptos generales de soldaduras

1.3 Soldaduras disimiles

Se denomina soldadura disímil a la unión permanente entre dos materiales metálicos cuyas propiedades químicas, físicas o metalúrgicas son diferentes.

Generalmente estas uniones corresponden a combinaciones como:

- Acero al carbono – acero inoxidable
- Acero inoxidable ferrítico – Austenítico
- Acero inoxidable – acero baja aleación
- Aceros resistentes al calor
- Aceros inoxidables con materiales especiales

Las diferencias entre ambos materiales generan fenómenos metalúrgicos complejos durante el proceso de soldadura, tales como:

- Dilución del metal de aporte
- Formación de estructura frágiles
- Diferencias de expansión térmica
- Tensiones residuales
- Transformaciones microestructurales
- Aparición de grietas en caliente
- Corrosión localizada

Por esta razón, la selección del material de aporte resulta fundamental para asegurar una unión confiable.

Dentro de los materiales utilizados industrialmente destaca el ER 309 L, diseñado específicamente para absorber estas diferencias metalúrgicas y proporcionar una microestructura estable durante el proceso de solidificación.

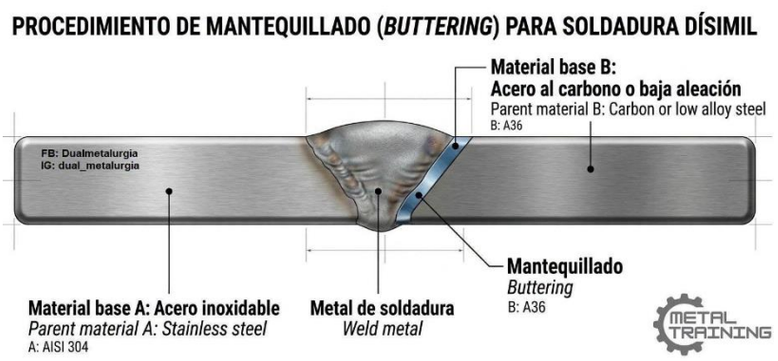


Figura 4. 1.3 Soldaduras disimiles

1.4 Proceso de soldadura GMAW

- **Definición del proceso**

  El proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW), conocido comúnmente como soldadura MIG /MAG, es un proceso de soldadura por arco eléctrico en el que el calor necesario para unir los materiales es generado por un arco establecido entre un alambre-electrodo consumible y el metal base. Durante el proceso, el alambre se alimenta de forma continua mientras un gas protector evita la contaminación del baño de fusión por los gases presentes en la atmosfera.

  El proceso GMAW se caracteriza por su alta productividad, facilidad de automatización y excelente calidad de las uniones, siendo ampliamente utilizado en la fabricación y mantenimiento de estructuras metálicas, equipos industriales y componente mecánicos.

- **Principio de funcionamiento**

  El funcionamiento del proceso GMAW consiste en generar un arco eléctrico entre un alambre consumible y el metal base. El calor producido funde simultáneamente el extremo del alambre y los bordes de las piezas a unir, formando un baño de fusión que, al solidificarse, origina el cordón de soldadura.

  Durante este proceso, un gas protector fluye de manera continua alrededor del arco eléctrico, evitando la oxidación y contaminación del metal fundido. La alimentación constante del alambre permite mantener la continuidad del proceso y obtener soldaduras uniformes.

- **Componentes del equipo GMAW**

  El equipo de soldadura GMAW está compuesto por diversos elementos que trabajan de manera integrada para asegurar un proceso estable y de calidad

  Los principales componentes son:

  - Fuente de poder
  - Alimentador de alambre
  - Antorcha o pistola de soldadura
  - Rollo de alambre consumible ER 309L, Ø1.6 T.1
  - Sistema de suministro de gas protector

- **Material de aporte continuo**

  Una de las principales características del proceso GMAW es el uso de un alambre consumible de alimentación continua, el cual actúa simultáneamente como electrodo y material de aporte.

  En el presente proyecto se utiliza el ER 309 L, clasificado según la norma AWS A5.9, debido a su alta compatibilidad para la soldadura disímil entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304. Su composición química favorece la obtención de uniones con buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.

- **Gas protector**

  El gas protector tiene como función principal aislar el arco eléctrico y el baño de fusión del contacto con el oxígeno, nitrógeno y humedad presentes en el ambiente, evitando la formación de porosidad, oxidación y otras discontinuidades.

  En el proceso GMAW se emplean gases puros o mezclas, entre los cuales destacan:

  - Argon (Ar)
  - Dióxido de carbono (CO_2)
  - Mezcla Argon con CO_2
  - Mezcla de Argon con Oxigeno

  Para soldadura disímil entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 se recomienda utilizar mezclas basadas en Argón, ya que proporcionan mayor estabilidad del arco y mejor calidad superficial del cordón.

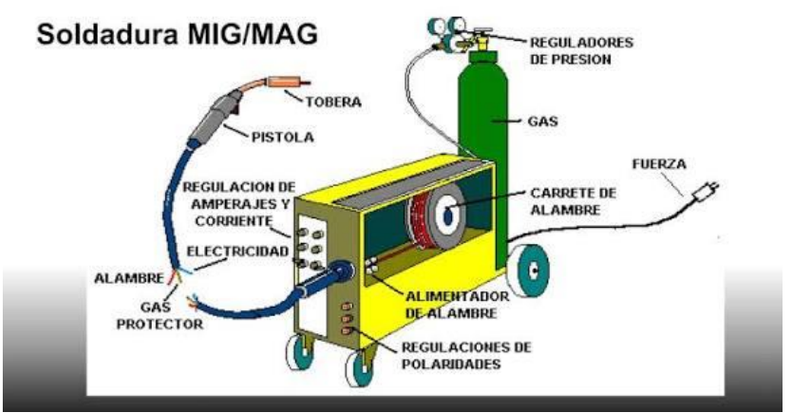


Figura 5. 1.4 Proceso de soldadura GMAW

- **Tipos de transferencia metálica**

  La transferencia metálica corresponde a la forma en que el metal fundido pasa desde el alambre consumible hacia el baño de soldadura. En el proceso GMAW se distinguen los siguientes tipos:

  Transferencia por corte circuito
  Se produce cuando el alambre entra en contacto con el baño de fusión, generando pequeños cortocircuitos sucesivos. Es utilizada para espesores delgados y permite soldar en diferentes posiciones.

  Transferencia globular
  Se caracteriza por la formación de gotas de gran tamaño que caen por efecto de la gravedad. Presenta mayor generación de salpicaduras y es menos utilizada cuando se requiere alta calidad superficial.

  Transferencia por aspersión (Spray)
  En este modo, el metal se transfiere mediante gotas muy pequeñas impulsadas por el arco eléctrico. Produce cordones uniformes, alta penetración y excelente calidad, siendo adecuada para materiales de mayor espesor.

  Transferencia pulsada
  Combina pulsos de alta y baja corriente para controlar la transferencia del metal. Permite obtener soldaduras de alta calidad con menor aporte térmico y menor deformación, siendo especialmente útil para materiales sensibles al calor.

- **Ventajas**

  Entre las ventajas del proceso se destacan

  - Alta velocidad de soldadura
  - Alimentación continua del material de aporte
  - Buena calidad del cordón
  - Bajo nivel de escoria
  - Menor necesidad de limpieza posterior
  - Alta productividad
  - Fácil automatización
  - Buena soldabilidad en diversos materiales
  - Excelente rendimiento e procesos industriales
- **Desventajas**

  A pesar de sus ventajas, el proceso también presenta algunas limitaciones

  - Mayor sensibilidad al viento cuando se trabaja en el aire libre
  - Requiere protección mediante gas
  - Mayor costo del equipo respecto a otros procesos
  - Necesidad de una adecuada preparación de las superficies
  - Mayor complejidad en el ajuste de parámetros a utilizar

Estas condiciones deben ser consideradas para asegurar una correcta ejecución de la soldadura a ejecutar

- **Aplicaciones industriales**

  El proceso GMAW es ampliamente utilizados en distintos sectores industriales debido a su productividad y calidad. Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

  - Fabricación de estructuras metálicas
  - Industria minera
  - Industria alimenticia
  - Construcción naval
  - Fabricación de recipientes y tuberías
  - Industria automotriz
  - Mantenimiento industrial
  - Fabricación de maquinaria y equipos

- **Uso del proceso GMAW en soldaduras disimiles**

El proceso GMAW es una de las alternativas mas utilizadas para la unión de materiales disimiles debido a su control del aporte térmico, estabilidad del arco facilidad para utilizar diferentes materiales de aporte.

En la soldadura entre el acero de buena calidad siempre que se seleccionen adecuadamente los parámetros de soldadura y el material de aporte. El control de variables como el voltaje, la corriente, la velocidad de avance y el caudal de gas protector es fundamental para reducir la aparición de discontinuidades y asegurar un comportamiento metalúrgico adecuado.

- **Aplicación del ER 309 L**

El alambre ER 309 L es uno de los materiales de aporte más utilizados para la soldadura disímil entre a ceros al carbono y aceros inoxidables. Su composición, con un mayor contenido de cromo y níquel y un bajo contenido de carbono, favorece la formación de una microestructura estable, reduce el riesgo de fisuración y mejora la resistencia a la corrosión de la unión soldada.

En este proyecto, el ER 309 L será utilizado para unir acero ASTM A36 con acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso GMAW. Su selección permitirá evaluar la calidad de la unión soldada y analizar la influencia del material de aporte en las propiedades metalúrgicas y mecánicas del cordón de soldadura.

1.5 Material de aporte ER 309 L

El **ER 309** L, corresponde a un alambre solido de acero inoxidable austenítico clasificado bajo la norma AWS A5.9, diseñado para procesos SMAW (Arco) - GMAW (MIG/MAG) - GTAW (TIG) y otros procesos de soldadura con protección gaseosa.

Su composición química presenta un mayor contenido de Cromo y Níquel respecto de otros materiales de aporte, permitiendo compensar la dilución que ocurre al soldar aceros al carbono con aceros inoxidables.

Entre sus principales características destacan:

- Excelente resistencia a la fisuración en caliente
- Alta resistencia mecánica
- Buena ductilidad
- Elevada resistencia a la corrosión
- Buena estabilidad del arco
- Excelente humectación de baño de fusión
- Compatibilidad con diferentes tipos de acero.

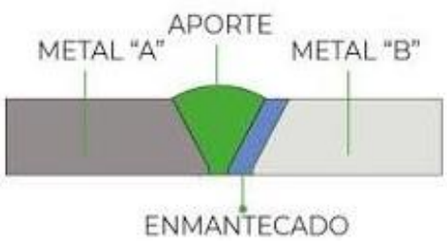


Figura 6.1.5 Excelente resistencia a la fisuración en caliente

La letra L indica un bajo contenido de carbono, reduciendo la precipitación de Carburos de Cromo durante el enfriamiento y disminuyendo la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

Estas propiedades convierten al ER 309 L en uno de los materiales de aporte más utilizados para fabricar, reparación y mantenimiento de componentes sometidos a condiciones severas de operación.

1.6 Aplicaciones industriales del ER 309 L

El material de aporte ER 309 L, posee una amplia aplicación en diversos sectores industriales debido a su versatilidad para unir materiales de diferente composición química.

Entre las principales aplicaciones destacan.

- Industria minera
- Industria petroquímica
- Centrales termoeléctricas
- Plantas de celulosas
- Fabricación de estanques
- Sistema de tuberías industriales
- Equipos sometidos a corrosión
- Mantenimiento de maquinaria pesada

En estas aplicaciones resulta fundamental garantizar una adecuada calidad de la soldadura, ya que una falla en la unión puede generar pérdidas económicas importantes, riesgos para la seguridad operacional y disminución de la vida útil de los equipos.



Figura 7. 1.6 Aplicaciones industriales del ER 309 L

1.7 Importancia de la calidad en la Soldadura

La calidad de una unión soldada constituye uno de los principales indicadores del desempeño estructural de un componente industrial.

Una soldadura de buena calidad debe cumplir con requisitos relacionados con:

- Resistencia mecánica
- Continuidad metalúrgica
- Ausencia de discontinuidades criticas
- Correcta geometría del cordón
- Penetración adecuada
- Resistencia a la corrosión
- Cumplimiento de normas técnicas
- Presentación adecuada

Para verificar estas condiciones se emplean inspecciones visuales, ensayos no destructivos y ensayos destructivos, permitiendo determinar si la unión cumple con los criterios establecidos por las normas internacionales.

En el caso de las soldaduras disimiles utilizando ER 309 L, la evaluación de la calidad adquiere especial importancia debido a la diferencia de comportamiento metalúrgico entre los materiales unidos, siendo necesario controlar cuidadosamente las variables del proceso para asegurar un desempeño confiable durante la vida útil del componente.

1.7.1 Misión

Desarrollar un estudio técnico sobre la calidad de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando material de aporte ER 309L, aplicando procedimientos de soldadura e inspección basados en normas internacionales para obtener resultados confiables que contribuyan al mantenimiento industrial.

1.7.2 Vision

Construir una investigación de referencia para futuros estudios relacionados con soldaduras disimiles, promoviendo la aplicación de procedimientos técnicamente validados que favorezcan la calidad, seguridad y confiabilidad de las uniones soldadas en la industria,

1.8 Clasificación de los aceros

La clasificación de los aceros puede realizarse considerando diferentes criterios tales como; la composición química, el contenido de carbono, el proceso de fabricación, el tratamiento térmico y su aplicación industrial.

En el presente proyecto se utilizará principalmente la clasificación basada en la composición química, debido a su influencia en el comportamiento metalúrgico durante el proceso de soldadura.

Desde este punto de vista, los aceros pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

- Acero al Carbono
- Aceros de Baja Aleación
- Acero Inoxidable
- Acero Aliados

1.8.1 Aceros al Carbono

Son aquellos cuya resistencia mecánica depende principalmente del contenido de carbono, presentando únicamente pequeñas cantidades de otros elementos de aleación. Constituyen el grupo de mayor utilización en la industria debido a su buena relación entre costo, resistencia mecánica y facilidad de fabricación.

Generalmente contienen:

- Carbono (C): hasta 2,11 %
- Manganeso (Mn): hasta 1,65 %
- Silicio (Si): hasta 0,60 %
- Cobre (Cu): hasta 0,60 %

Su principal característica es su buena soldabilidad cuando el contenido de carbono es bajo o medio, razón por la cual son ampliamente utilizados en estructuras metálicas, estanques, tuberías, puentes y equipos industriales.

Dentro de este grupo se encuentran materiales como:

1.8.1.1 Acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es el tipo de acero más utilizado a nivel mundial en la construcción de infraestructura, edificios y puentes debido a su excelente equilibrio entre costo, resistencia y soldabilidad

Composición química.

Es un acero bajo en carbono (o acero dulce), lo que evita que se vuelva quebradizo y permite su excelente maquinabilidad:

Tabla Nº1: Límites máximos absolutos de su composición química ASTM A36.

Elemento Químico	Símbolo	Porcentaje máx. admitido	Criterios de control en laboratorio
Carbono	C	≤ 0.29%	Si un lote supera este valor, el acero pierde soldabilidad y es rechazado de inmediato
Manganeso	Mn	≤ 1.20%	Controla que el material mantenga su ductilidad sin volverse quebradizo ante dobles mecánicos
Silicio	Si	≤ 0.40%	Evita excesos de silicio que afecten el acabado de superficies galvanizadas
Fosforo	P	≤ 0.40%	Evita fracturas frágiles a baja temperaturas
Azufre	S	≤ 0.05%	Mantenerlo bajo impide el agrietamiento térmico durante los cordones de soldadura, corte por plasma o soplete
Cobre	Cu	≥0.20%	Solo se cuantifica si el cliente compra la variante de alta resistencia a la corrosión atmosférica
Hierro	Fe	Balance (~98.0%)	Ocupa todo el porcentaje restante del peso total de la aleación

Propiedades mecánicas.

El número “36” en su nombre hace referencia directa a su resistencia mínima al esfuerzo.

Limite elástico mínimo: 36.000 psi (250 Mpa o 2.530 Kg/cm^2)
Resistencia a la tracción: 58.000 a 80.000 psi (400 a 550 Mpa)
Elongación mínima: 20 % en 2 pulgadas
Densidad: 7.85 g/cm^3

Aplicaciones:

El acero A36 se, fabrica principalmente mediante laminación en caliente y se distribuye en:

- **Perfiles estructurales**: Vigas I, Vigas H, Canales U y Ángulos de hierro
- **Planchas y Placas:** Chapas gruesas para tanques o bases de columnas
- **Barras:** Redondas, Cuadradas, Rectangulares (pletinas) y Barras roscadas.

Se emplea ampliamente en la industria de la construcción metalmecánica e infraestructura civil.

- Estructuras atornilladas, remachadas o soldadas para edificios y naves industriales
- Componentes de puentes, pasarelas y plataformas de carga.
- Fabricación de maquinaria pesada, carrocerías y contenedores
- Tanques de almacenamiento de agua carrocerías y contenedores.

Ventajas principales.

Excelente soldabilidad: se puede soldar fácilmente con cualquier proceso estándar (SMAW, GMAW, FCAW) sin necesidad de precalentamiento.

Alta maquinabilidad: Su bajo carbono permite cortarlo, doblarlo, taladrarlo y mecanizarlo con facilidad.

Economía: Es una de las opciones estructurales más accesibles del mercado.

Acero ASTM A36
Viga H



Acero ASTM A36
Platinas y Ángulos



Figura 8. 1.8.1.1 Acero ASTM A36

Acero ASTM A36
Cañería



Acero ASTM A36
Planchas



Figura 9. 1.8.1.1 Acero ASTM A36

1.8.1.2 Acero ASTM A53

La norma **ASTM A53** es la especificación estándar para tubos de acero al carbono, negros y galvanizados por inmersión en caliente, soldados y sin costura. Está diseñada principalmente para aplicaciones mecánicas, de conducción de fluidos a baja o moderada presión (agua, vapor, gas, aire) y para usos estructurales comunes.

Composición química

La composición química de la norma ASTM A53 para tubos de acero al carbono varía según el grado y el tipo de fabricación (tipo F, E o S), limitando principalmente los máximos permitidos en porcentaje (%) de cada elemento.

Tabla Nº 2. Composición química (Máximo %)

Elemento químico	Grado A (Tipos S y E)	Grado B (Tipo S y E)	Grado A (Tipo F)
Carbono (C)	≤ 0.25 %	≤ 0.30 %	≤ 0.30 %
Manganeso (Mn)	≤ 0.95 %	≤ 1.20 %	≤ 1.20 %
Fosforo (P)	≤ 0.05 %	≤ 0.05 %	≤ 0.05 %
Azufre (S)	≤ 0.045 %	≤ 0.045 %	≤ 0.045 %
Cobre (Cu)	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %
Níquel (Ni)	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %
Cromo (Cr)	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %	≤ 0.40 %
Molibdeno (Mo)	≤ 0.15 %	≤ 0.15 %	≤ 0.15 %
Vanadio (V)	≤ 0.08 %	≤ 0.08 %	≤ 0.08 %

Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas del acero ASTM A53 depende de su grado (Grado A y Grado B), dividiéndose en resistencia a la tracción y limite elástico.

Grado A:

Limite elástico mínimo: 30.000 psi (205 Mpa)
Resistencia a la tracción mínima: 48.000 psi (330 Mpa)

Grado B:

Limete elástico mínimo: 35.000 psi (240 Mpa)
Resistencia a la tracción mínima: 60.00 psi (415 Mpa)

Tipos de tubería ASTM A53

La especificación ASTM A53 se clasifica en tres tipos de fabricación, dependiendo del método de construcción.

- **Tipo F (soldados a tope en horno)**
  - Fabricados mediante soldadura continua longitudinal.
  - Solo están disponibles en Grado A y son los menos resistentes mecánicamente

- **Tipo E (Soldados por resistencia eléctrica – ERW)**
  - Sus bordes se unen mediante inducción eléctrica de alta frecuencia.
  - Disponibles en Grado A y B.
  - La costura del Grado B requiere tratamiento térmico para eliminar tensiones.

- **Tipo S (Sin costura – Seamless)**
  - Fabricados mediante extrusión o perforación en caliente.
  - Disponible en Grado A y B, ideales para exigencias críticas de presión

Característica de resistencia

Grado B:

Mayor resistencia a la deformación bajo carga, siendo el tipo más común en la industrial

Uso:

Apto para procesos de doblado, rebordeado y soldadura en conducción de fluidos o estructuras.

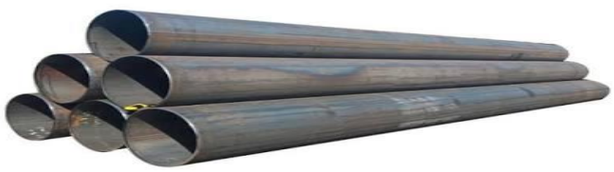


Figura 10. 1.8.1.2 Acero ASTM A36

Especificaciones generales

- **Rango de diámetros:** Desde 1/8 hasta 26 pulgadas de diámetro nominal (NPS)
- **Espesores habituales:** Se rige bajo las tablas de cedulas estándares, principalmente Schedule 40 (SCH 40) y Schedule 80 (SCH 80)
- **Acabados finales:** Tubo negro (con recubrimiento protector de fabrica) o galvanizado (Capa de Zinc anticorrosión)
- **Extremos:** Disponibles con corte recto (lisos), biselados para soldar o roscados (hilos NPT o BSP)

Aplicaciones comunes

- Conducción de fluidos domésticos e industriales (agua caliente/fría, vapor, aire comprimido, gas natural).
- Estructuras livianas y pesadas (postes, andamios, pasamanos, columnas arquitectónicas.
- Encapsulado o ducto de protección para cables mecánicos o tuberías menores.



Figura 11. 1.8.1.2 Acero ASTM A36

1.8.1.3 Acero ASTM A106

Es la especificación estándar que regula las tuberías de acero al carbono sin costura, usadas en trabajos destinados específicamente a servicios de alta presión y alta temperaturas.

Clasificación por grados

Grado A: Carbono máximo de 0.25 %, menor resistencia y mejor soldabilidad.

Grado B: Carbono máximo de 0.30 %, el tipo más común y equilibrado.

Grado C: Carbono máximo de 0.35 %, mayor resistencia mecánica.

Tabla 3. Composición química (Máximo %)

Elemento químico	**Grado A**	**Grado B (Mas común)**	**Grado C**
Carbono (C) máx.	0.25 %	0.30 %	0.35 %
Manganeso (Mn)	0.27 a 0.93 %	0.29 a 1.06 %	0.29 a 1.06 %
Fosforo (P) máx.	0.035 %	0.035 %	0.035 %
Azufre (S) máx.	0.035 %	0.035 %	0.035 %
Silicio (Si) min.	0.10 %	0.10 %	0.10 %

Elementos de aleación secundarios (Máximos permitidos)

Para garantizar la calidad de la soldadura y la ductilidad del material, la norma establece límites estrictos para otros elementos residuales en los tres grados.

- **Cromo (Cr): ≤ 0.40 %**
- **Cobre (Cu): ≤ 0.40 %**
- **Níquel (Ni): ≤ 0.40 %**
- **Molibdeno (Mo): ≤ 0.15 %**
- **Vanadio (V): ≤ 0.08 %**

Nota de la norma:

La suma combinada de estos cinco elementos secundarios (Cr+Cu+Ni+Mo+V) no debe exceder el 1.00 % de mezcla total.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la norma ASTM A106 determinan la capacidad del tubo para resistir fuerzas físicas, tracción y presión interna sin romperse ni deformarse permanentemente.

El Grado B representa el estándar industrial más equilibrado

Grado A:

Limite elástico mínimo: 30.000 psi (205 Mpa)
Resistencia a la tracción mínimo: 48.000 psi (330 Mpa

Grado B:

Limite elástico mínimo: 35.000 psi (240 Mpa)
Resistencia a la tracción mínima: 60.000 psi (415 Mpa)

Grado C:

Limite elástico mínimo: 40.000 psi (275 Mpa)
Resistencia a la tracción mínimo: 70.000 psi (485 Mpa)

Aplicaciones comunes

Las aplicaciones más comunes de las tuberías ASTM A106 se concentran en industrias que transportan fluidos o gases a alta presiones y temperaturas extremas. Al ser tubos sin costura, ofrecen la máxima seguridad contra fugas o fallas estructurales.

Industrias y usos principales

- Refinerías de petróleo y gas
- Plantas petroquímicas y químicas
- Centrales termoeléctricas y de energía
- Calderas industriales e intercambiadores de calor
- Sistemas de vapor de alta presión
- Plataformas de perforación

Refinerías de petróleo y gas:

Conducción de hidrocarburos crudos, gases de proceso y subproductos calientes durante las etapas de destilación y craqueo.

Plantas petroquímicas y químicas:

Transporte de fluidos reactivos, ácidos o vapor de alta presión entre las torres de proceso y los reactores.

Centrales termoeléctricas y de energía:

Líneas principales de vapor sobrecalentado que conectan las calderas con las turbinas de generación eléctrica.

Calderas industriales e intercambiadores de calor:

Fabricación de serpentines, colectores y tuberías de alimentación que operan continuamente bajo fuego directo o calor intenso.

Sistema de vapor a alta presión:

Redes de distribución de vapor para calefacción industrial, plantas de alimentos, textiles o manufactura pesada.



Figura 12. 1.8.1.3 Acero ASTM A106

Los Schedule más utilizados.

Con un diámetro nominal de 4” (Diámetro exterior de 114.3 mm)

- **Schedule 40 (Estándar / STD): espesor de pared de 6.02 mm**

  Es el espesor más común en la industria. Se usa en líneas de vapor de media presión, aire comprimido pesado y transporte de hidrocarburos a temperaturas moderadas**.**

- **Schedule 80 (Extra fuerte / XH o XS): espesor de pared de 8.56 mm**

  Ofrece una pared sustancialmente más gruesa. Se aplica en líneas de alta presión, sistemas sujetos a corrosión o erosión severa o tramos de tuberías cercanos a bombas y válvulas donde hay golpes de ariete.

- **Schedule 160 y XXS (Doble extra fuerte): espesor de pared de 13.49 mm**

  Destinados a servicios críticos de extrema presión, como líneas de inyección de vapor sobrecalentado en centrales eléctricas o plantas petroquímicas avanzadas.

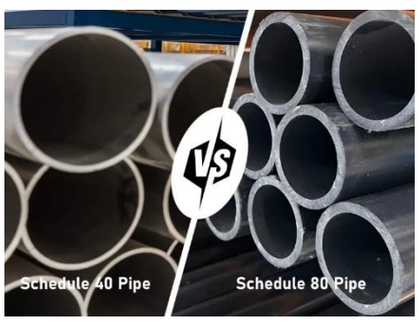


Figura 13. 1.8.1.3 Acero ASTM A106 Schedule 40 y 80



Figura 14. 1.8.1.3 Acero ASTM A106 Schedule 160

1.8.1.4 Acero ASTM A516

La norma ASTM A516 es una especificación estándar de la ASTM Internacional para placas de acero al carbono destinadas a recipientes a presión soldadas, enfocándose en los grados 55, 60, 65 y 70. Se utiliza principalmente para servicios a temperaturas moderadas y bajas debido a su excelente tenacidad y resistencia a la entalla o ranuras utilizadas en la industria.

Características principales

- Aplicación: fabricación de calderas, tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor y recipientes que soportan presión interna.
- Tenacidad: excelente resistencia al agrietamiento y fragilidad a temperaturas bajas o ambientes gracias a su estructura de grano fino
- Soldabilidad: posee muy buenas condiciones para procesos de soldadura y conformación mecánica.
- El acero ASTM A516 más utilizado en el mundo es el Grado 70, el segundo más común es el Grado 60 ya que ofrece una máxima resistencia para recipientes, se adquiere mejor financiamiento por su resistencia diseñando paredes delgadas y posee una excelente tenacidad.

Tabla 4. Composición química (Máximos en %)

Elemento químico	Grado 55	Grado 60	Grado 65	Grado 70
Carbono (C)	0.18 %	0.21 %	0.24 %	0.27 %
Manganeso (Mn)	0.60 - 0.90 %	0.60 - 1.20 %	0.85 - 1.20 %	0.85 - 1.20 %
Fosforo (P)	0.025 %	0.025 %	0.025 %	0.025 %
Azufre (Si)	0.025 %	0.025 %	0.025 %	0.025 %
	0.15 – 0.40 %	0.15 – 0.40 %	0.15 – 0.40 %	0.15 – 0.40 %

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del Grado 70 (el más vendido por su resistencia) y el Grado 60 (elegido por su excelente formabilidad o doblado sin deteriorarse el material).

Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero ASTM A516

Propiedad mecánica	**Grado 70 (Alta resistencia)**	**Grado 60 (Alta ductilidad)**	**Diferencia técnica**
Resistencia a la tracción	485 – 620 Mpa (70 – 90 Ksi)	415 – 550 Mpa (60 – 80 Ksi)	El Grado 70 soporta un 16% más carga antes de romperse
Límite de fluencia mínimo	≥ 260 Mpa (38Ksi)	≥ 220 Mpa (32 Ksi)	El Grado 70 resiste más presión interna sin deformarse de por vida
Elongación mínima (en 2”)	≥ 21%	≥ 25%	El Grado 60 es un 20% más estirable, ideal para piezas muy complejas
Esfuerzo de diseño (100ºC)	138 Mpa (20.0 Ksi)	118 Mpa (17.1 Ksi)	El Grado 70 permite diseñar tanques con paredes más delgadas y ligeras
Dureza Brinell típica	140 – 200 HBW	120 – 1HBW	El Grado 70 es más duro y resistente al desgaste superficial
Doblado en frio	2.0 x Espesor	1.5 x Espesor	El Grado 60 se puede doblar en radios más cerrados sin agrietarse

Aplicaciones más comunes

Las aplicaciones más comunes del acero ASTM A516 se concentran en industrias pesadas que manejan fluidos, gases o vapores bajo condiciones severas de presión y temperaturas.

1) **Industria de Gas y Petróleo (Oil & Gas)**

   Es el material estándar para el procesamiento y almacenamiento de hidrocarburos:

   - **Tanques de GLP (Gas Licuado de Petróleo):**
     Utilizado en esferas y balas de almacenamiento porque el material tolera las bajas temperaturas de evaporización del gas.

   - **Torres de Destilación y Fraccionamiento:**
     Columnas verticales en refinerías que soportan presiones internas moderadas y temperaturas continuas

   - **Separadores de Fluidos (Gas/Crudo):**
     Recipientes horizontales instalados en campos petroleros para separar los componentes del subsuelo.

2) **Generación de Energía y Vapor**

   Soporta las altas demandas de los ciclos térmicos de agua y vapor:

   - **Calderas Industriales:**
     Fabricación de los domos de vapor y cuerpos de fuego donde el agua se convierte en vapor a alta presión.

   - **Intercambiadores de Calor:**
     Placas deflectoras y carcasas exteriores que protegen los haces de tubos internos.

   - **Acumuladores de Vapor:**
     Tanques diseñados para almacenar agua caliente y vapor bajo presión constante para plantas termoeléctricas.

3) **Industria Química y Petroquímica**

Excelente para reactores y almacenamiento de sustancias intermedias:

- **Reactores químicos:**
  Recipientes donde ocurren reacciones controladas a presiones elevadas (frecuentemente revestidos internamente con acero inoxidable)

- **Tanques de Almacenamiento Criogénicos Moderado:**
  Tanques de pared gruesa destinados a gases licuados industriales (como amoniaco o dióxido de carbono) que operan a temperaturas de hasta -46 ºC

4) **Componentes y Tapas de Recipientes**

Por su gran ductilidad, es el acero preferido en talleres de metalmecánica pesada:

- **Virolas de Grandes Diámetros:**
  Cilindros de acero rolados que se suelen en serie para formar el cuerpo de camiones cisternas o tanques estacionarios.

- **Tapas ASME (Cabezales):**
  Tapas formadas por embutido o prensado en frio con geometrías toriesfericas, semiesféricas o elípticas.

Conclusión practica de ingeniería

- Elige Grado 70 si buscas ahorrar peso y dinero en la fabricación de grandes cilindros, recipientes a alta presión o reactores.

- Elige Grado 60 si el proceso de fabricación exige un rolado o embutido extremo en frio (como tapas semiesféricas muy pronunciadas) donde la ductilidad es más critica que la fuerza estructural.

En el presente estudio se emplea el acero ASTM A36 como uno de los materiales base para la fabricación de las probetas de soldadura y está basada en los materiales de construcción más utilizados en la infraestructura estructural

1.8.2 Aceros de Baja Aleación (HSLA)

Los aceros de baja aleación o High Strength Low Alloy (HSLA) contienen pequeñas cantidades de elementos como novio, vanadio, titanio, cobre, cromo o molibdeno, incorporados con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica sin incrementar significativamente el contenido de carbono.

Estos aceros presentan ventajas tales como:

- Mayor resistencia mecánica
- Buena soldabilidad
- Mayor resistencia al desgaste
- Mejor comportamiento frente a cargas dinámicas.

Entre los aceros HSLA más utilizados se encuentran el ASTM A572, ampliamente empleado en estructuras metálicas, puentes, equipos de izaje y componentes sometidos a elevadas solicitudes mecánicas.



Figura 15. 1.8.2 Aceros de Baja Aleación (HSLA)

1.8.3 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un contenido mínimo de 10,5 % de cromo, elemento responsable de la formación de una película pasiva de óxido de cromo que protege la superficie frente a la corrosión.

Dependiendo de su microestructura, los aceros inoxidables se clasifican en:

- Austeníticos 74%
- Ferríticos 18% } %100
- Martensíticos 5%
- Dúplex 3%

Acero inoxidable

Referencia visual de cómo se organizan los Aceros Inoxidables

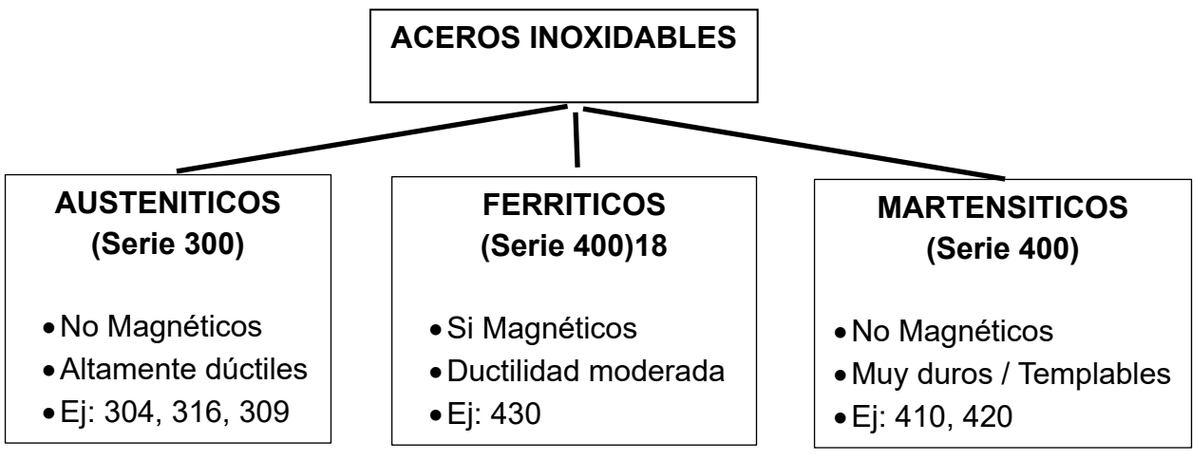


Figura 16. 1.8.3 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables austeníticos representan aproximadamente el 74 % de la producción mundial de aceros inoxidables y destacan por su excelente resistencia a la corrosión y buena soldabilidad.

En este proyecto se consideran principalmente los siguientes grados:

- Acero AISI 304
- Acero AISI 304 L
- Acero AISI 316 L
- Acero AISI 309
- Acero AISI 309 L



Figura 17.1.8.3 Aceros Inoxidables AISI 304

1.8.3.1 Acero Inoxidable AISI 304

El acero AISI 304 es también un acero inoxidable austenítico y es el más utilizado en todo el mundo. Se conoce popularmente en la industria como acero 18/8 debido a su composición química promedio de 18% de Cromo y 8% de Niquel

Al igual que el acero 309, que comparte la estructura austenítica no magnética, pero existen diferencias críticas entre ambos que es la resistencia a la oxidación.

Es decir, que en la Resistencia Térmica:

El acero inoxidable AISI 304 soporta la oxidación hasta los 870 ºC

El acero inoxidable AISI 309 soporta la oxidación hasta los 1.000 ºC

Tabla 6. Composición química del Acero Inoxidable AISI 304 (% en peso)

Elemento Químico	Símbolo	Porcentaje requerido	Función principal en la Aleación
Cromo	Cr	17.50 % - 19.50 %	Aporta la resistencia a la oxidación (capa pasiva)
Níquel	Ni	8.00 % - 10.50 %	Estabiliza la estructura austenítica y da ductilidad
Manganeso	Mn	≤ 2.00 %	Desoxidante y mejora la resistencia en caliente
Silicio	Si	≤ 0.75 %	Facilita la fundición y actúa como desoxidante
Carbono	C	≤ 0.07 %	Controla la dureza (se mantiene bajo para evitar carburos)
Nitrógeno	N	≤ 010 %	Aumenta la resistencia mecánica y la estabilidad
Fosforo	P	≤ 0.045	Impureza residual controlada
Azufre	S	≤ 0.030 %	Impureza controlada (bajo para mejorar la soldabilidad)
Hierro	Fe	Balance (restante)	Base metálica del material (~65 % - 70 %)

Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 en estado recocido (según la norma ASTM A240) garantizan un material altamente dúctil y resistente a la deformación

Tabla 7. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable AISI 304

Propiedades mecánicas	**Valor requerido / típico**
Resistencia a la tracción	≥ 515 Mpa (75 Ksi)
Límite de fluencia	≥ 205 Mpa (30 Ksi)
Elongación mínima (en 2”)	≥ 40 %
Dureza máxima Brinell	≤ 201 HBW (92 HRB en escala Rockwell B)
Módulo de elasticidad E	193,000 Mpa (28,000 Ksi)

Aplicación principal:

Referencia

Este tipo de acero inoxidable AISI 304 es el más usado en consumos masivos de los elementos de alimentos, laboratorios, arquitectura y usos generalizados

Puntos clave de su comportamiento:

- Alta ductilidad
  Su elongación del 40 % es casi el doble del acero al Carbono ASTM A516, lo que permite embutidos profundos y plegados severos sin romperse.

- Endurecimiento por trabajo
  No se puede templar bajo tratamiento térmico. Si se necesita mayor resistencia mecánica, se debe adquirir en estado de trabajado en frio (laminado en frio), lo que eleva drásticamente su fluencia y dureza.

- No magnético
  En estado recocido puro es completamente amagnético (no se pegan los imanes), aunque puede ganar un leve magnetismo tras ser deformado en frio.



Figura 18. 1.8.3.1 Aceros Inoxidables AISI 304

1.8.3.2 Acero Inoxidable AISI 304L

El acero AISI 304L es la versión de extra bajo en carbono (la “L” significa *Low Carbon)* del acero inoxidable austenítico estándar AISI 304. Es uno de los materiales más versátiles y utilizados en el mundo debido a su excelente resistencia a la corrosión, formabilidad y soldabilidad superior.

- **AISI 304 :** Máximo 0.08% de Carbono
- **AISI 304L:** Máximo 0.03% de Carbono

Característica principal

Lo importante de esa característica es que, al realizar la soldadura de acero inoxidable, pasa por un proceso de altas temperaturas pudiendo causar la “precipitación de carburos de cromo” en los bordes del grano. Esto agota el cromo del acero y lo vuelve vulnerable a la corrosión intergranular.

Al tener menos carbono, el acero 304 L evita este problema, permitiendo usarlo en estado soldado sin necesidad de un tratamiento térmico posterior.

Composición química Típica (%)

La composición química del acero inoxidable AIISI 304L bajo la norma ASTM A240, detallando el porcentaje de cada elemento y su rol técnico exacto dentro del metal, es la siguiente:



Figura 19. 1.8.3.2 Aceros inoxidables AISI 304L

Tabla 8. Composición química y función de elementos

Elemento	Símbolo	Porcentaje (%)	Función principal en Aleación
Cromo	Cr	18.00% – 20.00%	Genera la capa pasiva contra el óxido
Níquel	Ni	8.00% – 12.00%	Aumenta la ductilidad y la resistencia al impacto
Carbono	C	≤ 0.030 Máximo	Evita la corrosión intergranular en soldaduras
Manganeso	M	≤ 2.00 Máximo	Desoxida el metal y mejora la forjabilidad
Silicio	Si	≤ 0.75 Máximo	Mejora la fluides del metal fundido y la y la resistencia al calor
Nitrógeno	N	≤ 0.10 Máximo	Compensa la perdida de dureza causada por el bajo carbono
Fosforo	P	≤ 0.045 Máximo	Elemento residual controlado (puede fragilizar el acero)
Azufre	S	≤ 0.030 Máximo	Elemento residual controlado (afecta la soldabilidad)
Hierro	Fe	Balance (~70%)	Elemento base de la aleación

Propiedades Mecánicas

Debido a su menor contenido de carbono, sus propiedades de resistencia mecánica son sutilmente inferiores a las del 304 estándar:

2 Resistencia a la tracción: ≥ 485 Mpa (70 Ksi)
3 Limite elástico (0.2%): ≥ 170 Mpa (25Ksi)
4 Elongación en 2 pulgadas: ≥ 40% altamente dúctil
5 Dureza Brinell: ≤ 201 HBW

Aplicaciones comunes

Se prefiere en industrias donde se realizan soldaduras pesadas y se manejan fluidos corrosivos, tales como:

- Industria Química y Petroquímica:
  Tanques, tuberías, e intercambiadores de calor

- Procesamiento de Alimentos y Lácteos:
  Maquinaria de ordeño, tanques de mezcla y fermentadores

- Industria Farmacéutica:
  Equipos de producción limpia que requieren esterilización constante

- Arquitectura y Construcción:
  Estructuras expuestas a la intemperie o soldadas en ambientes marinos moderados



Figura 20. 1.8.3.2 Aceros inoxidables AISI 304L

1.8.3.3 Acero Inoxidable AISI 316L

El AISI 316L es un acero inoxidable austenítico de ultra bajo carbono que se conoce popularmente como “acero de grado marino”. Es una evolución del acero AISI 304L, al cual se le añade Molibdeno para proporcionarle una resistencia drásticamente superior contra la corrosión por picaduras y rendijas, especialmente en ambientes cargados de cloruro (Sal, Ácidos y Agua de mar)

Al igual que en el 304L, la “L” significa *Low Carbon* (bajo carbono), lo que evita la precipitación de carburos de cromo durante la soldadura y permite usar el material sin necesidad de tratamiento térmico posterior.

Características

El acero inoxidable AISI 316L, posee características técnicas específicas que lo diferencian de otros aceros comunes. Destaca principalmente por su pureza, resistencia ambiental y comportamiento físico bajo condiciones severas de trabajo.

Composición química

La composición química del acero inoxidable AISI 316L, está regulada por la norma ASTM A240 y se define por los siguientes rangos de porcentaje en peso (%):

Tabla 9. Composición química Típica (Limites y rangos)

Elemento Químico	Símbolo	Porcentaje en peso	Acero AISI 316L (Grado Marino)
Cromo	Cr	16.00 % - 18.00 %	17.20 %
Niquel	Ni	10.00 % - 14.00 %	10.50 %
Molibdeno	Mo	2.00 % - 3.00 %	2.10 %
Carbono	C	≤ 0.03 % (Máximo)	0.022 %
Manganeso	Mn	≤ 2.00 % (Máximo)	0.45 %
Silicio	Si	≤ 0.75 % (Máximo)	0.45 %
Nitrógeno	N	≤ 0.10 % (Máximo)	~0.045 %
Fosforo	P	≤ 0.045 %(Máximo)	~0.028 %
Azufre	S	≤ 0.030 %(Máximo)	~0.012 %
Hierro	Fe	Balance (Aproximadamente 65%)	Balance (~67.8 %)

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del electrodo 316L se define como un sistema de amortiguación plástica de alta tolerancia al desalineamiento mecánico y a las restricciones de fijación rígida.

Tabla 10. Propiedades mecánicas: metal base vs electrodo 316L

Componente Mecánico	Metal base (Plancha/Tubo AISI 316L)	Electrodo Soldado (Cordón AWS E316 /3016L
Resistencia a la Tracción (Ruptura)	≥ 485 Mpa (70 Ksi)4	≥ 490 Mpa (70 Ksi)
Limite Elástico	≥ 170 Mpa (25 Ksi)	~380 – 420 Mpa (55 – 61 Ksi)
Elongación Mínima (Ductilidad)	≥ 40 %	≥ 30 %
Dureza Máxima (Típica)	≤ 217 HBW (95 HRB)	~160 – 190 HBW (85 – 90 HRB)
Comportamiento en Mantenimiento	Fusible elástico: Cede y se deforma visualmente ante sobrecargas antes de romperse	Anclaje rígido: Al enfriarse rápido duplica el limite elástico para que la junta no se estire.



Figura 21. 1.8.3.3 Acero Inoxidable AISI 316L

Aplicaciones

Resistencia a la corrosión localizada

- **Acción del molibdeno:**
  Contiene entre un 2% y 3% de molibdeno, lo que detiene la perforación por picaduras en ambientes con cloro.

- **Ambiente marino:**
  Tolera la exposición directa a la niebla salina, agua de mar y salmueras industriales sin oxidarse.

- **Resistencia Química:**
  Soporta el ataque de soluciones acidas como el acido sulfúrico diluido, fosfórico, acético y cítrico.

Referencia

Este tipo de acero inoxidable AISI 316 es el más utilizado para evitar la corrosión marina y ácidos

Comportamiento en soldadura y estructura

- Inmunidad térmica:
  Su nivel de carbono inferior a 0.03% (0.022 %) evita la precipitación de carburos de cromo durante el arco eléctrico.

- **Sin tratamiento Post-Soldadura:**
  Las uniones soldadas mantienen la resistencia a la corrosión intergranular sin requerir recocido posterior.

- **Fase austenítica:**
  Su microestructura interna le otorga una alta tenacidad que impide fracturas frágiles ante impactos.

Propiedades físicas y magnéticas.

- **Cero Magnetismo:**
  Es un material completamente amagnético (no se le pegan los imanes).

- **Efecto por Trabajo en Frio:**
  Puede desarrollar un magnetismo muy leve únicamente si se somete a un estirado o deformación mecánica severa.

- **Resistencia Criogénica:**
  No se vuelve quebradizo a temperaturas extremadamente bajas (bajo cero), manteniendo su flexibilidad estructural.

Aptitudes sanitarias y acabado superficial.

Superficie inerte:
No contamina ni altera el sabor, olor o composición de los productos químicos o alimentos con los que entra en contacto

- **Alta capacidad de pulido:**
  Permite acabados espejo o de grado sanitario, los cuales eliminan la porosidad e impiden la proliferación de bacterias.

- **Esterilizabilidad:**
  Soporta siclos continuos de lavado con vapor a alta presión y agentes químicos desinfectantes agresivos.

1.8.3.4 Acero Inoxidable AISI 309

El acero inoxidable AISI 309 es un acero inoxidable austenítico de alta aleación diseñado específicamente para aplicaciones de alta temperatura. Este material otorga una mayor resistencia a la fluencia por calor (creep strength), pudiendo soportar esfuerzos mecánicos continuos en entornos térmicos extremos.

Tabla 11. Composición química nominal (ASTM A240)

Elemento Químico	Símbolo	Porcentaje en peso (%)	Función Principal en la Aleación
Cromo	Cr	22.00 % - 24.00 %	Proporciona una excepcional resistencia a la oxidación por gases calientes
Níquel	Ni	12.00 % - 15.00	Mantiene la estructura austenítica, aportando ductilidad y resistencia al choque térmico
Carbono	C	≤ 0.20 % (Típico 0.08 %)	Aumenta la resistencia mecánica a altas temperatura (evita que el metal se ablande)
Manganeso	Mn	≤ 2.00 %	Desoxidador y estabilizador estructural
Silicio	Si	≤ 0.75 %	Mejora la resistencia a la descamación a altas temperaturas
Fosforo	P	≤ 0.045 %	Impureza residual controlada
Azufre	S	≤ 0.030 %	Impureza residual controlada
Hierro	Fe	Balance (~60%)	Matriz base de la aleación

Propiedades mecánicas

- **Resistencia a la tracción:** ≥ 550 Mpa (80 Ksi)
  Mayor fuerza de ruptura que las series 304/316

- **Limite Elástico (0.2 %):** ≥ 205 Mpa (30 Ksi)
  Mayor rigidez inicial.

- **Elongación en "2" (50 mm**): ≥ 40%
  Conserva una excelente ductilidad

- **Dureza máxima:** ≤ 217 HBW (Brinell) o 95 HRB (Rockwell B)

Aplicaciones comunes en planta

- Revestimientos y puertas de hornos industriales
- Componentes de quemadores de petróleo o gas y boquillas térmicas
- Soportes de tubos en calderas de vapor e intercambiadores de calor
- Cajas de cementación y bandejas de tratamiento térmico
- Partes internas de gasificadores de carbón y sistemas de escape de gases

Gran diferencia

- **AISI 309 estándar:**
  se especifica cuando el activo operará a temperaturas superiores a los 500 ºC y requiere soporte estructural mecánico
  (resistencia por estiramiento por calor o creep)

- **AISI 309L:**
  Su bajo carbono reduce el riesgo de corrosión, pero lo vuelve mas blando en caliente. Por esta razón, el 309L casi nunca se usa como plancha estructural para hornos; su uso esta estrictamente reservado como electrodo/metal de aporte para unir aceros inoxidables con aceros al carbono (juntas disimiles)

- **Usa planchas de AISI 309 (estándar):**
  Si vas a fabricar un componente estructural que va dentro del horno o calderas (puertas deflectoras, ganchos de refractarios) donde el metal deba soportar su propio peso o cargas mecánicas a más de 800 ºC.

- **Usa consumibles de AISI 309L:**
  Exclusivamente como electrodo o varilla de soldadura para hacer la unión entre un acero al carbono y un acero inoxidable. Su bajo carbono es para que la soldadura no se agriete al enfriarse, no para soportar calor extremo como elemento estructural.



Figura 22. 1.8.3.4 Aporte ER-309L

1.8.3.5 Acero Inoxidable AISI 309L

El acero inoxidable AISI 309L (AWS ER 309L) es una aleación austenítica de alta resistencia térmica y química que contiene un elevado porcentaje de cromo (22 % – 24 %) y níquel (12 % - 15%), con un contenido de carbono ultra bajo (≤ 0.030 %)

Composición Química

La composición química del metal AISI 309L se define bajo especificaciones metalúrgicas estrictas. La letra “L” (Low Carbon) restringe el carbono a un máximo de 0.030% para mitigar la precipitación de carburos de cromo y asegurar una excelente resistencia a la corrosión intergranular tras procesos de soldadura.

Tabla 12. Composición Química Típica (%) del Acero Inoxidable AISI 309L

Elemento Químico	Símbolo	Porcentaje en peso	Acero AISI 309L
Cromo	Cr	22.00 % - 24.00 %	23.50 %
Niquel	Ni	12.00 % - 15.00 %	13.20 %
Molibdeno	Mo	≤ 0.75 % (Máximo)	0.15 %
Carbono	C	≤ 0.03 % (Máximo)	0.018 %
Manganeso	Mn	≤ 2.00 % (Máximo)	1.75 %
Silicio	Si	≤ 0.75 % (Máximo)	0.42 %
Nitrógeno	N	≤ 0.10 % (Máximo)	~0.045 %
Fosforo	P	≤ 0.045 %(Máximo)	~0.014 %
Azufre	S	≤ 0.030 %(Máximo)	~0.008 %
Hierro	Fe	Resto de la aleación	Balance (~60.65%)

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la Tracción: 540 – 430 Mpa
(Alta fuerza de ruptura)

Limite Elástico (0.2 %): 390 – 430 Mpa
(Alta rigidez inicial debido al refinamiento de grano tras el enfriamiento del arco)

Elongación Mínima: 30% - 35 %
(Excelente ductilidad para absorber vibraciones mecánicas y choques térmicos)

Estructura Interna:

Matriz austenítica con un numero de ferrita (FN) típico de 4 a 9, lo que erradica por completo la fisuración en caliente durante el soldeo.

El **AISI 309 L,** es un consumible de soldadura de sobre aleación austenítica diseñado específicamente para la unión disímil y el revestimiento protector (*Clanding*). Su función principal en el mantenimiento preventivo y correctivo es actuar como una “Zona de amortiguación” metalúrgica. Evita la fisuración por fragilidad cuando se unen componentes de acero al carbono o de baja aleación con aceros inoxidables de la serie 300 (Como el 304L o 316L).

Mitigación de la dilución de Carbono (C):

Al sopletear o soldar un acero inoxidable sobre un acero al carbono común, el carbono migra hacia la soldadura. Si se usara un electrodo (como el 308L), el cordón se volvería quebradizo y fallaría por vibración. El exceso de cromo y níquel del 309L absorbe este carbono diluido, manteniendo la junta elástica y dúctil.

Contro del número de Ferrita (FN):

Solidifica deliberadamente con un porcentaje de ferrita residual (Típicamente entre 4 y 9 FN). Esto es seguro contra el agrietamiento en caliente durante las reparaciones rápidas en campo. Donde las tensiones mecánicas del equipo son elevadas.

Barrera contra la Fatiga Térmica (Hasta 1.000 ºC):

Absorbe las tensiones por expansión diferencial. Cuando un equipo se calienta y se enfría continuamente (Choque térmico), los metales distintos se estiran a ritmos diferentes. El 309 L disipa este esfuerzo en la interfaz, evitando que las soldaduras de reparación se desprenden o se fracturen.

Aplicación de reparación con soldadura

Referencia

Este tipo de acero inoxidable AISI 309 es el más costoso debido a su grado refractario para ser utilizado en equipos como hornos, intercambiadores de calor y componentes de altas temperaturas llegando a soportar 1.000 ºC debido a su mayor volumen de Níquel.

1.8.4 Aceros Aliados

Los aceros aleados contienen porcentajes superiores de elementos como Cromo, Niquel, Molibdeno, Manganeso, Vanadio y Tungsteno, con el propósito de mejorar propiedades específicas como:

- Resistencia mecánica
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a altas temperaturas
- Resistencia a la corrosión
- Tenacidad



Figura 23. 1.8.4 Aceros Aliados

Estos materiales son utilizados principalmente en la fabricación de herramientas, recipientes a presión, turbinas, calderas y equipos sometidos a condiciones severas de operación.

1.8.5 Clasificación según cantidad de carbono (C)

Otra forma ampliamente utilizada para clasificar los aceros corresponde al porcentaje de carbono presente en la aleación.

Tabla 13: Clasificación de los Aceros según el contenido de Carbono

Tipo de acero	Contenido de Carbono (%)	Características principales
Ac Alto en Carbono	0,60 – 1,00	Elevada dureza y resistencia al desgaste; soldabilidad limitada
Ac Medio en Carbono	0, 30 – 0,60	Mayor resistencia mecánica y dureza; soldabilidad moderada
Ac Bajo en Carbono	0.05 – 0.30	Excelente soldabilidad, alta ductilidad y facilidad de conformado

El acero ASTM A36 pertenece al grupo de los aceros de bajo carbono, lo que favorece su utilización en procesos de soldadura debido a su menor susceptibilidad a la formación de estructuras frágiles en la zona afectada por el calor.

1.9 Metalurgia de la soldadura

La metalurgia de la soldadura estudia los cambios físicos, químicos y metalúrgicos que ocurren durante el proceso de unión de materiales. Estos cambios determinan la microestructura del metal soldado y las propiedades finales de la unión, como su resistencia, ductilidad y tenacidad.

En las soldaduras disímiles, como la unión entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando material de aporte ER 309 L, la metalurgia es fundamental debido a las diferencias en la composición química y el comportamiento térmico de los materiales. Comprender estos fenómenos permite seleccionar adecuadamente el material de aporte, controlar los parámetros de soldadura y obtener uniones de alta calidad.

1.9.1 Metalurgia de la unión soldada

Una unión soldada no está constituida por un material homogéneo, sino por distintas regiones que presentan características metalúrgicas especificas debido al efecto de calor del proceso de soldadura. Cada una de estas regiones posee una microestructura y propiedades mecánicas particulares, las cuales determinan el comportamiento global de la unión.

1.9.2 Metal de soldadura

En el material fundido que resulta de la mezcla entre el metal de aporte y una parte del metal base. En este proyecto corresponde al metal depositado mediante el alambre ER 306 L. su composición química final depende del grado de dilución entre ambos materiales base y del material de aporte utilizado.

1.9.3 Zona de fusión

Corresponde a la región donde el metal base alcanza la temperatura de fusión y se mezcla con el material de aporte. En esta zona ocurre la transición entre el metal base y el metal depositado, siendo un área critica debido a la presencia de gradientes de composición química y temperatura.

1.9.4 Zona afectada por el calor (ZAC)

Es la región del metal base que no llega a fundirse, pero cuya microestructura y propiedades son modificadas por el calor generado durante el proceso de soldadura. Dependiendo del ciclo térmico, esta zona puede experimentar crecimiento del grano, recristalización o transformaciones de fase:

1.9.5 Metal base

Corresponde al material original que no experimenta cambios metalúrgicos significativos y conserva sus propiedades iniciales.

En una soldadura disímil, estas regiones presentan características diferentes debido a las propiedades particulares de cada material. La correcta interacción entre ellas es fundamental para obtener una unión resistente y libre de defectos.

1.9.6 Ciclo térmico de la soldadura

El ciclo térmico representa la variación de temperatura que experimenta un punto del material durante el proceso de soldadura. Este ciclo comienza cuando el material recibe calor del arco eléctrico, alcanza una temperatura máxima y posteriormente se enfría hasta regresar a la temperatura ambiente.

La forma del ciclo térmico depende de diversos factores, entre ellos:

- Intensidad de corriente
- Voltaje
- Velocidad de avance
- Espesor del material
- Conductibilidad térmica
- Tipo de junta
- Numero de pasadas
- Temperatura inicial del material

Durante el calentamiento se producen cambios microestructurales asociados a la transformación de fases y a la expansión térmica del material. En la etapa de enfriamiento se generan nuevas estructuras metalúrgicas cuya naturaleza dependerá de la velocidad de enfriamiento.

En soldaduras disimiles, el ciclo térmico presenta un comportamiento diferente en cada material base debido a las diferencias de conductibilidad térmica y coeficiente de expansión. El acero al carbono disipa el calor de manera distinta del acero inoxidable, lo que influye en el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC) y en la distribución de las tensiones residuales.

El control del ciclo térmico es esencial para minimizar defectos, evitar deformaciones excesivas y asegurar una adecuada calidad metalúrgica de la unión soldada.

1.9.7 Solidificación del metal de soldadura

Una vez finalizada la aplicación del calor, el metal fundido comienza a solidificarse desde los bordes de la junta hacia el centro del cordón. Este proceso determina la microestructura final del metal depositado y, por lo tanto, sus propiedades mecánicas.

La solidificación ocurre mediante la formación y crecimiento de cristales conocidos como dendritas. La orientación y tamaño de estas estructuras depende de la velocidad de enfriamiento y del gradiente térmico existente durante la solidificación.

En el caso del material de aporte ER 309 L, la composición química esta diseñada para favorecer la formación de una microestructura predominantemente austenítica con una pequeña proporción de ferrita delta. Esta combinación mejora la resistencia a la fisuración en caliente y proporciona una adecuada estabilidad durante la solidificación.

Si el proceso de solidificación no es controlado adecuadamente, pueden originarse defectos tales como segregación química, porosidad, inclusiones o grietas de solidificación, los cuales afectan negativamente la calidad de la unión soldada.

1.9.8 Transformaciones metalúrgicas

Las trasformaciones metalúrgicas corresponden a los cambios que experimenta la estructura interna del material debido a las variaciones de temperatura durante el ciclo de soldadura.

En el acero ASTM A36, el calentamiento puede producir la transformación de ferrita y perlita en austenita. Durante el enfriamiento, esta austenita vuelve a transformarse en ferrita y perlita, aunque la velocidad de enfriamiento puede modificar el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del material.

En los aceros inoxidables austeníticos, como el AISI 304, la temperatura permanece mayoritariamente austenítica; sin embargo, pueden generarse fenómenos como la precipitación de carburos de cromo cuando el material permanece durante un tiempo prolongado en determinados rangos de temperatura. Esta precipitación puede reducir la resistencia a la corrosión en la zona soldada.

El uso del ER 309 L, contribuye a minimizar estos efectos gracias a su bajo contenido de carbono y a su composición química, diseñada para mantener una microestructura estable durante el proceso de soldadura.

1.9.9 Importancia de la metalurgia en soldaduras disimiles

La metalurgia de la soldadura constituye uno de los aspectos más relevantes en la unión de materiales disimiles, ya que permite comprender la interacción entre los diferentes materiales involucrados en el proceso y prever los posibles problemas asociados a la formación de la unión.

En el presente proyecto, la unión entre un acero ASTM A36 y un acero inoxidable AISI 304 mediante el material de aporte ER 309 L, implica la coexistencia de materiales con propiedades físicas, químicas y metalúrgicas diferentes. Estas diferencias pueden afectar la distribución de calor, la dilución, la solidificación del metal de soldadura y el desarrollo de tensiones residuales.

El empleo del ER 309 L, favorece la compatibilidad metalúrgica entre ambos materiales, contribuyendo a reducir la susceptibilidad a la fisuración y mejorando la estabilidad de la unión. No obstante, la calidad final dependerá también del adecuado control del ciclo térmico, de la selección de los parámetros de soldadura y del cumplimiento de procedimientos establecidos conforme a normas internacionales.

El estudio de la metalurgia de la soldadura proporciona el fundamento técnico para interpretar los resultados obtenidos durante la evaluación experimental y constituye la base para analizar, en los apartados siguientes, fenómeno como la dilución, la zona afectada por el calor (ZAC) y los mecanismos de formación de discontinuidades en soldaduras disimiles.

CAPITULO II: MARCO TEORICO
DILUCION EN SOLDADURAS DISIMILES

2.0 Dilución en soldaduras Disimiles

2.0.1 Introducción

La dilución es uno de los fenómenos metalúrgicos más relevantes durante el proceso de soldadura, especialmente en la unión de materiales disimiles. Corresponde a la mezcla parcial entre el metal base y el metal de aporte durante la fusión, modificando la composición química y las propiedades del metal depositado.

En las soldaduras disimiles, la dilución adquiere mayor importancia debido a que los materiales base presentan composiciones químicas y propiedades metalúrgicas diferentes. Como consecuencia, el porcentaje de metal fundido proveniente de cada material influye directamente en la microestructura, resistencia mecánica y comportamiento frente a la corrosión de la unión soldada.

En este proyecto, donde se estudia la calidad de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando material de aporte ER 309 L, el control de la dilución resulta fundamental para obtener un cordón de soldadura con propiedades mecánicas adecuadas y una buena estabilidad metalúrgica.

2.0.2 Definición de dilución

La dilución puede definirse como el porcentaje de metal base que se incorpora al metal de soldadura durante el proceso de fusión. En otras palabras, representa la proporción de material base que se mezcla con el material de aporte para formar el cordón de soldadura.

Este fenómeno ocurre de manera natural en todos los procesos de soldadura por fusión, aunque su magnitud depende del procedimiento empleado y de los parámetros de operación.

Matemáticamente, la dilución puede expresarse como:

$$\text{Dilución (\%)} = \frac{\text{Área fundida del material base}}{\text{Área total del cordón de soldadura soldadura}} \times 100 =$$

Esta relación permite estimar el grado de participación del metal base en la composición final del cordón.

2.0.3 Factores que influyen en la dilución.

El porcentaje de dilución depende de diversos factores asociados al proceso de soldadura.

Entre los más importantes se encuentran:

- Intensidad de corriente : Una mayor corriente incrementa la penetración del cordón y favorece la fusión del metal base, aumentando la dilución.

- Voltaje : El voltaje modifica la geometría del arco eléctrico y la forma del cordón. Valores elevados pueden incrementar el ancho del cordón y alterar el porcentaje de dilución.

- Velocidad de avance : Una velocidad de avance baja aumenta el tiempo de exposición al calor, favoreciendo una mayor penetración y, por lo tanto, una mayor dilución. Por el contrario, velocidades más altas tienden a reducirla.

- Aporte térmico : El aporte técnico representa la energía introducida durante la soldadura. Cuanto mayor sea el calor aportado, mayor será la cantidad de metal base fundido y, en consecuencia, el porcentaje de dilución.

- Tipo de junta : La geometría de una junta influye en el volumen de material fundido y en la penetración alcanzada durante la soldadura

- Posición de soldadura : La posición de trabajo puede modificar el comportamiento del baño de fusión y afectar la mezcla entre el metal base y el metal de aporte.

2.0.4 Dilución en soldaduras disimiles ASTM A36 – AISI 304

En la entre un acero al carbono ASTM M·6 y un acero inoxidable AISI 304, la dilución adquiere una importancia especial debido a la diferencia en la composición química de ambos materiales.

El acero ASTM A36 contiene principalmente hierro y pequeñas cantidades de carbono y manganeso, mientras que el AISI 304 posee elevados contenidos de cromo y níquel, responsables de su resistencia a la corrosión.

Durante la soldadura, parte de ambos materiales se funde y se mezcla con el material de aporte ER 309 L. como resultado, la composición química final del cordón depende del porcentaje de participación de cada uno de estos materiales.

Si la dilución es excesiva, el contenido de cromo y níquel en el cordón puede disminuir, afectando la resistencia a la corrosión y la estabilidad metalúrgica de la unión.

2.0.5 Influencia del material de aporte ER 309 L

El material de aporte ER 309 L ha sido desarrollado específicamente para la unión de aceros disimiles debido a su contenido de cromo y níquel, elementos que compensan la dilución producida por el acero al carbono.

Su bajo contenido de carbono reduce el riesgo de precipitación de carburos de cromo y disminuye la posibilidad de sensibilización del acero inoxidable durante el proceso de soldadura.

Además, la presencia de ferrita delta en pequeñas proporciones mejora la resistencia a la fisuración en caliente, aumentando la confiabilidad de la unión soldada.

Gracias a estas características, el ER 309 L, constituye uno de los materiales de aporte más utilizados en la unión entre aceros al carbono y aceros inoxidables.

2.0.6 Consecuencias de una dilución excesiva

Cuando el porcentaje de dilución supera los valores recomendados, pueden presentarse diversos problemas metalúrgicos, entre ellos:

- Disminución del contenido de cromo y níquel en el cordón
- Reducción de la resistencia a la corrosión
- Variación de la microestructura del metal de soldadura
- Formación de fases no deseadas
- Disminución de la resistencia mecánica
- Mayor susceptibilidad a la fisuración
- Cambios en la dureza del cordón

Estos efectos pueden comprometer el desempeño de la unión, especialmente en equipos sometidos a ambientes corrosivos o cargas mecánicas elevadas

2.0.7 Métodos para controlar la dilución

El control de la dilución constituye una práctica fundamental para garantizar la calidad de las soldaduras disimiles. Entre las principales medidas utilizadas se encuentran:

- Selección adecuada del material de aporte
- Control de aporte térmico
- Ajuste de la corriente y el voltaje
- Control de la velocidad de avance
- Diseño apropiado de la junta
- Preparación adecuada de los bordes
- Aplicación de procedimientos de soldadura calificados (WPS)
- Capacitación del soldador y cumplimiento de las especificaciones del procedimiento

La correcta aplicación de estas medidas permite obtener una composición química estable en el cordón de soldadura y minimizar la aparición de discontinuidades.

2.0.8 Importancia de la dilución en el presente proyecto

En el desarrollo de este proyecto, la dilución representa una variable critica para evaluar la calidad de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando material de aporte ER 309 L.

El análisis de este fenómeno permitirá interpretar los resultados obtenidos durante las inspecciones y ensayos realizados a las probetas soldadas, relacionando la composición del cordón con las propiedades mecánicas y metalúrgicas observadas.

Asimismo, el control de la dilución contribuirá a establecer recomendaciones sobre los parámetros de soldadura más adecuados para obtener uniones confiables en aplicaciones de mantenimiento industrial.

2.1 Defectología de la soldadura

2.1.1 Introducción

La calidad de una unión soldada depende de diversos factores, entre ellos la correcta selección del procedimiento de soldadura, el material de aporte los parámetros de operación y la habilidad del soldador. Cuando alguno de estos factores no es controlado adecuadamente, pueden originarse discontinuidades o defectos que afectan el comportamiento mecánico y la confiabilidad del componente.

En ingeniería de la soldadura es importante distinguir entre una discontinuidad y un defecto. Una discontinuidad es cualquier interrupción o variación en la continuidad del material, mientras que un defecto corresponde a una discontinuidad cuyo tamaño, ubicación o características exceden los límites establecidos por las normas aplicables, comprometiendo la integridad de la unión soldada.

La identificación de estas discontinuidades adquiere especial importancia debido a las diferencias metalúrgicas entre ambos materiales, las cuales pueden favorecer la aparición de determinadas imperfecciones si no se controlan adecuadamente los parámetros del proceso.

2.1.2 Clasificación de las discontinuidades

Las discontinuidades presentes en una soldadura pueden clasificarse de acuerdo con su ubicación y origen.

Discontinuidades superficiales

Son aquellas que se encuentren en la superficie del cordón de soldadura y pueden detectarse mediante inspección visual o en ensayos no destructivos superficiales, como líquidos penetrantes o partículas magnéticas.

Entre las más comunes se encuentran:

- Socavado
- Exceso de refuerzo
- Salpicaduras
- Grietas superficiales
- Cráter final

Discontinuidades internas

Se localiza en el interior de la unión soldada y requieren de un método de inspección como ultrasonido o radiografía industrial para su detección.

Entre ellas destacan: ´

- Porosidad interna
- Inclusiones de escoria
- Falta de penetración
- Falta de fusión
- Grietas internas

La correcta identificación de estas discontinuidades es esencial para determinar si una unión soldada cumpla con los criterios de aceptación establecidos en normas como AWS D1.1 o ASME Sección IX.

2.1.3 Porosidad

La porosidad consiste en la presencia de cavidades o vacíos originados por gases atrapados durante la solidificación del metal de soldadura. En una de las discontinuidades más frecuentes en los procesos de soldadura por arco.

Principales causas

- Contaminación de la superficie
- Humedad en el material de aporte
- Protección insuficiente del gas
- Corrientes de aire
- Parámetros de soldaduras inadecuados

Consecuencias

- Disminución de la resistencia mecánica
- Reducción de la resistencia a la fatiga.
- Posible disminución de la resistencia a la corrosión
- Concentración de esfuerzos

Prevención

- Limpiar adecuadamente las superficies
- Verificar el caudal del gas protector
- Utilizar materiales secos
- Ajustar correctamente los parámetros de soldadura

2.1.4 Falta de fusión

La falta de fusión ocurre cuando el metal de aporte no logra fundirse completamente con el metal base o con un cordón previamente depositado.

Esta discontinuidad reduce el área afectiva de unión y constituye uno de los defectos más críticos desde el punto de vista estructural.

Causas

- Bajo aporte térmico
- Corriente insuficiente
- Angulo incorrecto de la antorcha
- Velocidad de avance excesiva
- Preparación inadecuada de la junta

Consecuencias

- Disminución significativa de la resistencia
- Inicio de grietas
- Falla prematura bajo carga

2.1.5 Falta de penetración

La falta de penetración corresponde a una fusión incompleta en la raíz de la junta, dejando una separación sin soldar entre los materiales base.

Esta discontinuidad es especialmente critica en uniones sometidas a esfuerzos de tracción o fatiga.

Causas

- Baja corriente
- Separación insuficiente entre placas
- Preparación incorrecta del bisel
- Velocidad elevada

Prevención

- Diseñar correctamente la junta
- Seleccionar los parámetros adecuados
- Controlar el procedimiento de soldadura

2.1.6 Inclusiones

Las inclusiones corresponden a materiales solidos atrapados dentro del cordón de soldadura durante el proceso de solidificación.

Dependiendo del proceso de soldadura, pueden corresponder a:

- Escoria
- Óxidos
- Partículas metálicas

Aunque el proceso GMAW genera menos inclusiones que procesos con electrodo revestido, estas pueden aparecer debido a contaminación o una técnica de soldadura inadecuada.

2.1.7 Grietas

Las grietas constituyen una de las discontinuidades mas graves, ya que representan una separación del material que puede propagarse durante el servicio y provocar la falla del componente

Se clasifican en:

Grietas calientes

Se forman durante la solidificación del metal fundido debido a tensiones internas y segregación de elementos de aleación.

Grietas en frio

Aparecen después del enfriamiento y pueden estar asociadas a tensiones residuales, presencia de hidrogeno y microestructuras frágiles.

En soldaduras disimiles, el control de la composición química mediante el uso de ER 309 L, ayuda a disminuir el riesgo de fisuración en caliente.

2.1.8 Socavado

El socavado es una ranura formada e n el borde del cordón de soldadura debido a la fusión excesiva del metal base sin un adecuado relleno por parte del material de aporte.

Causas

- Corriente excesiva
- Velocidad elevada
- Técnica incorrecta
- Angulo inadecuado de la antorcha

Consecuencias

- Concentración de esfuerzos
- Disminución de la sección resistente
- Posible inicio de grietas por fatiga

2.1.9 Salpicaduras

Las salpicaduras corresponden a pequeñas partículas de metal fundido expulsadas fuera del baño de soldadura

Aunque generalmente no afectan la resistencia mecánica, deterioran el acabado superficial y aumenta los tiempos de limpieza y preparación para inspecciones posteriores.

Las principales causas son.

- Voltaje inadecuado
- Mala transferencia metálica
- Gas protector insuficiente
- Longitud de arco incorrecta

2.1.10 Importancia del control de defectos en soldaduras disimiles

La unión entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 utilizando ER 309 L, el control de las discontinuidades resulta fundamental debido a las diferencias en composición química, conductividad térmica y coeficiente de expansión de los materiales

La presencia de defectos puede afectar tanto la resistencia mecánica como la resistencia a la corrosión de la unión, comprometiendo su desempeño en servicio. Por esta razón, es indispensable aplicar procedimientos de soldadura calificados, controlar los parámetros del proceso y realizar inspecciones conforme a las normas vigentes.

La evaluación de las discontinuidades mediante ensayos no destructivos permitirá verificar que las uniones obtenidas cumplan con los criterios de aceptación establecidos por normas como AWS D1.1, garantizando la calidad y confiabilidad de las soldaduras analizadas en este proyecto.

2.2 Ensayos destructivos y no destructivos

Los ensayos destructivos y no destructivos son métodos utilizados para evaluar la calidad de una unión soldada y verificar que cumpla con los requisitos establecidos por las normas técnicas. Su aplicación permite detectar discontinuidades, evaluar el comportamiento mecánico de la soldadura y asegurar la confiabilidad de los componentes

Los ensayos destructivos (ED) requieren la deformación o fractura de una probeta para determinar sus propiedades mecánicas, mientras que los ensayos no destructivos (END) permiten inspeccionar la soldadura sin afectar su funcionamiento.

En este proyecto, estos métodos serán utilizados para evaluar la calidad de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 realizadas mediante el proceso GMAW con material de aporte ER 309 L.

2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

Los ensayos destructivos permiten determinar las propiedades mecánicas de una unión soldada mediante la aplicación de cargas que producen su deformación o fractura. Estos ensayos son utilizados para calificar procedimientos de soldadura y verificar la resistencia del material.

Los principales ensayos destructivos son:

- Ensayo de tracción

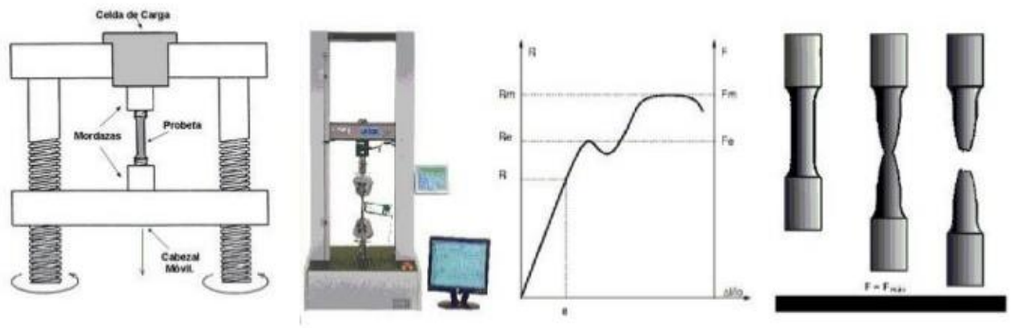


Figura 24. 2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

- Ensayo de doblado

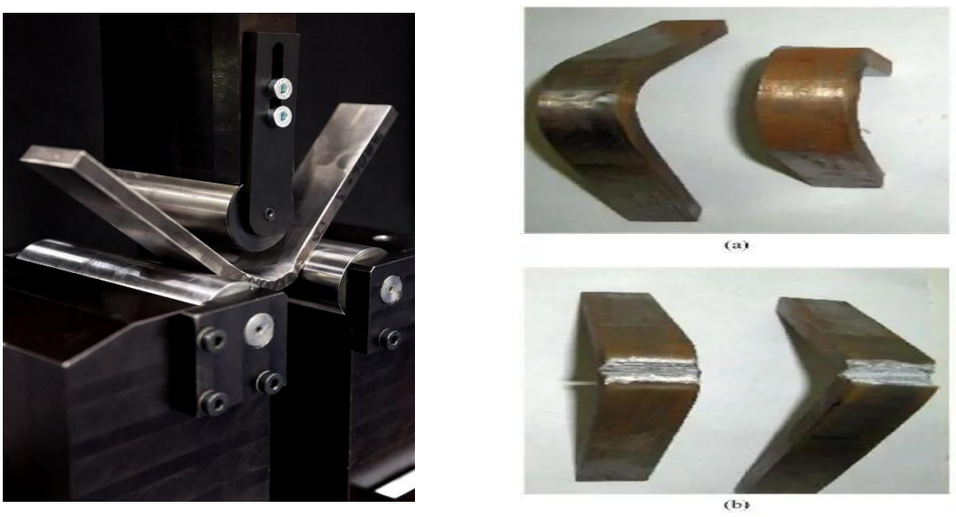


Figura 25. 2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

- Ensayo de impacto. Charpy

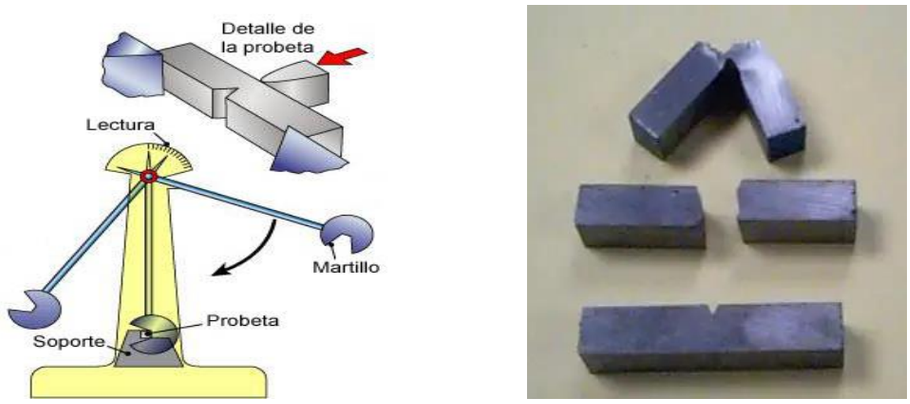


Figura 26. 2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

- Ensayo de dureza

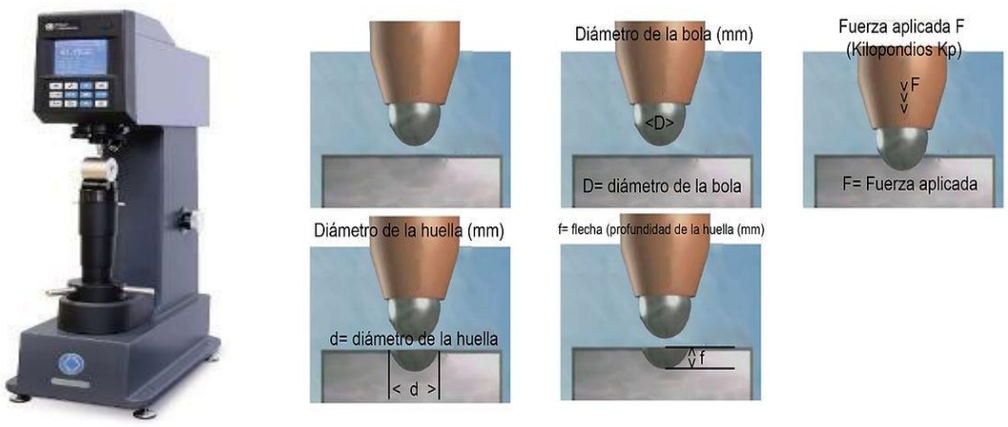


Figura 27. 2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

- Examen macrográfico

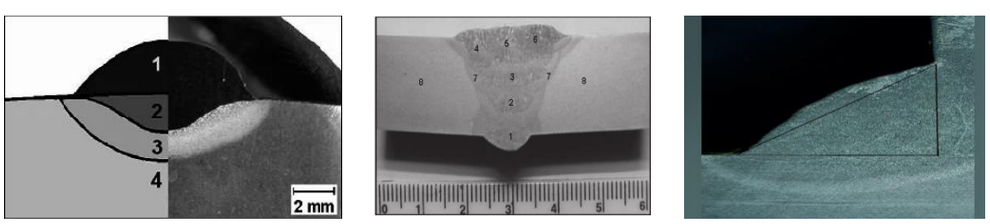


Figura 28. 2.2.1 Ensayos destructivos (ED)

Su principal ventaja es que entregan información precisa sobre el comportamiento mecánico de la soldadura; sin embargo, implican la destrucción de la probeta ensayada.

2.2.2 Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos permiten detectar discontinuidades superficiales e internas sin dañar el componente inspeccionado. Son ampliamente utilizados en la fabricación, mantenimiento y control de calidad de estructuras soldadas.

Los métodos más utilizados son:

- Inspección visual (VT)

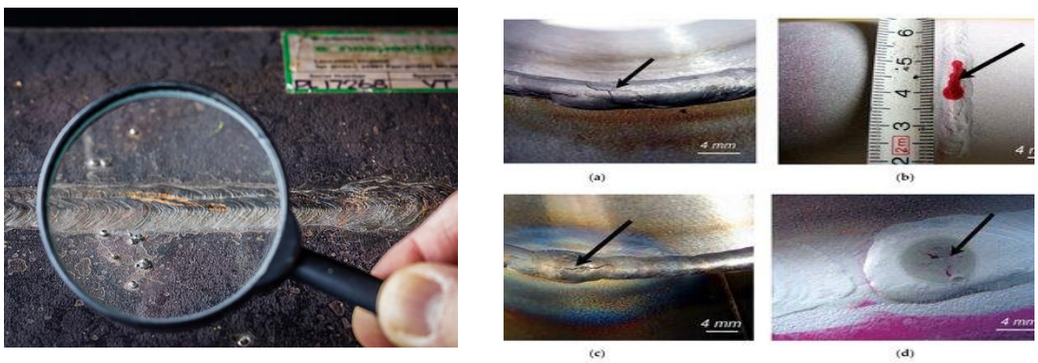


Figura 29. 2.2.2 Ensayos no destructivos (END)

- Líquidos penetrantes (PT)



Figura 30. 2.2.2 Ensayos no destructivos (END)

- Partículas magnéticas (MT)



Figura 31. 2.2.2 Ensayos no destructivos (END)

- Ultrasonido (UT)



Figura 32.2.2.2 Ultrasonido (UT)

- Radiografía industrial (RT)



Figura 33. 2.2.2 Ensayos no destructivos (END)

La elección del método dependerá del tipo de material, la geometría de la unión y las discontinuidades que se desea detectar.

2.2.3 Ensayos aplicados en el proyecto

En el presente estudio, la evaluación de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304 **se realizará principalmente mediante Ensayos No Destructivos**, comenzando con la inspección visual y, de acuerdo con la disponibilidad de equipos, complementándose con líquidos penetrantes, ultrasonido o radiografía.

Los resultados obtenidos serán comparados con los criterios de aceptación establecidos en la Norma AWS D1.1, con el fin de determinar la calidad de las uniones soldadas y verificar la influencia del material de aporte ER 309L en el desempeño de la soldadura.

2.3 Normas y organismos aplicables

Las normas técnicas y organismos constituyen una herramienta fundamental para garantizar la calidad, seguridad y confiabilidad de las uniones soldadas. Estas establecen los requisitos para el diseño, ejecución, inspección, calificación de procedimientos y certificaciones del personal involucrado en los procesos de soldadura.

En el presente proyecto se consideran las normas emitidas por:

- AWS : American Welding Society
- ASME : American Society of Mechanical Engineers
- AISI : American Iron and Steel Institute
- ISO : International Organization for Standardizatión
- INN : Instituto Nacional de Normalización

Las Normas aplicables son:

- AWS D1.1. Código de Soldadura Estructural
- AWS A5.9 Materiales de soporte para aceros inoxidables
- ASME Sección IX. Calificación de procedimientos y soldadores
- ISO 9606. Calificación de Soldadores
- AISI. Clasificación de material inoxidable
- NORMA ISO 9000 – 9001 Gestión de Calidad

La AWS D1.1

Es una norma desarrollada por la American Welding Society (AWS) que establece los requisitos para el diseño, fabricación, inspección y aceptación de estructuras de acero soldadas.

Se utilizará como referencia pala la inspección visual y los criterios de aceptación de las soldaduras disimiles entre acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304.

AWS A5.9 – Especificaciones para materiales de aporte de aceros inoxidables

Esta norma establece la clasificación y los requisitos y mecánico de los electrodos y alambre utilizados en la soldadura de aceros inoxidables.

A su vez, respalda la selección del material de aporte ER 309 L, utilizado para unir el acero ASTM A36 con el acero inoxidable AISI 304.

ASME Sección IX Perteneciente al Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) y la certificación de soldadores.

Servirá como referencia para comprender los requisitos de calificación de procedimientos y asegurar que la soldadura se realice conforme a prácticas reconocidas internacionalmente.

ISO 9606-1 es una norma internacional que establece los requisitos para la calificación de soldadores que realizan soldadura por fusión en aceros. Se considera como referencia para verificar que el personal que ejecuta las soldaduras posea las competencias necesarias para obtener uniones de calidad.

AISI (**La American Iron and Steel Institute)** es la institución encargada de estandarizar la clasificación y nomenclatura de los aceros y el hierro en América. En el ámbito de la soldadura, su sistema de numeración es estándar universal que ingenieros y soldadores utilizan para identificar con precisión la composición química del metal base que se va unir.

En el caso de los inoxidables, la designación AISI utiliza una serie numérica que identifica el tipo de aleación. Entre los más utilizados se encuentran el AISI 304, 304L, 309 y 316L, cada uno con características específicas de resistencia mecánica, soldabilidad y comportamiento frente a la corrosión.

En el presente proyecto se emplea el acero inoxidable AISI 304 como uno de los materiales base de la unión soldada, debido a su excelente resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y amplio uso en la industria. Asimismo, se utiliza el material de aporte ER 309L, cuya composición química permite obtener una adecuada compatibilidad metalúrgica entre el acero inoxidable AISI 304 y el acero al carbono ASTM A36.

La clasificación AISI facilita la correcta identificación de los materiales utilizados en la investigación y asegura que la selección del metal base sea coherente con las especificaciones técnicas y los objetivos del estudio.

Tabla 14. Resumen de Normas

Norma	¿Qué es?	Aplicación en el proyecto
AWS D1.1	Código para soldadura estructural en acero	Inspección visual y criterios de aceptación de las soldaduras
ASME A5.9	Norma para la clasificación de materiales de aporte para aceros inoxidables	Selección y especificación del alambre ER 309 L
ASME Sección IX	Norma para la calificación de procedimientos de soldadura y soldadores	Referencia para procedimientos y buenas prácticas de soldadura
ISO 9606 -1	Norma internacional para la calificación de soldadores	Garantiza la competencia del soldador que realiza las uniones
Norma ISO 9.000 – 9.001	Establece los requisitos que una identidad debe cumplir para demostrar que controla la calidad de sus procesos, asegurando productos y servicios consistentes	Esta norma garantiza la integración con otras normas (Como ISO 14.001 de medio ambiente o ISO 45.001 de Seguridad)

Tabla 15. Clasificación de los materiales utilizados en el proyecto

Material	Clasificación	Aplicación en el proyecto
ASTM A36	Acero estructural al carbono	Metal base
AISI 304	Acero Inoxidable austenítico	Metal base
ER 309 L	Material de aporte según AWS A5.9	Unión entre ASTM A36 y AISI 304

CAPITULO III: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.0 Problema Industrial

En sectores como la industria, minera y energética, es frecuente la necesidad de unir aceros al carbono con aceros inoxidables. Estas uniones, conocida como soldaduras disimiles, presentan mayores dificultades que las uniones entre materiales similares, debido a diferencias en su composición química, propiedades mecánicas, conductibilidad térmica y coeficiente de expansión térmica. Unas de las combinaciones más utilizadas corresponden a acero ASTM A36 y acero inoxidable AISI 304, empleando el material de aporte ER 309L mediante proceso GMAW.

Aunque este material de aporte ha sido diseñado para este tipo de uniones, la calidad final de la soldadura depende del adecuado control de las variables del proceso, tales como voltaje, intensidad de corriente, velocidad de avance, aporte térmico y protección gaseosa. Cuando estas variables no son controladas correctamente, pueden presentar discontinuidades como falta de fusión, porosidades, inclusiones, grietas o deformaciones, afectando la resistencia mecánica, la integridad estructural y la vida útil del componente soldado.

En consecuencia, resulta necesario evaluar la calidad de este tipo de uniones mediante procedimientos de inspección y ensayos que permiten verificar su conformidad con las normas técnicas aplicables

3.1 Justificación

Las soldaduras disimiles representan una solución ampliamente utilizada en la industria, ya que permiten combinar las ventajas de distintos materiales, optimizando costos y desempeño de equipos. Sin embargo, este tipo de uniones requiere un estricto control del procedimiento de soldadura para evitar defectos que puedan comprometer la seguridad y confiabilidad del servicio.

El presente estudio se justifica porque permitirá evaluar la calidad de una unión disímil entre acero ASTM A36 y acero AISI 304 utilizando material de aporte ER 309L mediante el proceso GMAW, verificando el cumplimiento de los requisitos establecidos por normas técnicas de soldadura e inspección. Desde el punto de vista técnico, la investigación aportara antecedentes sobre el comportamiento metalúrgico de la unión soldada. Y desde el ámbito industrial, los resultados podrán servir como referencia para optimizar procedimientos de soldadura, disminuir la ocurrencia de defectos y contribuir a mejorar la confiabilidad de componentes fabricados mediante este tipo de unión. Asimismo, este trabajo fortalece la formación profesional en ingeniería en mantenimiento industrial, aplicando conocimiento de metalurgia, procesos de soldadura, inspección y control de calidad en una problemática real de la industria.

3.2 Diagrama de Ishikawa

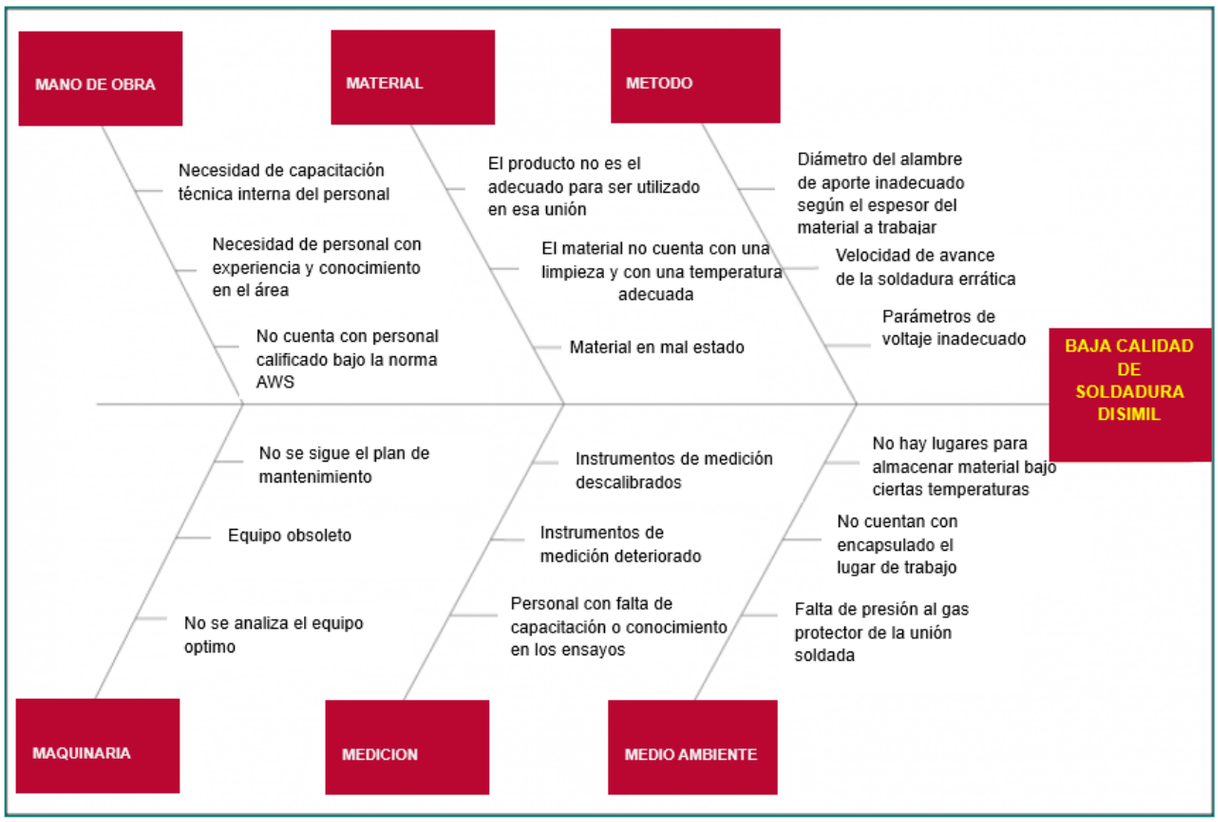


Figura 34. 3.2 Diagrama de Ishikawa

3.3 Análisis Causa - Raíz

El análisis de Causa-Raíz constituye una herramienta fundamental para identificar y determinar los factores que pueden originar fallas o discontinuidades en una unión soldada disímil.

Este análisis considera variables asociadas a:

- Preparación de la junta
- Limpieza de las superficies
- Selección del material de aporte
- Control de los parámetros de soldadura.

Esto permite establecer acciones Correctivas y preventivas orientadas a mejorar la confiabilidad, integridad y vida útil de los componentes soldados. De esta manera, contribuye a reducir la probabilidad de fallas en servicio, optimizando las intervenciones de mantenimiento y fortaleciendo la seguridad y continuidad operacional de los equipos o estructuras.

3.4 Árbol del problema

El árbol del problema sirve para mostrar de manera gráfica, como las causas generan el problema central y, a su vez, que efectos produce.

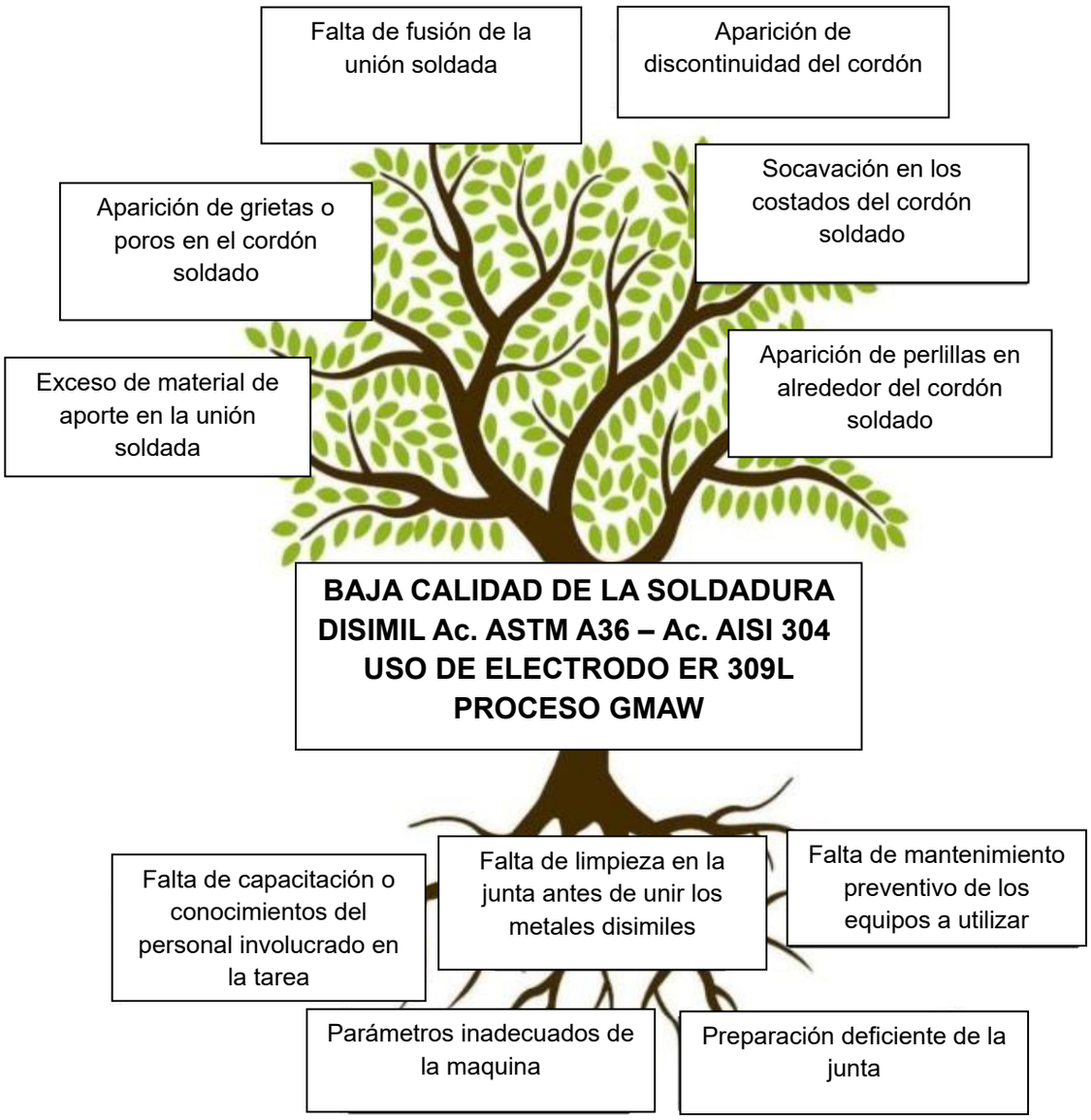


Figura 35. 3.4 Árbol del problema

Parámetros a considerar

Efectos posibles

- Falta de fusión de la unión soldada
- Aparición de discontinuidad del cordón
- Socavación en los costados del cordón soldado
- Aparición de perlillas en alrededor del cordón soldado
- Aparición de grietas o poros en el cordón soldado
- Exceso de material de aporte en la unión soldada

Problema Central

BAJA CALIDAD DE LA SOLDADURA DISIMIL Ac ASTM A36 – Ac AISI 304 USO DE ELECTRODO ER 309L PROCESO GMAW

Causas

- Falta de capacitación o conocimiento del personal involucrado en la tarea
- Parámetros inadecuados de la maquina
- Falta de limpieza en la junta antes de unir los materiales disimiles
- Preparación deficiente de la junta
- Falta de mantenimiento preventivo de los equipos a usar

CAPITULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO

4.0 Marco de la Ingeniería Mantenimiento Industrial

Este capítulo detalla los materiales y equipos empleados, incluyendo el Acero ASTM A36, Acero Inoxidable AISI 304, material de aporte ER 309L, equipo de soldadura GMAW y elementos de seguridad.

Se describe la preparación de probetas, el control de parámetros de la soldadura y los procedimientos de inspección y ensayo, con el objetivo de obtener información técnica que permita evaluar la calidad de la soldadura disímil.

Desde el punto de vista del mantenimiento industrial, esta información respalda la toma de decisiones en cuanto a la confiabilidad, integridad estructural y control de calidad de componentes sometidos a soldadura, favoreciendo la continuidad operacional y la optimización de las actividades de mantenimiento en la industria

4.1 Materiales

- Acero ASTM A36
- Acero AISI 304
- Soldadura ER 309L Ø 1.6
- Gas Ar- CO_2. esta es una mezcla de (98 % Argon – 2 % CO_2)



Figura 36. 4.1 Materiales

4.2 Equipos

Los equipos utilizados en el desarrollo experimental corresponden a los elementos necesarios para ejecutar y controlar el proceso de soldadura GMAW, además de los instrumentos utilizados para verificar las condiciones de las probetas.

- Maquina de Soldar o7Fuete de poder => Lincoln Vantage 575
- Maleta Mig => LN- 25
- Cables de conexión 15 mt
- Pistola
- Regulador de gas
- Mangueras de conexión
- Cilindro de gas => Ar-CO_2
- Mesa de trabajo para soldadura
- Instrumentos de medición



Figura 37. 4.2 Equipos

4.3 Elementos de protección personal

Los elementos de protección personal (EPP) para trabajos en caliente son a ultima barrera de ingeniería frente a riesgos críticos como radiación ultravioleta, proyección de partículas incandescentes, humos metálicos y quemaduras térmicas.

- Elementos de protección personal
  - Careta de soldador
  - Tapones auditivos
  - Antiparras
  - Gorro ignifugo
  - Traje de cuero completo (Casaca – Pantalón)
  - Guantes de Soldador
  - Polainas
  - Botas



Figura 38. 4.3 Elementos de protección personal



Figura 39. 4.3 Elementos de protección personal



REGISTRO DE ENTREGA DE EPP

Empresa: _____

Área: _____ Fecha: ____/____/_____

EPP ENTREGADO

ELEMENTO	MARCA (si aplica)	ESTADO	FIRMA RECEPCIÓN
Casco de seguridad			
Lentes de seguridad			
Guantes de seguridad			
Calzado de seguridad			
Protección auditiva			
Mascarilla de medio rostro			
Ropa de trabajo			
Otros: _____			

RECIBÍ CONFORME LOS ELEMENTOS INDICADOS

Nombre: _____ RUT: _____

Firma: _____

Figura 40. 4.3 Registro de entrega de elementos de protección personal

4.4 CHECK LIST´s

MAQUINA SOLDAR

LINCOLN ELECTRIC

CHECK LIST
MÁQUINA DE SOLDAR LINCOLN ELECTRIC
(Uso en taller y terreno)

La seguridad es trabajo de todos

Empresa / Proyecto: _____ Fecha: ____ / ____ / ____

Área / Taller: _____ Equipo Nº: _____

Ubicación: _____ Inspector: _____

1. INSPECCIÓN PREOPERACIONAL

Nº	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	Estado general del equipo (carcasa, pintura, sin golpes ni deformaciones).	☐	☐	☐	
2	Etiquetas, placas de identificación y advertencias legibles.	☐	☐	☐	
3	Cable de alimentación en buen estado (sin cortes, peladuras o aplastamientos).	☐	☐	☐	
4	Enchufe industrial en buen estado y con conexión a tierra.	☐	☐	☐	
5	Interruptor de encendido/apagado funciona correctamente.	☐	☐	☐	
6	Panel de control y perillas sin daños, operativas y legibles.	☐	☐	☐	
7	Displays e indicadores en buen estado.	☐	☐	☐	
8	Conectores de salida (positivo/negativo) en buen estado y firmes.	☐	☐	☐	
9	Cables de trabajo (antorcha, masa o portaelectrodo) sin cortes, grietas ni sobrecalentamiento.	☐	☐	☐	
10	Pinza de masa con buen contacto, limpia y operativa.	☐	☐	☐	
11	Antorcha (MIG) o portaelectrodo en buen estado (según proceso a utilizar).	☐	☐	☐	
12	Mangueras y conexiones (si corresponde) sin fugas ni daños.	☐	☐	☐	
13	Sistema de ventilación libre de obstrucciones (rejillas limpias).	☐	☐	☐	
14	Aislaciones, bornes y terminales firmes.	☐	☐	☐	
15	Presencia de fugas de aceite o refrigerante (si aplica).	☐	☐	☐	
16	Accesorios y consumibles disponibles y adecuados para el trabajo.	☐	☐	☐	

2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Nº	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	Encendido y apagado del equipo.	☐	☐	☐	
2	Regulación de corriente/voltaje sin saltos.	☐	☐	☐	
3	Estabilidad del arco (prueba en vacío o en plaqueta).	☐	☐	☐	
4	Funcionamiento correcto de ventiladores.	☐	☐	☐	
5	Sin ruidos anormales, vibraciones o calentamientos excesivos.	☐	☐	☐	

3. RESULTADO DE INSPECCIÓN

☐ APROBADO ☐ RECHAZADO ☐ APROBADO CON OBSERVACIONES

4. OBSERVACIONES GENERALES

_____

_____

_____



DATOS DEL EQUIPO

Marca:	Lincoln Electric
Modelo:	Vantage 575
Tipo:	Multiproceso (GMAW / SMAW)
Alimentación:	Diésel – Generador / Soldadora
Potencia:	500 A (aprox.)
Nº de serie:	_____

IMPORTANTE

- ✓ No operar el equipo si presenta fallas.
- ✓ Reportar inmediatamente cualquier anomalía.
- ✓ Mantener el área de trabajo limpia y segura.
- ✓ Solo personal autorizado y capacitado puede operar esta máquina.

5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)

- Casco de seguridad ☐
- Careta de soldar con filtro adecuado ☐
- Gafas de seguridad (apoyo) ☐
- Mascarilla de medio rostro (filtros para humos metálicos) ☐
- Guantes de cuero ☐
- Ropa de trabajo ignífuga / manga larga ☐
- Calzado de seguridad ☐
- Protección auditiva (si corresponde) ☐

6. AUTORIZACIÓN

TRABAJADOR / OPERADOR	SUPERVISOR / RESPONSABLE	PREVENCIONISTA / HSE
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____

Figura 41. 4.4 CHECK LIST de Maquina de Soldar o Fuente de poder

ESMERIL ANGULAR $4^{1/2}$

CHECK LIST
LINCOLN ELECTRIC

CHECK LIST
ESMERIL ANGULAR 4 1/2" (115 mm)
Uso en taller y terreno

LA SEGURIDAD ES TRABAJO DE TODOS

Empresa / Proyecto: _____ Fecha: ____ / ____ / ____

Área / Taller: _____ Equipo Nº: _____

Ubicación: _____ Inspector / Responsable: _____



1. INSPECCIÓN PREOPERACIONAL

Nº	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	Estado general del equipo (limpio, sin golpes, grietas ni deformaciones).	☐	☐	☐	
2	Carcasa y empuñadura en buen estado, sin fisuras o partes sueltas.	☐	☐	☐	
3	Cable de alimentación en buen estado, sin cortes, empalmes ni desgaste.	☐	☐	☐	
4	Enchufe en buen estado y con conexión a tierra (si corresponde).	☐	☐	☐	
5	Interruptor de encendido/apagado funciona correctamente y retorna a posición OFF.	☐	☐	☐	
6	Guarda protectora (carenado) presente, firme y ajustada correctamente.	☐	☐	☐	
7	Empuñadura lateral instalada y firme.	☐	☐	☐	
8	Tuerca de sujeción del disco y bridas en buen estado.	☐	☐	☐	
9	Disco abrasivo del tamaño correcto (4 1/2" / 115 mm) y en buen estado (sin grietas, roturas o desgaste excesivo).	☐	☐	☐	
10	Las rpm máximas del disco son iguales o mayores que las rpm del equipo.	☐	☐	☐	
11	Rejillas de ventilación limpias y sin obstrucciones.	☐	☐	☐	
12	No hay fugas de grasa/aceite (si aplica en la caja de engranajes).	☐	☐	☐	
13	Accesorios y llave de ajuste disponibles.	☐	☐	☐	
14	Área de trabajo limpia, ordenada y segura.	☐	☐	☐	

2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Nº	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	Conectar el equipo y verificar encendido.	☐	☐	☐	
2	El disco gira libremente, sin ruidos anormales ni vibraciones excesivas.	☐	☐	☐	
3	El interruptor mantiene el equipo encendido y lo apaga correctamente.	☐	☐	☐	
4	La guarda protectora no vibra y cubre adecuadamente el disco.	☐	☐	☐	
5	No hay chispas excesivas en el portaescobillas (si es visible).	☐	☐	☐	
6	Verificar que el disco no tenga oscilaciones.	☐	☐	☐	

3. RESULTADO DE INSPECCIÓN

APROBADO ☐ | RECHAZADO ☐ | APROBADO CON OBSERVACIONES ☐

4. OBSERVACIONES GENERALES

_____

_____

_____

DATOS DEL EQUIPO	
Marca:	Lincoln Electric
Modelo:	Esmeril Angular 4 1/2" (115 mm)
Potencia:	_____ W
Velocidad sin carga:	_____ rpm
Voltaje:	_____ V
Nº de serie:	_____

⚠ IMPORTANTE

- ✓ No utilizar discos dañados o vencidos.
- ✓ Usar siempre la guarda y empuñadura lateral.
- ✓ No forzar el equipo, dejar que el disco trabaje.
- ✓ Desconectar antes de cambiar el disco o realizar mantención.
- ✓ Usar EPP adecuado para la tarea.

5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)

- Casco de seguridad ☐
- Gafas de seguridad o visor facial ☐
- Mascarilla o respirador (polvo / humos) ☐
- Guantes de cuero ☐
- Protección auditiva (si corresponde) ☐
- Ropa de trabajo ignífuga / manga larga ☐
- Calzado de seguridad ☐

6. AUTORIZACIÓN

TRABAJADOR / OPERADOR	SUPERVISOR / RESPONSABLE	PREVENCIONISTA / HSE
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____

IMPORTANTE: Si algún ítem es marcado como NO OK, no utilizar el equipo hasta que se corrija la condición.

Figura 42. 4.4 CHECK LIST de Esmeril angular $4^{1/2}$

MASCARA DE MEDIO ROSTRO

USO DE MASCARILLA DE MEDIO ROSTRO

Empresa: _____ **Fecha:** ____/____/_____

Área: _____ **Inspector:** _____

INSPECCIÓN Y USO CORRECTO

1. Inspección previa

- Verificar que la mascarilla esté limpia y en buen estado. ☐
- Revisar que las válvulas de inhalación y exhalación estén limpias y operativas.
- Revisar bandas elásticas y hebillas (sin cortes ni pérdida de elasticidad).
- Verificar que los filtros/cartuchos sean los adecuados al contaminante.

2. Colocación correcta

- Colocar la mascarilla cubriendo nariz y boca. ☐
- Ajustar las bandas elásticas (superior a la parte posterior de la cabeza y inferior al cuello).
- Ajustar el puente nasal para un sello adecuado.

3. Prueba de sello (Sellado positivo y negativo)

- Sellado positivo: cubrir las válvulas de exhalación y exhalar suavemente. La mascarilla debe inflarse ligeramente. ☐
- Sellado negativo: cubrir los filtros/cartuchos e inhalar suavemente. La mascarilla debe colapsar ligeramente y mantenerse sellada.

4. Durante el uso

- No retirar la mascarilla en el área contaminada. ☐
- Cambiar filtros/cartuchos según plan de recambio o cuando se dificulte la respiración.

5. Al finalizar

- Limpiar la mascarilla según procedimiento.
- Guardar en bolsa o caja limpia, en lugar libre de contaminantes.



OBSERVACIONES:

_____

_____

USUARIO	SUPERVISOR
Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____

Figura 43. 4.4 CHECK LIST de Mascara de medio rostro

EXTENSION DE 220 Volt – 380 Volt



CHECK LIST – EXTENSIONES ELÉCTRICAS

Inspección antes de su uso

Empresa: _____ Fecha: ____/____/_____

Área / Proyecto: _____ Inspector / Responsable: _____

Ubicación: _____ Nº Equipo / Identificación: _____

1. INSPECCIÓN VISUAL

Nº	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	La extensión eléctrica es la adecuada para el uso previsto (voltaje, amperaje y potencia).	☐	☐	☐	
2	El cable no presenta cortes, fisuras, desgaste o abrasión.	☐	☐	☐	
3	El aislamiento del cable está en buen estado (no reseco, agrietado ni deformado).	☐	☐	☐	
4	Los enchufes (macho y hembra) están en buen estado, sin fisuras ni partes sueltas.	☐	☐	☐	
5	Las clavijas están firmes y no presentan pines doblados o sueltos.	☐	☐	☐	
6	No hay señales de sobrecalentamiento, deformación o decoloración.	☐	☐	☐	
7	La extensión cuenta con puesta a tierra (si corresponde) y está en buen estado.	☐	☐	☐	
8	La longitud de la extensión es adecuada para el trabajo (no se usa de forma forzada).	☐	☐	☐	
9	No se utilizan extensiones enrolladas durante el uso.	☐	☐	☐	
10	La extensión no está expuesta a líquidos, aceites o condiciones húmedas.	☐	☐	☐	
11	Etiquetas de especificaciones legibles (voltaje, amperaje, utilización interior/exterior).	☐	☐	☐	
12	La extensión se encuentra libre de modificaciones o empalmes.	☐	☐	☐	

2. ESPECIFICACIONES DE LA EXTENSIÓN

Voltaje nominal: _____ V

Corriente nominal: _____ A

Potencia máxima: _____ W

Tipo (uso): ☐ Interior ☐ Exterior ☐ Uso rudo

Longitud: _____ m

Calibre del cable (AWG): _____

3. USO CORRECTO

- Conectar la extensión a tomas de corriente en buen estado.
- No exceder la capacidad de carga indicada (voltaje y amperaje).
- Desenrollar completamente antes de usar.
- Evitar el paso de vehículos o equipos sobre la extensión.
- Desconectar tirando del enchufe, no del cable.
- Mantener la extensión seca y limpia.

4. CRITERIO DE ACEPTACIÓN

ACEPTABLE	NO ACEPTABLE	CONDICIONAL
La extensión cumple con todos los requisitos y puede ser utilizada de forma segura.	La extensión presenta uno o más defectos que comprometen la seguridad.	Puede utilizarse solo si se corrige el defecto menor y no compromete la seguridad.

5. ACCIONES REQUERIDAS

_____

_____

_____

_____

_____

_____

6. REGISTRO DE INSPECCIONES

FECHA	Nº EQUIPO / ID	LONGITUD (m)	INSPECTOR	RESULTADO (A / NA / C)	OBSERVACIONES

7. RECOMENDACIONES GENERALES

INSPECTOR / RESPONSABLE	SUPERVISOR / JEFE DE ÁREA	PREVENCIONISTA / HSE
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____ Fecha: __/__/__	Firma: _____ Fecha: __/__/__	Firma: _____ Fecha: __/__/__

IMPORTANTE

Si algún ítem es marcado como NO OK, no utilizar la extensión hasta que se corrija la condición.

Figura 44. 4.4 CHECK LIST de Extensión de 220 Volt – 380 Volt

MANOS INSPECCION Y CUIDADO

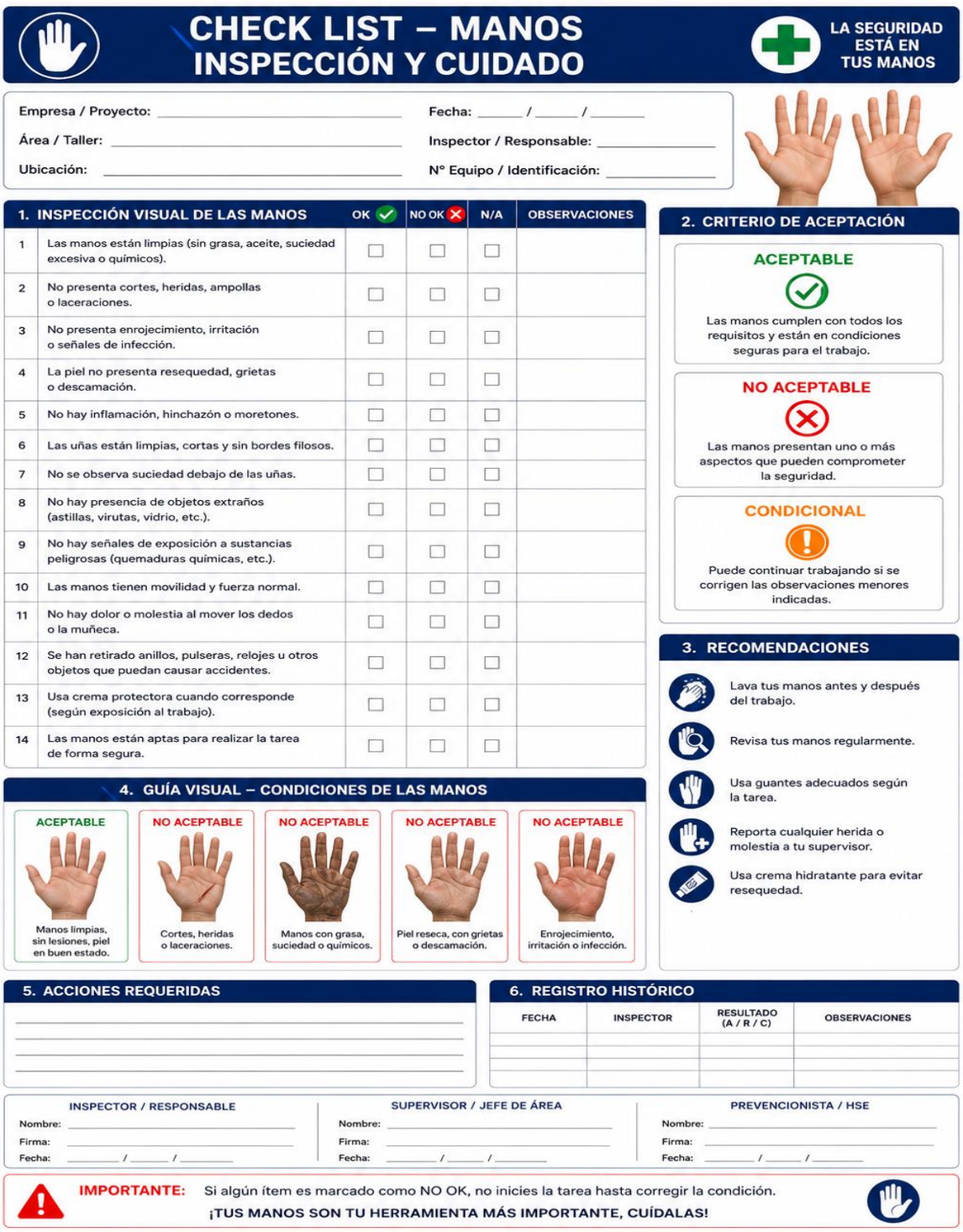


Figura 45. 4.4 CHECK LIST de Manos inspección y cuidado

EXTINTOR

CHECK LIST – EXTINTOR

INSPECCIÓN VISUAL Y FUNCIONAL

LA SEGURIDAD ES TAREA DE TODOS



Empresa / Proyecto: _____ Fecha: ____ / ____ / _____

Área / Taller: _____ Inspector / Responsable: _____

Ubicación: _____ N° Equipo / Identificación: _____

1. INSPECCIÓN VISUAL

N°	ASPECTO A VERIFICAR	OK	NO OK	N/A	OBSERVACIONES
1	El extintor está en su lugar asignado y es fácilmente visible y accesible.	☐	☐	☐	
2	No está obstruido por equipos, materiales o muebles.	☐	☐	☐	
3	La señalización del extintor es correcta y visible.	☐	☐	☐	
4	El extintor corresponde al tipo de riesgo del área (clase de fuego).	☐	☐	☐	
5	El extintor está en posición vertical y firmemente sujeto (soporte o colgador).	☐	☐	☐	
6	El cilindro no presenta golpes, abolladuras, corrosión, fugas o daños.	☐	☐	☐	
7	La manguera/nozzle está en buen estado, sin grietas, obstrucciones ni fugas.	☐	☐	☐	
8	El manómetro indica presión en la zona verde.	☐	☐	☐	
9	El sello de seguridad y precinto están intactos.	☐	☐	☐	
10	El pasador (anilla) está en su posición.	☐	☐	☐	
11	Las instrucciones de uso en la etiqueta son legibles y están al frente.	☐	☐	☐	
12	La etiqueta indica tipo de extintor, capacidad y agente extintor.	☐	☐	☐	
13	La fecha de última mantención/recarga está vigente.	☐	☐	☐	
14	El extintor no ha sido usado ni descargado (parcial o totalmente).	☐	☐	☐	
15	Cumple con la normativa vigente aplicable.	☐	☐	☐	

2. INFORMACIÓN DEL EXTINTOR

Tipo de Extintor: _____
(Polvo ABC / CO_2 / Agua / Espuma)
Capacidad: _____ Kg / Lts
Agente Extintor: _____
Marca: _____
Modelo: _____
N° Serie: _____
Fecha de Fabricación: ____ / ____ / _____
Fecha Última Mantención: ____ / ____ / _____
Próxima Mantención: ____ / ____ / _____
Empresa de Mantención: _____
Teléfono: _____

3. CRITERIO DE ACEPTACIÓN

ACEPTABLE	Cumple con todos los puntos anteriores. El extintor está en condiciones seguras para su uso.
NO ACEPTABLE	Presenta uno o más puntos que comprometen su disponibilidad o seguridad.
CONDICIONAL	Puede mantenerse en servicio solo si se corrige el/los punto(s) indicado(s) y se reevalúa.

4. VERIFICACIÓN FUNCIONAL (OPCIONAL)

	SÍ	NO	N/A	OBSERVACIONES
Se retiró el extintor del soporte y está firme.	☐	☐	☐	
Se verificó el manómetro (presión correcta).	☐	☐	☐	
Se verificó el estado de la manguera/boquilla.	☐	☐	☐	
Se verificó el precinto y pasador de seguridad.	☐	☐	☐	
Se devolvió el extintor a su lugar correctamente.	☐	☐	☐	

5. CLASES DE FUEGO Y USO DEL EXTINTOR

CLASE DE FUEGO	TIPO	SÍMBOLO	EJEMPLOS	EXTINTOR RECOMENDADO
A	Sólidos ordinarios		Madera, papel, telas, cartón, etc.	Agua / Espuma / Polvo ABC
B	Líquidos inflamables		Petróleo, bencina, solventes, pinturas, aceites, etc.	CO_2 / Polvo ABC / Espuma
C	Equipos eléctricos		Tableros, motores, cables energizados, computadores, etc.	CO_2 / Polvo ABC
D	Metales combustibles		Magnesio, titanio, sodio, potasio, aluminio, etc.	Polvo especial para metales
K	Aceites y grasas de cocina		Aceites y grasas vegetales o animales en cocinas.	Extintor Clase K (Agente químico húmedo)

6. ACCIONES REQUERIDAS

_____
_____
_____

7. REGISTRO HISTÓRICO

FECHA	INSPECTOR	RESULTADO (A / R / C)	OBSERVACIONES / ACCIONES TOMADAS	PRÓXIMA FECHA DE REVISIÓN

INSPECTOR / RESPONSABLE	SUPERVISOR / JEFE DE ÁREA	PREVENCIONISTA / HSE
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____

IMPORTANTE: Un extintor en mal estado puede fallar cuando más se necesita.
REVISA, MANTÉN Y ASEGURA TU EXTINTOR.

EMERGENCIAS INCENDIOS 132

Figura 46. 4.4 CHECK LIST de Extintor

4.5 PERMISO DE TRABAJO A REALIZAR

ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO (AST)

ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO (ATS)

Trabajo a realizar: _____

Área / Faena: _____ Fecha: ____/____/_____

Participantes (nombres): _____

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO _____

2. PASOS DEL TRABAJO

PASO Nº	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	RIESGOS ASOCIADOS	MEDIDAS DE CONTROL
1			
2			
3			
4			
5			

3. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS A UTILIZAR _____

4. EPP REQUERIDO



5. OBSERVACIONES GENERALES _____

6. AUTORIZACIÓN

TRABAJADOR RESPONSABLE	SUPERVISOR	PREVENCIONISTA
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Firma: _____	Firma: _____	Firma: _____

Figura 47. 4.5 PERMISO DE TRABAJO A REALIZAR

PERMISO DE TRABAJO EN CALIENTE



PERMISO DE TRABAJO EN CALIENTE

N°: _____

Empresa: _____

Área / Faena: _____

Fecha: ____/____/_____ **Hora inicio:** _____ **Hora término:** _____

Responsable del trabajo: _____ _____

Ubicación exacta del trabajo: _____

Descripción del trabajo a realizar: _____

_____

EVALUACIÓN DE RIESGOS

(Marque con X según corresponda)

RIESGO	SI	NO	CONTROL A APLICAR
Presencia de materiales combustibles			
Existencia de gases / vapores inflamables			
Ventilación insuficiente			
Trabajo en altura			
Espacios confinados			
Líneas eléctricas cercanas			
Otros: _____			

MEDIDAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS

- Limpieza del área (10 m alrededor)
- Protección de materiales combustibles
- Extintor disponible y operativo
- Ventilación adecuada
- Personal capacitado y con EPP completo
- Vigilante de incendio asignado

Observaciones: _____

_____

_____

AUTORIZADO POR	SUPERVISOR	VIGILANTE DE INCENDIO
Nombre: _____	**Nombre:** _____	**Nombre:** _____
Firma: _____	**Firma:** _____	**Firma:** _____

Figura 48. 4.5 PERMISO DE TRABAJO EN CALIENTE

4.6 Preparación de probetas

La preparación de las probetas es fundamental porque asegura condiciones uniformes para soldar y evaluar la calidad de la unión. Un acondicionamiento de los materiales, considerando la geometría de la junta, el biselado, respectiva separación y la limpieza de las superficies.

1º

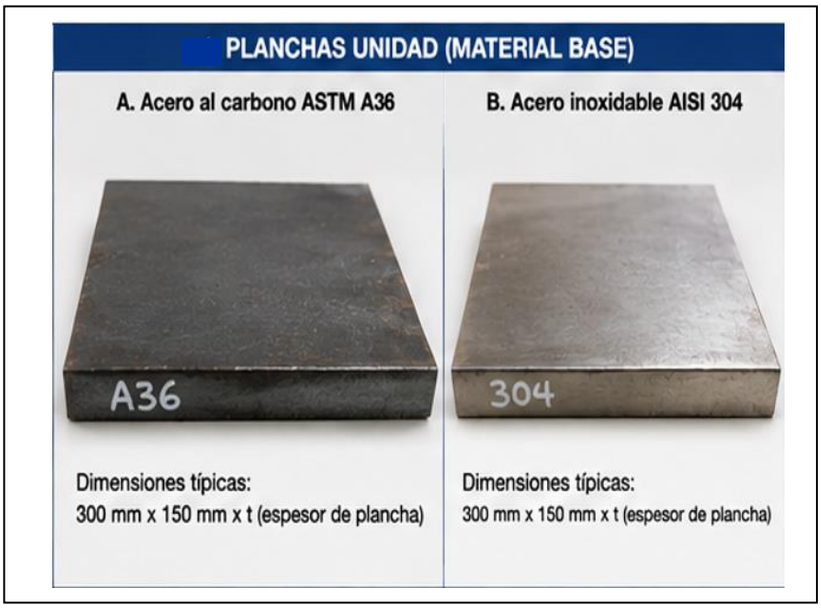


Figura 49. 4.6 Preparación de probeta – Identificación de material

2º

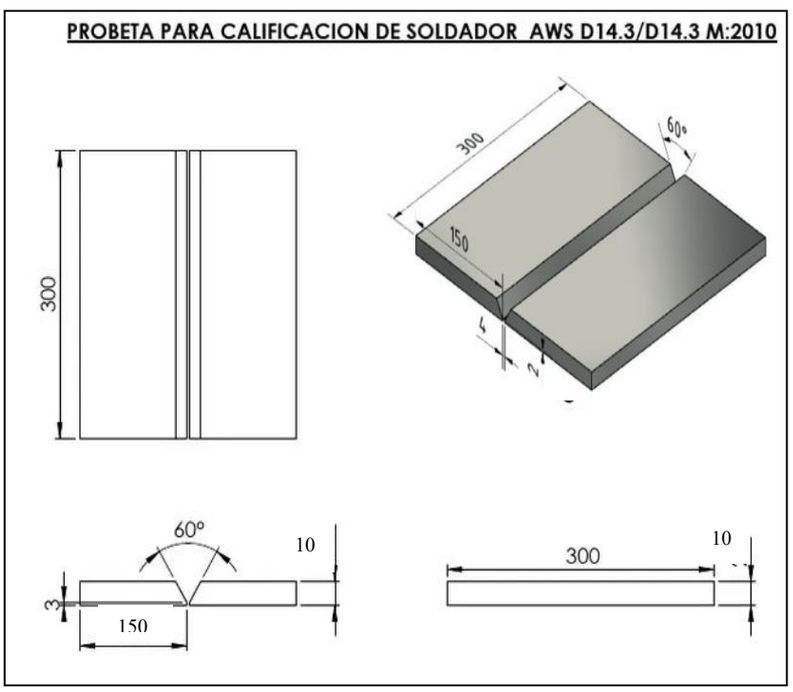


Figura 50. 4.6 Preparación de probetas - Dimensionado

3º



Figura 51. 4.6 Preparación de probetas - Emplantillado

4.7 Parámetros de soldadura

En parámetros de soldadura, explica brevemente como se controlan los voltajes, amperajes, velocidad de avance y caudal de gas para obtener uniones uniformes, y cierre relacionado con la confiabilidad en mantenimiento.

Tabla 16. Parámetros de soldadura (Espesor 10 mm)

Pase / Cordón	Voltaje (Vantage 500)	Amperaje	Velocidad Alambre Ø 1.6	Gas Protector
1º Pase (Raíz)	28 V – 29 V	19.0 A – 21.0 A	4.3 m/min (170 IPM)	15 L/min
2º y 3º pase (Relleno – Presentación)	31 V – 32 V	24.0 A – 26.0 A	5.6 m/min (220 IPM)	15 L/min

Tabla 17. Parámetros de soldeo por posición GMAW (Espesor 10 mm)

Posición Soldeo	Tipo de Transferencia	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad Alambre (m/min)	Flujo Gas (L/min)	Técnica de avance recomendada
1G (Plana)	Espray/Pulsado	25.0 A – 29.0 A	26 V – 28 V	5.5 – 6.8	18 - 22	Cordón recto, arrastre ligero o empuje.
2G (Horizontal)	Espray/Pulsado	22.0 A – 25.0 A	24 V – 26 V	4.8 – 5.5	18 - 20	Inclinación de la torcha hacia arriba (control de caída)
3G (Vertical)	Arco pulsado GMAW-P	18.0 A – 21.0 A	22 V – 24 V	3.8 – 4.5	15 - 18	Vertical ascendente, oscilación muy leve en “V”
4G (Sobre Cabeza)	Arco pulsado GMAW-P	19.0 A - 22.0 A	23 V – 25 V	4.0 – 4.8	18 - 22	Avance rápido, cordones rectos (sin oscilación)

4.8 Inspecciones

Previa

Etapa crítica que verifica los materiales base, limpiezas bordes, alineación, separación de la raíz y ajustes del equipo GMAW. Encontrándose estos con:

El lugar de trabajo.

- Equipo o Maquinaria completa para ser usada
- Cables conectados
- Lugar despejado
- Extintor
- Orden y aseo

El material o la pieza a trabajar

- Libre de grasas
- Libre de oxido
- Verificación de Talón ≤ 3 mm
- Separación de Raíz ≤ 3 mm

Durante

Se realiza un control continuo en el proceso, verificando que las condiciones establecidas se mantengan dentro de los parámetros definidos. Se supervisa la estabilidad del arco eléctrico, el comportamiento o resultado del cordón, la velocidad de avance. También se considera controlar la posición y el ángulo de la antorcha, procurando mantener una aplicación uniforme del material de aporte sobre la unión entre los aceros ASTM A36 y el acero inoxidable AISI 304.

Finalmente

Esta última etapa de inspección, permite detectar oportunamente desviaciones o condiciones que puedan generar discontinuidades, como la falta de;

- Fusión
- Porosidad
- Socavación
- Irregularidades en el cordón

Permitiendo realizar oportunamente una mejora continua y una unión definida

- **Lugar de trabajo seguro**



Figura 52.4.8. Lugar de trabajo seguro

4.9 Ensayo

Ensayos no destructivos no destructivos, permiten evaluar la calidad e integridad de la unión sin afectar su funcionamiento.

Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes, indicando que se usa para discontinuidades abiertas a la superficie, como grietas o poros y que permite verificar la superficie del cordón antes de la evaluación final.



Figura 53. 4.9 Ensayo

Etapas de secuencia para proceder a este tipo de Pruebas No Destructivas;
Líquidos Penetrantes



Figura 54. 4.9 Ensayo de líquidos penetrantes

Indicación clara visible y definida de las discontinuidades. Excelente contraste entre el revelador blanco y las indicaciones rojas, facilitando su evaluación.

CAPITULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.0 Costos:

En esta etapa de proyecto se consideran los siguientes pasos

Tabla 18. Valores de materiales e insumos

Material / Recurso	Unidad	Cant.	Medidas	Valor unitario	Costo total
Plancha Acero ASTM A36	Unidad	1	10x2440x12000 mm	$ 2.458.536	**$2.458.536**
Plancha Acero Inoxidable AISI 304	Unidad	1	10x1500x3000 mm	$ 1.588.507	**$1.588.507**
Carrete Alambre ER 308L Ø 1.6 mm	Unidad Carrete	1	15 kg	$ 380.000	**$400.000**
Gas protector Ar/CO2 98% - 2%	Cilindro	1	10 M^3	$ 95.000	**$95.000**
Caja Discos de Corte	Unidad	25	115 x 2,5 x 22.23 mm 4 $^{1/2}$" x 3/32" x 7/8"	$ 26.990	**$107.960**
Disco de Desbaste	Unidad	1	115 x 6 x 22 mm $4^{1/2"}$ x 1/4" x 7/8"	$ 1.990	**$199.000**
Liquido penetrante	Kit	1	Limpiador Liquido penetrante Revelador	$ 83.954	**$83.954**
Elementos de protección personal	Conjunto	1	Casco Gareta de soldador Protector auditivo Respirador de medio rostro Guantes de cabretilla Traje de cuero completo (Casaca – Pantalón) Botas de seguridad	$ 3.000 $30.000 $ 1.000 $15.000 $ 3.000 $68.900 $60.000	**$180.900**
Máquina de Soldar Autónoma Lincoln 575 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Moto-Soldadora Diesel, Lincoln Vantage 575	$17.000.000	**$17.000.000**
Maleta Lincoln 25 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Maleta Lincoln 25 pro	$2.000.000	**$2.000.000**
Equipo de Oxicorte	Unidad	1	Maleta oxicorte Oxigeno 10 m^3 Gas licuado 45 kg	$185.990 $380.000 $126.471	**$692.461**
Chispero	Unidad	1	Chispero cromado de copa	$2.000	**$2.000**
				Total	**$24.609.318**

Tabla 19. Valores de materiales e insumos

Material / Recurso	Unidad	Cant.	Medidas	Valor unitario	Costo total
Plancha Acero ASTM A36	Unidad	1	10x2440x12000 mm	$ 2.458.536	**$2.458.536**
Plancha Acero Inoxidable AISI 304	Unidad	1	10x1500x3000 mm	$ 1.588.507	**$1.588.507**
Carrete Alambre ER 309L Ø 1.6 mm	Unidad Carrete	1	15 kg	$ 380.000	**$380.000**
Gas protector Ar/CO2 98% - 2%	Cilindro	1	10 M^3	$ 95.000	**$95.000**
Caja Discos de Corte	Unidad	25	115 x 2,5 x 22.23 mm 4 $^{1/2}$" x 3/32" x 7/8"	$ 26.990	**$107.960**
Disco de Desbaste	Unidad	1	115 x 6 x 22 mm 4$^{1/2"}$ x 1/4" x 7/8"	$ 1.990	**$199.000**
Liquido penetrante	Kit	1	Limpiador Liquido penetrante Revelador	$ 83.954	**$83.954**
Elementos de protección personal	Conjunto	1	Casco Gareta de soldador Protector auditivo Respirador de medio rostro Guantes de cabretilla Traje de cuero completo (Casaca – Pantalón) Botas de seguridad	$ 3.000 $30.000 $ 1.000 $15.000 $ 3.000 $68.900 $60.000	**$180.900**
Máquina de Soldar Autónoma Lincoln 575 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Moto-Soldadora Diesel, Lincoln Vantage 575	$17.000.000	**$17.000.000**
Maleta Lincoln 25 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Maleta Lincoln 25 pro	$2.000.000	**$2.000.000**
Equipo de Oxicorte	Unidad	1	Maleta oxicorte Oxigeno 10 m^3 Gas licuado 45 kg	$185.990 $380.000 $126.471	**$692.461**
Chispero	Unidad	1	Chispero cromado de copa	$2.000	**$2.000**
				Total	**$24.589.318**

Tabla 20. Valores de materiales e insumos

Material / Recurso	Unidad	Cant.	Medidas	Valor unitario	Costo total
Plancha Acero ASTM A36	Unidad	1	10x2440x12000 mm	$ 2.458.536	**$2.458.536**
Plancha Acero Inoxidable AISI 304	Unidad	1	10x1500x3000 mm	$ 1.588.507	**$1.588.507**
Carrete Alambre ER 316L Ø 1.6 mm	Unidad Carrete	1	15 kg	$ 250.000	**$250.000**
Gas protector Ar/CO2 98% - 2%	Cilindro	1	10 M^3	$ 95.000	**$95.000**
Caja Discos de Corte	Unidad	25	115 x 2,5 x 22.23 mm 4 1/2" x 3/32" x 7/8"	$ 26.990	**$107.960**
Disco de Desbaste	Unidad	1	115 x 6 x 22 mm $4^{1/2"}$ x 1/4" x 7/8"	$ 1.990	**$199.000**
Liquido penetrante	Kit	1	Limpiador Liquido penetrante Revelador	$ 83.954	**$83.954**
Elementos de protección personal	Conjunto	1	Casco Gareta de soldador Protector auditivo Respirador de medio rostro Guantes de cabretilla Traje de cuero completo (Casaca – Pantalón) Botas de seguridad	$ 3.000 $30.000 $ 1.000 $15.000 $ 3.000 $68.900 $60.000	**$180.900**
Máquina de Soldar Autónoma Lincoln 575 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Moto-Soldadora Diesel, Lincoln Vantage 575	$17.000.000	**$17.000.000**
Maleta Lincoln 25 Pro	Unidad	1	Valor de compra de Maleta Lincoln 25 pro	$2.000.000	**$2.000.000**
Equipo de Oxicorte	Unidad	1	Maleta oxicorte Oxigeno 10 m^3 Gas licuado 45 kg	$185.990 $380.000 $126.471	**$692.461**
Chispero	Unidad	1	Chispero cromado de copa	$2.000	**$2.000**
				Total	**$24.459.318**

5.1 Comparación con otros materiales de aporte

Tabla 21. Distintos materiales de aporte

Material de aporte	Aplicación principal	Compatibilidad A36-AISI 304	Característica
ER 308L	Aceros Inoxidables AISI 304/304L	Media	Adecuado para inoxidable con inoxidable, pero menos apropiado para uniones disimiles
ER 309L	Uniones de metales disimiles (Ac. Inox.– Ac. Carb.)	Alta	Diseñado para uniones disimiles; buena resistencia a la fisuración y resistente a piezas de hornos industriales que operen a altas temperaturas (hasta los 1.000 ºC)
ER 316L	Uniones expuestas a ambientes altamente corrosivos, ambientes marinos e higiene	Media	Material diseñado para soldadura cuya aplicación principal es la fabricación y reparación de componentes a una corrosión severa, especialmente frente a ácidos, bases y ambientes marinos.
ER 312	Reparaciones y uniones de materiales diferentes	Alta	Buena tolerancia a materiales disimiles, pero generalmente más costoso y soportando hasta una temperatura de 420 ºC.
ER 70S-6	Aceros al Carbono	Baja para esta aplicación	Adecuado para A36, pero no es la alternativa preferente para unirlo directamente con AISI 304.

5.2 Resultados de inspección

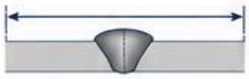
5.2.1 Registro de inspección visual

TABLA – REGISTRO DE INSPECCIÓN VISUAL DE SOLDADURA

1. DATOS GENERALES

N° de Probeta / Junta:	P1 – A36 / AISI 304
Proceso de Soldadura:	GMAW
Material Base (MB):	A36 – AISI 304
Material de Aporte:	ER309L
Fecha de Inspección:	20-05-2024
Inspector:	G.G.

2. PARÁMETROS DE INSPECCIÓN VISUAL

Parámetro	Criterio de Aceptación	Resultado / Observación	Registro Fotográfico / Ilustración
Apariencia del Cordón	Cordón uniforme, sin discontinuidades mayores.	Cordón uniforme, sin discontinuidades mayores.	
Refuerzo	Adecuado (1.5 – 2.0 mm)	Adecuado (1.6 mm)	
Ancho del Cordón	8 – 10 mm	9.2 mm	
Socavado	No se observa	No se observa	
Porosidad Superficial	No se observa	No se observa	
Fisuras Visibles	No se observa	No se observa	
Salpicaduras	Leves (aceptable)	Leves (aceptable)	
Otras Observaciones	Transición suave entre materiales. Colores de oxidación uniformes.	Transición suave entre materiales. Colores de oxidación uniformes.	

3. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

- Cordón uniforme, sin grietas, sin socavado mayor a 0.5 mm.
- Porosidad permitida según norma aplicable (ISO 5817 – Nivel B).
- Refuerzo y ancho dentro de rangos aceptables según WPS.

4. OBSERVACIONES GENERALES

Se inspecciona 100% de la longitud del cordón por ambas caras cuando es posible.

5. LEYENDA DE RESULTADOS

ACEPTABLE: Cumple con los criterios de aceptación.
NO ACEPTABLE: No cumple con los criterios de aceptación.

Figura 55.5.2. Registro de inspección visual de soldadura

5.2.2 Registro de Ensayo de líquidos penetrantes

TABLA 5.2.2 – REGISTRO DE ENSAYO POR LÍQUIDOS PENETRANTES (PT)

1. DATOS GENERALES

N° de Probeta / Junta:	P1 – A36 / AISI 304
Proceso de Soldadura:	GMAW
Material Base (MB):	A36 – AISI 304
Material de Aporte:	ER309L
Fecha de Ensayo:	21-05-2024
Inspector:	G.G.

2. PROCESO DEL ENSAYO POR LÍQUIDOS PENETRANTES

Etapa del Ensayo	Descripción	Tiempo / Especificación	Registro Fotográfico / Ilustración	Resultado / Observación
1. Limpieza Previa	Limpieza con solvente (S-1). Secado completo.	-		Superficie limpia y seca.
2. Aplicación de Penetrante	Aplicación de penetrante rojo visible (ZP-22).	10 minutos (según instrucción del fabricante)		Penetrante aplicado correctamente.
3. Remoción del Exceso	Remoción del exceso con paño limpio humedecido con solvente.	-		Exceso de penetrante removido.
4. Aplicación de Revelador	Aplicación de revelador blanco (D-70).	10 minutos (mínimo)		Revelador aplicado uniformemente.
5. Tiempo de Revelado	Tiempo de revelado para que aparezcan las indicaciones.	10 minutos (mínimo)		Tiempo cumplido.
6. Resultado de Indicación	Inspección de indicaciones visibles bajo luz blanca.	-		No se detectan indicaciones relevantes.
7. Evaluación	Comparación de resultados con criterios de aceptación (ISO 23277 – Nivel 2).	-		Cumple con criterios de aceptación.

3. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

- No se permiten indicaciones lineales.
- Indicaciones redondeadas menores a 1 mm permitidas según norma aplicable.
- Evaluación según ISO 23277 – Nivel 2.

4. OBSERVACIONES GENERALES

Ensayo realizado en la superficie del cordón y zonas adyacentes (ZAC) en ambas caras cuando es posible.
Temperatura ambiente: 20 °C – 22 °C.

5. LEYENDA DE RESULTADOS

ACEPTABLE: No se detectan indicaciones relevantes.
NO ACEPTABLE: Se detectan indicaciones no permitidas.

Nota: Ensayo no destructivo (END) utilizado para detectar discontinuidades superficiales abiertas tales como grietas, porosidad abierta y falta de fusión.

Figura 56. 5.2 Resultados de inspección con tintas penetrantes

5.2.3 Imagen del procedimiento realizado de la unión de material disímil AISI 304 – ASTM A36 – con material de aporte ER 309L

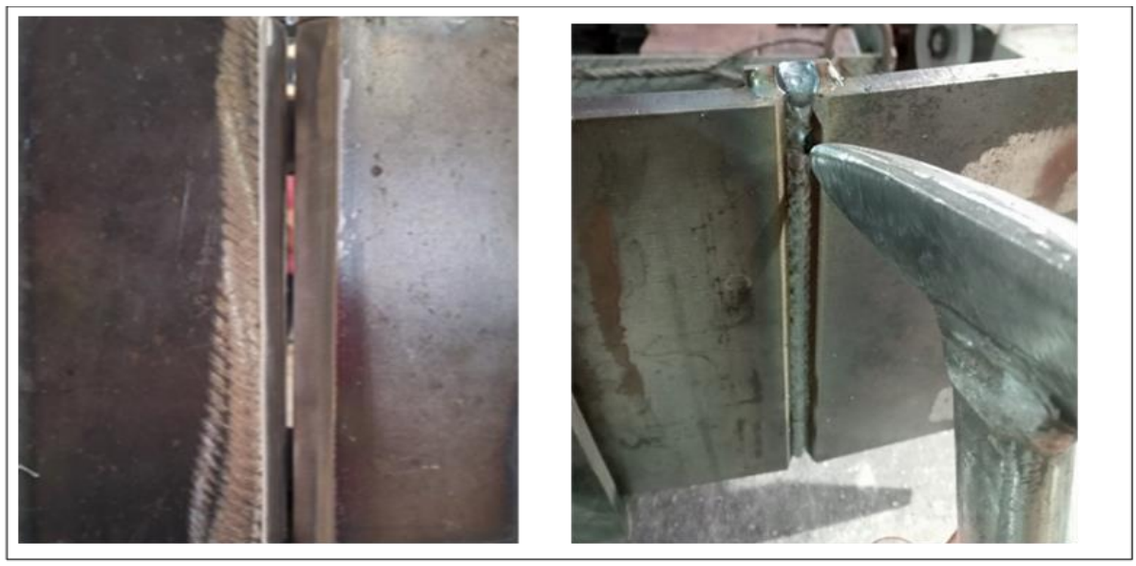




Figura 57. 5.2 Resultados de inspección aceptadas

5.2.4 Descripción visual de unión soldada.

Se registra mediante evidencia fotográfica la correcta secuencia de preparación y ejecución de la unión soldada entre los metales disimiles. Inicialmente se observa la preparación, alineación y posicionamiento de las placas, permitiendo mantener una geometría adecuada de la junta antes de realizar la unión a través de la soldadura.

Posteriormente se evidencia la fijación mediante puntos de soldadura, cuya función es conservar la alineación de las piezas y reducir el desplazamiento durante la aplicación del cordón.

En las imágenes finales se observa la ejecución del cordón de soldadura mediante proceso GMAW y material de aporte ER 309L, apreciándose visualmente una deposición continua y una geometría relativamente uniforme a lo largo de la unión. El patrón superficial del cordón muestra una secuencia regular de avance y una distribución continua del material de aporte.

A nivel visual, en las zonas mostradas no se distinguen grietas superficiales evidentes ni interrupciones importantes del cordón. Sin embargo, la inspección visual por si sola no permite determinar la existencia de discontinuidades internas ni confirman completamente la calidad metalúrgica de la unión, por lo que debe complementarse con el ensayo de líquidos penetrantes y, cuando corresponda, otros ensayos no destructivos

¡APROBADA!



Figura 58. 5.2 Resultados de inspección aceptadas

5.2.5 No se deben detectar anomalías superficiales visuales, que determinen el rechazo de la soldadura, tales como:

ANOMALÍAS QUE CONSTITUYEN CRITERIOS DE RECHAZO EN UNA UNIÓN SOLDADA

Las siguientes discontinuidades, cuando exceden los límites de aceptación establecidos por la norma aplicable (ASME Sección IX, AWS D1.1, ISO 5817, entre otras), constituyen criterios de rechazo de la unión soldada.

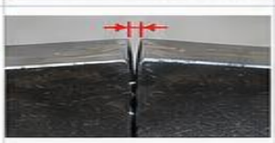
N°	ANOMALÍA	IMAGEN REFERENCIAL	DESCRIPCIÓN	CAUSA PROBABLE
1	GRIETAS		• Discontinuidad lineal que puede presentarse en el metal de soldadura, ZAC o metal base.	• Altas tensiones residuales. • Enfriamiento rápido. • Restricción. • Hidrógeno.
2	FALTA DE FUSIÓN		• El metal de soldadura no se fusiona con el metal base o entre pasadas.	• Corriente baja. • Velocidad alta. • Limpieza inadecuada. • Técnica incorrecta.
3	FALTA DE PENETRACIÓN		• El metal de soldadura no penetra completamente la raíz de la junta.	• Apertura de raíz insuficiente. • Corriente baja. • Velocidad alta. • Técnica incorrecta.
4	POROSIDAD EXCESIVA		• Cavidades o poros dentro del metal de soldadura.	• Contaminación. • Humedad. • Protección gaseosa inadecuada. • Mala limpieza.
5	INCLUSIONES DE ESCORIA		• Partículas de escoria atrapadas en el metal de soldadura.	• Limpieza insuficiente entre pasadas. • Técnica incorrecta. • Ángulo de trabajo inadecuado.
6	SOCAVACIÓN EXCESIVA		• Ranura en el metal base adyacente al cordón.	• Corriente alta. • Voltaje alto. • Velocidad alta. • Ángulo incorrecto. • Arco largo.
7	SOLAPE (COLD LAP)		• El metal de soldadura se deposita sobre el metal base sin fusión adecuada, formando un traslape.	• Velocidad de avance muy baja. • Corriente alta. • Técnica incorrecta.
8	GRIETA EN EL CRÁTER		• Grieta que se forma al finalizar el cordón en el cráter.	• Falta de relleno del cráter. • Enfriamiento rápido. • Altas tensiones residuales.
9	DESALINEACIÓN EXCESIVA		• Desalineación entre las piezas que afecta la geometría de la junta.	• Montaje incorrecto. • Sujeción inadecuada. • Preparación deficiente.

Figura 59. 5.2 Resultados de inspección no aceptadas

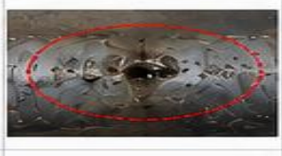
N°	ANOMALÍA	IMAGEN REFERENCIAL	DESCRIPCIÓN	CAUSA PROBABLE
10	SALPICADURAS EXCESIVAS		• Exceso de salpicaduras que puede ocultar defectos o afectar el desempeño.	• Parámetros inadecuados. • Técnica incorrecta. • Distancia incorrecta.
11	FUSIÓN INCOMPLETA ENTRE PASADAS		• Falta de unión entre el metal de una pasada y la siguiente.	• Limpieza insuficiente. • Corriente baja. • Velocidad alta.
12	PENETRACIÓN EXCESIVA (QUEMADO)		• Penetración excesiva que produce un orificio en la raíz de la junta.	• Corriente alta. • Velocidad baja. • Apertura de raíz excesiva.
13	DISTORSIÓN EXCESIVA		• Deformación que afecta la geometría y el ajuste de la unión.	• Aporte de calor excesivo. • Secuencia de soldadura inadecuada. • Sujeción insuficiente.
14	FALTA DE RELLENO		• El cordón no llena completamente la preparación de la junta.	• Volumen de aporte insuficiente. • Velocidad alta. • Técnica incorrecta.
15	PERFIL DE CORDÓN INSUFICIENTE (CONCAVIDAD)		• Cordón con concavidad excesiva que reduce el espesor efectivo.	• Corriente baja. • Velocidad alta. • Técnica incorrecta.
16	CORTE POR ARCO		• Ranura o marca causada por el arco fuera de la zona de soldadura.	• Encendido del arco fuera de la junta. • Técnica incorrecta. • Movimiento inadecuado.
17	CONTAMINACIÓN POR ACEITE, PINTURA O SUCIEDAD		• Contaminantes que generan porosidad, inclusiones o falta de fusión.	• Limpieza inadecuada. • Presencia de aceite, pintura, óxido, humedad.
18	VARIACIÓN EXCESIVA DEL REFUERZO (SOBREESPESOR)		• Cordón con exceso de refuerzo que puede generar concentración de esfuerzos.	• Velocidad baja. • Corriente alta. • Técnica incorrecta.

Figura 60. 5.2 Resultados de inspección no aceptadas

5.3 Beneficios

El proceso GMAW es fundamental en estos tipos de uniones disimiles por su rapidez y extensas uniones continuas. Siendo el mas utilizado e la industria y reparaciones en terreno.

Tabla 22. Valores según proceso de soldadura

PORCENTAJE DE DILUCIÓN POR PROCESO		
Proceso	**Gas de protección (%)**	**Dilución (%)**
SMAW	**Ninguno**	**30**
GMAW	**Ar 81 +He 18 + CO_2 1**	**36.5**
GMAW	**Ar 98 + O_2 2**	**42.8**
GMAW	**Ar 43 + He 55 + CO_2 2**	**43.7**
GMAW	**Ar 98 + CO_2 2**	**39.7**
GMAW	**Ar 100**	**39.7**
GMAW	**Ar 98 + O_2 2**	**44.1**
GTAW	**Ar 95 + He 5**	**43.6**

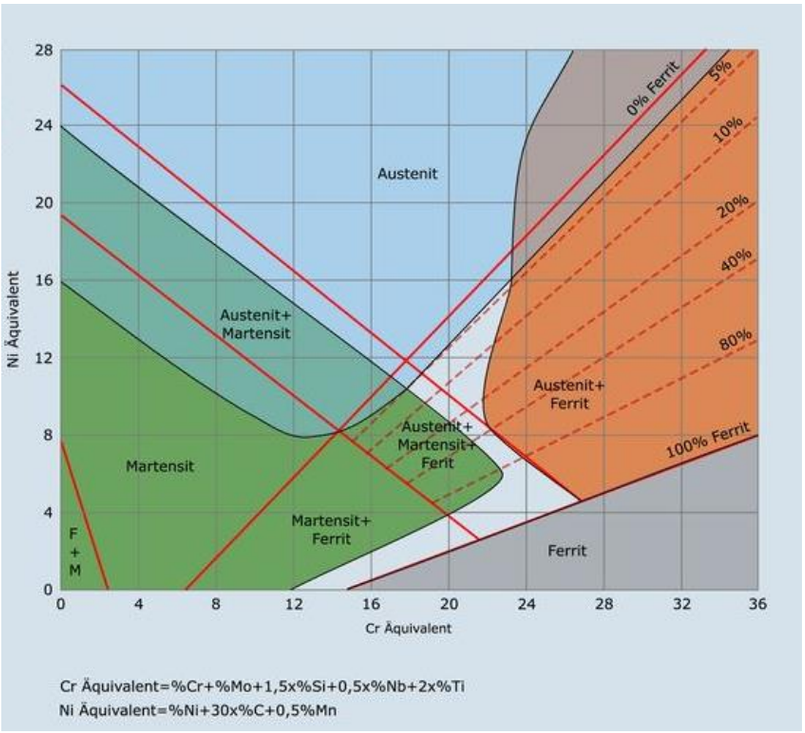


Figura 61. 5.3 Grafico de SCHAEFFLER

5.4 Viabilidad

DIAGRAMA DE SCHAEFFLER – INTERPRETACION DE LA UNIÓN

- **AISI 304 (Ac. Inoxidable austenítico) – ASTM M36 (Ac. Al Carbono)**
- **Con material de aporte ER 309L**

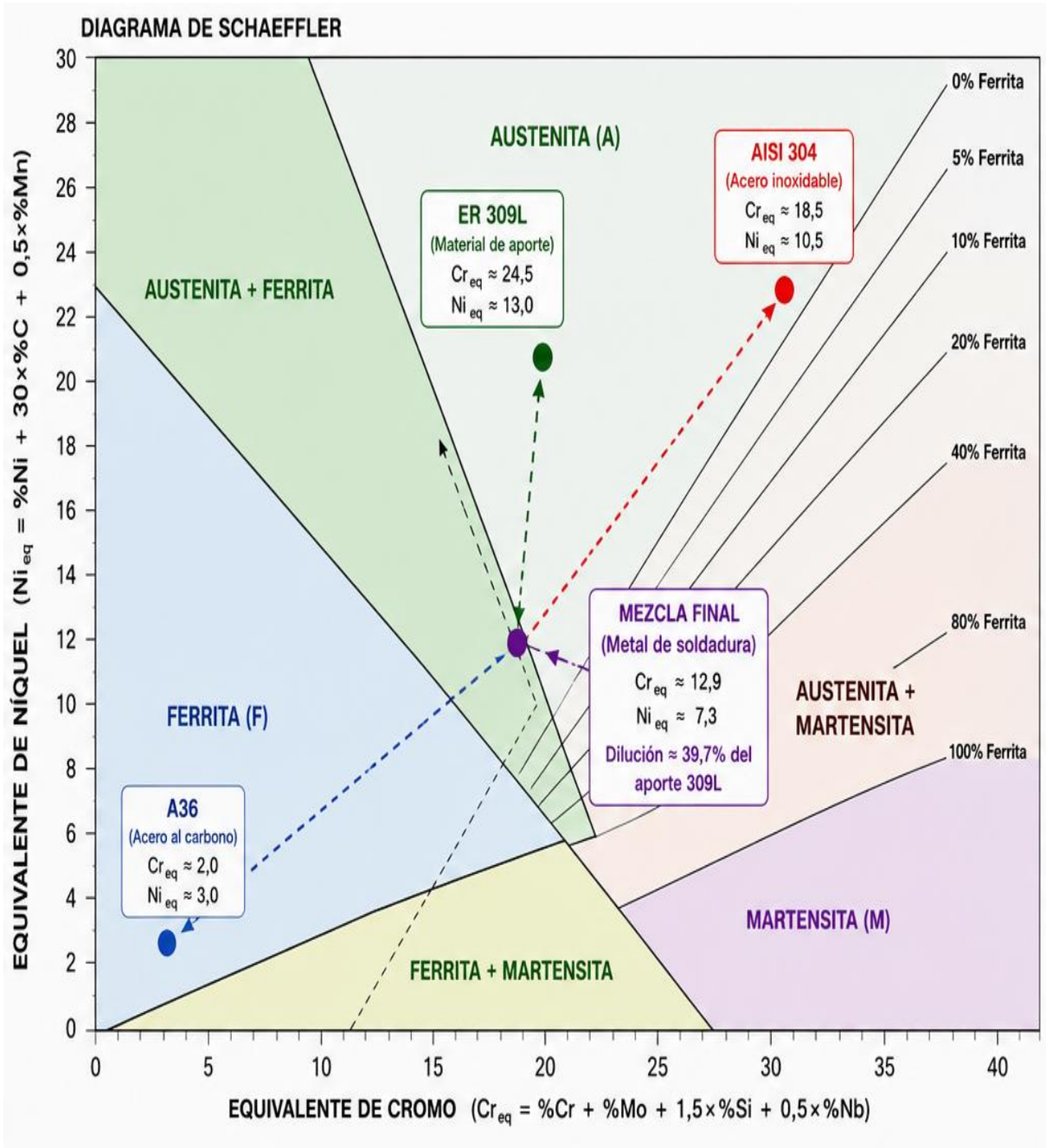


Figura 62. 5.4 Diagrama de SHAEFFLER

INTERPRETACION:

- A36 (Acero al carbono):
  Bajo contenido de Cr y Ni => se ubica en la zona FERRITA.

- AISI 304 (Acero inoxidable austenítico):
  Alto contenido de Cr y Ni => se ubica en la zona AUSTENITA.

- ER 309L (Material de aporte):
  Alto contenido de Cr y Ni => ubicación en la zona de AUSTENITA
  Con tendencia a mayor estabilidad de ferrita.

- MESCLA FINAL (Metal de soldadura):
  Con una dilución aproximada del 39.7% de aporte 309L, el punto resultante cae en la región AUSTENITA + FERRITA, cercano a las líneas de 5 – 10% de ferrita.
  Esto entrega una microestructura mixta (Austenita con Ferrita), deseable para esta unión disímil.

Tabla 23. Distintos materiales de aporte

COMPOSICIÓN TÍPICA (% EN PESO)							
Material	Cr	Ni	C	Mn	Si	Mo	Otros
A36	0,10	0,20	0,18	0,70	0,20	0,02	-
AISI 304	18,0	8,0	0,08	1,5	0,50	-	N
ER 309L	23,0	13,0	0,03	1,5	0,70	0,10	N

Ventajas del uso de ER 309L

- Reduce el riesgo de fisuración en caliente
- Mejora la compatibilidad metalúrgica entre acero al carbono y acero inoxidable
- Proporciona buena resistencia a la corrosión en la zona de unión
- Permite obtener una unión resistente y confiable en aplicaciones industriales



Figura 63.5.4 Permite obtener una unión resistente y confiable en aplicaciones industriales

- **CONCLUSION**

En el diagrama de ScHaeffler se observa que la combinación de A36 y AISI 304 con aporte ER 309L, con una dilución de 39.7%, da como resultado un metal de soldadura ubicado en la región AUSTENITA + FERRITA, con un contenido estimado de 5 – 10% de ferrita, considerando optimo para garantizar integridad, resistencia y durabilidad en uniones disimiles.

CAPITULO VI: CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

6.0 Conclusión

- La dilución es un fenómeno inherente a los procesos de soldadura por fusión y desempeña un papel fundamental en la calidad de las soldaduras disimiles. Su control permite mantener una composición química adecuada del metal depositado, conservar las propiedades mecánicas de la unión y reducir el riesgo de discontinuidades.

- La unión ASTM A36/AISI 304 con ER 309L es metalúrgicamente factible, pero requiere controlar por separado las dos ZAC, las líneas de fusión y el depósito.

- ER 309L es la selección de referencia porque su reserva de Cr – Ni compensa la dilución con el A36 y favorece una fracción de ferrita delta compatible con menor riesgo de fisuración en caliente.

- La calidad depende de la combinación de limpieza, junta, gas, corriente, voltaje, avance técnico, aporte térmico, interpaso y restricción; no de un amperaje aislado.

- Desde la perspectiva de la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad, el AISI 309L no se trata simplemente como un acero inoxidable, sino como un metal de transición y salvamente metalúrgico para la recuperación de activos.

- En las plantas indústriales, su definición técnica se enfoca en su capacidad para resolver fallas por incompatibilidad de materiales y fatiga térmica.

- En el entorno industrial se le conoce principalmente como “comodín de la soldadura” o “acero de transición”

6.1 Importancia de la clasificación de los aceros en soldaduras disimiles

En las soldaduras disimiles, donde se unen materiales con diferente composición química y propiedades metalúrgicas, la selección adecuada del material de aporte y de los parámetros del proceso depende directamente del conocimiento de las características de cada acero.

En el caso del presente proyecto, la unión entre un acero al carbono ASTM A36 y un acero inoxidable AISI 304 requiere un material de aporte capaz de absorber las diferencias metalúrgicas entre ambos materiales y minimizar la formación de estructuras frágiles o fisuras durante la solidificación.

Por esta razón el alambre ER 309L representa una alternativa ampliamente utilizada, debido a su composición química y su capacidad para proporcionar una transición metalúrgica adecuada entre ambos materiales, pudiendo soportar dentro de sus características lo 1.000 ºC.

La clasificación de los aceros permite además establecer procedimientos de soldaduras conformes a normas internacionales, definir temperaturas de precalentamiento cuando corresponda, según su espesor, siendo este mayor a 15mm, posteriormente seleccionar los métodos de inspección más adecuados y asegurar que la unión soldada cumpla con los requisitos de resistencia mecánica y confiabilidad exigidos en aplicaciones de mantenimiento industrial.

6.2 Recomendaciones

- Desde la perspectiva de la ingeniería en mantenimiento industrial, se recomienda utilizar este tipo de unión como alternativa de reparación y recuperación de componentes, siempre que las condiciones de servicio y criterios técnicos permitan garantizar su confiabilidad, seguridad y continuidad operacional.

CAPITULO VII: IMPLEMENTACION

7.0 Bibliografía

Fuentes bibliográficas y enlaces de visita utilizados como respaldo técnico para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

1. American Welding Society (AWS). AWS A5.9/A5.9M:2022 – Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods.

Respalda: material de aporte ER309L, clasificación de alambres/electrodos desnudos de acero inoxidable y proceso GMAW.

Enlace de visita: https://pubs.aws.org/p/2144/a59a59m2022-specification-for-bare-stainless-steel-welding-electrodes-and-rods

2. American Welding Society (AWS). AWS D1.1/D1.1M – Structural Welding Code – Steel.

Respalda: soldadura estructural de aceros al carbono y de baja aleación, calificación, fabricación e inspección.

Enlace de visita: https://cm.aws.org/standards-and-publications/codes-and-standards/d1-1/

3. American Welding Society (AWS). AWS D1.6/D1.6M – Structural Welding Code – Stainless Steel.

Respalda: soldadura estructural cuando intervienen aceros inoxidables y criterios técnicos asociados.

Enlace de visita: https://pubs.aws.org/p/2108/d16d16m2017-amd1-structural-welding-code-stainless-steel

4. American Welding Society (AWS). AWS B1.11M/B1.11:2015 – Guide for the Visual Examination of Welds.

Respalda: inspección visual de soldaduras y reconocimiento de discontinuidades superficiales.

Enlace de visita: https://pubs.aws.org/p/1547/b111mb1112015-guide-for-the-visual-examination-of-welds

5. ASTM International. ASTM A36/A36M – Standard Specification for Carbon Structural Steel.

Respalda: acero ASTM A36, requisitos químicos y mecánicos del material base.

Enlace de visita: https://store.astm.org/a0036_a0036m.html

6. ASTM International. ASTM A53/A53M – Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless.

Respalda: apartado de tuberías ASTM A53.

Enlace de visita: https://store.astm.org/a0053_a0053m.html

7. ASTM International. ASTM A106/A106M – Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service.

Respalda: apartado de tuberías ASTM A106 para servicio a alta temperatura.

Enlace de visita: https://store.astm.org/a0106_a0106m.html

8. ASTM International. ASTM A516/A516M – Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel.

Respalda: acero ASTM A516 y aplicaciones en recipientes a presión.

Enlace de visita: https://store.astm.org/a0516_a0516m.html

9. ASTM International. ASTM A240/A240M – Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip.

Respalda: aceros inoxidables AISI 304, 304L y 316L, composición y propiedades.

Enlace de visita: https://store.astm.org/a0240_a0240m.html

10. ASTM International. ASTM E165/E165M – Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry.

Respalda: ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes (PT).

Enlace de visita: https://store.astm.org/e0165_e0165m.html

11. ASME. BPVC Section IX – Welding, Brazing, and Fusing Qualifications.

Respalda: calificación de procedimientos y personal de soldadura; WPS, PQR y WPQ.

Enlace de visita: https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-section-ix-welding-brazing-and-fusing-qualifications

12. International Organization for Standardization (ISO). ISO 9606-1:2012 – Qualification testing of welders — Fusion welding — Part 1: Steels.

Respalda: calificación de soldadores para soldadura por fusión de aceros.

Enlace de visita: https://www.iso.org/standard/54936.html

13. ESAB. Exaton 309/309L (GMAW).

Respalda: aporte 309/309L y unión de acero inoxidable con acero al carbono mediante GMAW.

Enlace de visita: https://esab.com/us/nam_en/products-solutions/product/filler-metals/stainless-steel/mig-wires-tig-rods-gmaw-gtaw/exaton-309-309l-gmaw/

14. Kou, Sindo. Welding Metallurgy, 3rd Edition. Wiley.

Respalda: metalurgia de soldadura, zona de fusión, ZAC, solidificación, ciclo térmico y soldaduras disímiles.

Enlace de visita: https://www.wiley.com/en-us/Welding+Metallurgy%2C+3rd+Edition-p-9781119524816

15. Lippold, John C.; Kotecki, Damian J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Wiley.

Respalda: soldabilidad de inoxidables, soldaduras disímiles, ferrita/austenita y diagramas de constitución.

Enlace de visita: https://www.wiley.com/en-us/Welding+Metallurgy+and+Weldability+of+Stainless+Steels-p-9780471473794

16. Schaeffler, Anton L. "Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal." Metal Progress, Vol. 56, 1949.

Respalda: fundamento del diagrama de Schaeffler.

Enlace de visita: https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000136-I1570009751069526400

17. Scientific Reports. "Composition equivalents of stainless steels understood via gamma stabilizing efficiency."

Respalda: equivalentes de cromo y níquel y diagramas de constitución.

Enlace de visita: https://www.nature.com/articles/s41598-021-84917-z

18. American Society for Nondestructive Testing (ASNT). Introduction to Nondestructive Testing.

Respalda: fundamentos de VT, PT, MT, UT y RT.

Enlace de visita: https://education.asnt.org/local/catalog/view/product.php?productid=20

19. American Society for Quality (ASQ). Fishbone / Ishikawa Diagram.

Respalda: diagrama de Ishikawa y análisis de causas.

Enlace de visita: https://asq.org/quality-resources/fishbone

20. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Welding, Cutting and Brazing.

Respalda: seguridad en soldadura, riesgos, EPP y trabajos en caliente.

Enlace de visita: https://www.osha.gov/welding-cutting-brazing/hazards-solutions

7.1 Anexos

El WPS es el documento que orienta la ejecución de las soldaduras conforme a los requisitos aplicables.

El WPS es un documento técnico que establece las instrucciones y parámetros necesarios para ejecutar correctamente una soldadura, definiendo variables esenciales que aseguran la calidad y repetibilidad del proceso.

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

WPS No.:	WPS-GMAW-ER309L-001	**Revisión:**	0
		Fecha:	01/05/2025

1. INFORMACIÓN GENERAL	
Proceso de soldadura:	GMAW (MIG)
Tipo de junta:	A Tope
Material base:	ASTM A36 – AISI 304
Espesor del material:	6,0 mm
Posición de soldadura:	1G (Plana)

2. MATERIALES	
Metal de aporte:	ER309L
Diámetro del alambre:	1,6 mm
Gas de protección:	Ar + 2% CO_2
Material de respaldo:	No aplica

3. PARÁMETROS DE SOLDADURA	
Corriente:	180 – 220 A
Voltaje:	22 – 26 V
Velocidad de avance:	300 – 450 mm/min
Flujo de gas:	12 – 15 L/min
Técnica:	Cordón recto
Precalentamiento:	No requerido
Temperatura entre pases:	≤ 150 °C

4. OBSERVACIONES
Limpiar adecuadamente las superficies antes de soldar. Asegurar protección de gas y técnica estable durante todo el proceso.

Elaborado por:	**Revisado por:**	**Aprobado por:**
Firma	Firma	Firma
Fecha: ___ / ___ / ___	Fecha: ___ / ___ / ___	Fecha: ___ / ___ / ___

El PQR (Procedure Qualification Record) es el registro que demuestra ensayos no destructivos y destructivos, que un procedimiento de Soldadura Especifico (WPS) produce soldaduras aceptables y cumple con los requisitos de la norma aplicable.

Este registro es elaborado durante la calificación inicial del procedimiento y sirve como evidencia documental de que el WPS está calificado para su uso en producción.

PQR – PROCEDURE QUALIFICATION RECORD

PQR No.:	PQR-GMAW-ER309L-001	**Fecha:**	01/05/2025
WPS No.:	WPS-GMAW-ER309L-001	**Revisión:**	0
Código / Norma de calificación:	ASME Sección IX: 2023	**Tipo de registro:**	Original

1. INFORMACIÓN GENERAL

Proceso de soldadura:	GMAW (MIG)
Tipo de junta:	A Tope
Posición de soldadura:	1G (Plana)
Material base:	ASTM A36 (Grupo 1) – AISI 304 (Grupo 8)
Espesor del material:	6,0 mm
Diámetro del tubo / placa:	No aplica (Placa)
Material de aporte:	ER309L
Diámetro del alambre:	1,6 mm
Gas de protección:	Ar + 2% CO_2
Material de respaldo:	No aplica

2. VARIABLES ESENCIALES CALIFICADAS

Proceso:	GMAW (135)
Tipo de transferencia:	Corto circuito
Polaridad:	DCEP (Electrodo positivo)
Rango de espesor calificado:	3,0 – 12,0 mm
Rango de diámetro calificado:	No aplica (Placa)
Rango de posición calificada:	1G
Tipo de junta calificada:	A Tope
Metal de aporte calificado:	ER309L
Gas de protección calificado:	Ar + 2% CO_2

3. PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA CALIFICACIÓN

Pase	Proceso	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de gas (L/min)
Raíz	GMAW	190	23,5	320	13
Relleno	GMAW	210	24,5	340	13
Acabado	GMAW	200	24,0	330	13

4. ENSAYOS REALIZADOS

Ensayo	Norma / Método	Resultado	Aceptación
Inspección visual	ASME Sección IX QW-302	Aceptable	Aceptable
Ensayo de líquidos penetrantes	ASME Sección V / ASTM E165	Aceptable	Aceptable
Ensayo radiográfico	ASME Sección V / ASTM E94	Aceptable	Aceptable
Ensayo de tracción transversal	ASME Sección IX QW-153	Cumple	Cumple
Ensayo de doblez guiado	ASME Sección IX QW-161	Cumple	Cumple

5. RESULTADO DE LA CALIFICACIÓN

El procedimiento de soldadura, documentado en el WPS No. WPS-GMAW-ER309L-001, queda CALIFICADO de acuerdo con los requisitos de ASME Sección IX para el rango y variables indicadas.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Fecha: _____	Fecha: _____	Fecha: _____

El WPQ (Welder Performance Qualification) es el registro que demuestra, mediante ensayos, que un soldador tiene la habilidad y destreza para producir soldaduras aceptables de acuerdo con un WPS calificado (PQR) y cumpliendo con los requisitos de la norma aplicable.

- Verificar la capacidad del soldador para ejecutar el procedimiento
- Asegurar la calidad y repetitividad en la producción
- Cumplir con los requisitos de códigos y normas.

WPQ – WELDER PERFORMANCE QUALIFICATION

WPQ No.:	WPQ-GMAW-ER309L-001	**Fecha:**	01/05/2025
PQR No.:	PQR-GMAW-ER309L-001	**Revisión:**	0
WPS No.:	WPS-GMAW-ER309L-001	**Tipo de registro:**	Original
Norma de calificación:	ASME Sección IX: 2023		

1. INFORMACIÓN DEL SOLDADOR

Nombre del soldador:	Juan Pérez López	**Identificación:**	12.345.678-9
Método de identificación:	Tarjeta / Fotografía	**Fecha de calificación:**	01/05/2025
Empresa:	Taller de Soldadura Industrial	**Supervisor / Inspector:**	Carlos Díaz R.

2. VARIABLES CALIFICADAS

Proceso:	GMAW (135)	**Tipo de transferencia:**	Corto circuito
Tipo de junta:	A Tope	**Posición calificada:**	1G (Plana)
Material base:	ASTM A36 – AISI 304	**Rango de espesor:**	3,0 – 12,0 mm
Material de aporte:	ER309L (1,6 mm)	**Rango de diámetro:**	No aplica (placa)
Gas de protección:	Ar + 2% CO_2	**Metal de aporte:**	ER309L
Respaldo:	No aplica	**Precalentamiento:**	No requerido
PWHT:	No requerido	**Otros:**	—

3. ENSAYOS REALIZADOS

Ensayo	Norma / Método	Resultado	Aceptación
Inspección visual	ASME Sección IX QW-302	Aceptable	Aceptable
Ensayo de líquidos penetrantes	ASME Sección V / ASTM E165	Aceptable	Aceptable
Ensayo radiográfico	ASME Sección V / ASTM E94	Aceptable	Aceptable
Ensayo de tracción transversal	ASME Sección IX QW-153	Cumple	Cumple
Ensayo de doblez guiado	ASME Sección IX QW-161	Cumple	Cumple

4. RESULTADO DE LA CALIFICACIÓN

El soldador mencionado anteriormente ha demostrado habilidad para producir soldaduras aceptables según el WPS No. WPS-GMAW-ER309L-001, quedando CALIFICADO dentro de los rangos y variables indicadas.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____
Fecha: _____	Fecha: _____	Fecha: _____

